



**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ**



**МІНІСТЕРСТВО
ОСВІТИ І НАУКИ
УКРАЇНИ**



**УКРАЇНСЬКА РАДА
ІНЖЕНЕРІВ-БУДІВЕЛЬНИКІВ**



**БУДІВЕЛЬНА
ПАЛАТА
УКРАЇНИ**



**АКАДЕМІЯ
БУДІВНИЦТВА
УКРАЇНИ**



**ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО
«ДЕРЖАВНИЙ НАУКОВО-
ДОСЛІДНИЙ ІНСТИТУТ
БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ»**



**VI Міжнародна науково-практична конференція
«ЕНЕРГООЩАДНІ МАШИНИ
І ТЕХНОЛОГІЇ»**

20-21 травня 2025 року

Присвячено 95-річчю з дня заснування КНУБА

Матеріали конференції

Київ 2025

Рекомендовано до друку Вченою радою Київського національного університету
будівництва і архітектури (протокол №33 від 30.05.2025 р.)

Рецензенти:

О.Ф. Луговський, доктор технічних наук, професор

І.В. Кузьо, доктор технічних наук, професор

І.М. Берник, доктор технічних наук, доцент

***Матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції
«Енергоощадні машини і технології»***

**Установа-організатор конференції:
Київський національний університет будівництва і архітектури**

«Енергоощадні машини і технології», Матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції, 20-21 травня 2025 р. – К.: КНУБА, 2025. – 269 с.

До збірки включено матеріали, які стосуються енергоощадних машин, теорії їх дослідження, принципів створення і впровадження, інноваційних технологій створення енергоощадних систем в умовах сучасного будівництва, методів моделювання систем, моніторингу і діагностики технічних об'єктів.

Матеріали тез розраховані на викладачів, науковців та спеціалістів, що працюють в галузі теоретичних досліджень та практичного застосування енергоощадних машин і технологій, а також на студентів і аспірантів технічних ЗВО, фахівців науково-дослідних організацій та підприємств

Відповідальний за випуск – професор кафедри машин і обладнання технологічних процесів, д.т.н., професор Назаренко І.І.

Редакційна колегія:

І.І. Назаренко – д.т.н., професор кафедри машин і обладнання технологічних процесів – головний редактор;

О.П. Дєдов – д.т.н., професор кафедри машин і обладнання технологічних процесів;

М.О. Клименко – к.т.н., завідувач кафедри машин і обладнання технологічних процесів;

О.С. Дьяченко – к.т.н., доцент кафедри машин і обладнання технологічних процесів;

В.С. Слюсар – аспірант кафедри машин і обладнання технологічних процесів.

Матеріали друкуються в авторській редакції.

© Київський національний університет будівництва і
архітектури, 2025

© Автори статей, 2025

ПРОГРАМНИЙ КОМІТЕТ

Голова програмного комітету:

Дніпров Олексій Сергійович, д.ю.н., ст.досл., ректор Київського національного університету будівництва і архітектури (КНУБА).

Заступники голови програмного комітету:

Куліков Петро Мусійович, д.е.н., професор, голова Вченої ради Київського національного університету будівництва і архітектури (КНУБА).

Ковальчук Олександр Юрійович, к.т.н., с.н.с., проректор з наукової роботи та інноваційного розвитку Київського національного університету будівництва і архітектури.

Назаренко Іван Іванович, д.т.н., професор, професор кафедри машин і обладнання технологічних процесів Київського національного університету будівництва і архітектури, президент Академії будівництва України.

Члени програмного комітету:

Альтенбах Хольм, Магдебург, Німеччина.

Анджей Смолаж, д.т.н., професор, Люблін, Польща.

Барабаш М.С., д.т.н., професор, Київ.

Бобир М.І., д.т.н., професор, Київ.

Троян В.В., д.т.н., професор, ЕТН Цюрих, Цюрих, Швейцарія.

Гурський В.М., д.т.н., доцент, Львів.

Данильченко Ю.М., д.т.н., професор, Київ.

Згалат-Лозинська Л.О., д.е.н., професор, Київ.

Ковров А.В., к.т.н., професор, Одеса.

Кузьо І.В., д.т.н., професор, Львів.

Ланець О.С., д.т.н., професор, Львів.

Лич В.М., д.е.н., професор, Київ.

Лізунов П.П., д.т.н., професор, Київ.

Ловейкін В.С., д.т.н., професор, Київ.

Луговський О.Ф., д.т.н., професор, Київ.

Нестеренко М.М., к.т.н., доцент, Полтава.

Ніколаєв В.П., д.е.н., професор, Вроцлав, Польща.

Онищенко А.М., д.т.н., професор, Київ.

Оніщенко В.О., д.е.н., професор, Полтава.

Паламарчук І.П., д.т.н., професор, Київ.

Перегінець І.І., к.т.н., Київ.

Петрина Ю.С., д.т.н., професор, Берлін, Німеччина.

Петраков Ю.В., д.т.н., професор, Київ.

Поліщук Л.К., д.т.н., професор, Вінниця.

Рижакова Г.М., д.е.н., професор, Київ.

Роговський І.Л., д.т.н., професор, Київ.

Савицький М.В., д.т.н., професор, Дніпро.

Сташевський С.Т., к.т.н., Київ.
Струтинський В.Б., д.т.н., професор, Київ.
Стоцько З.А., д.т.н., професор, Львів.
Стричек Ярослав, Вроцлав, Польща.
Ткаченко Т.М., д.т.н., професор, Київ.
Тугай О.А., д.т.н., професор, Київ.
Шкуратов О.І., д.е.н., професор, Київ.
Шилюк П.С., к.т.н., професор, Київ.
Федоровська Н.В., д.т.н., професор, Харків.
Хмара Л.А., д.т.н., професор, Дніпро.
Яхно О.М., д.т.н., професор, Київ.
Якоб Клейман, PhD, професор, Торонто, Канада.

ОРГАНІЗАЦІЙНИЙ КОМІТЕТ

Голова оргкомітету:

Назаренко Іван Іванович, д.т.н, професор, професор кафедри машин і обладнання технологічних процесів КНУБА, президент Академії будівництва України.

Заступники голови оргкомітету:

Дєдов Олег Павлович, д.т.н, доцент, професор кафедри машин і обладнання технологічних процесів КНУБА.

Клименко Микола Олександрович, к.т.н., доцент, завідувач кафедри машин і обладнання технологічних процесів КНУБА.

Рашківський Володимир Павлович, к.т.н., доцент, завідувач кафедри будівельних машин КНУБА.

Члени оргкомітету:

Ручинський Микола Миколайович, к.т.н., професор.

Міщук Євген Олександрович, к.т.н., доцент.

Орищенко Сергій Вікторович, к.т.н., доцент.

Міщук Дмитро Олександрович, к.т.н., доцент.

Косминський Ігор Владленович, к.т.н., доцент.

Секретар конференції:

Дьяченко Олександр Сергійович, к.т.н., доцент.

.

СЕКЦІЯ 1

«ЕНЕРГООЩАДНІ ЗАСОБИ МЕХАНІЗАЦІЇ ПРОЦЕСІВ ВІДНОВЛЕННЯ ОБ'ЄКТІВ І СПОРУД»

ПЕРЕДУМОВИ СТВОРЕННЯ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ВІБРАЦІЙНОГО СТОЛА ЕКСЦЕНТРИКОВО-МАЯТНИКОВОГО ТИПУ _____	14
Тарас Свищ, Олексій Ланець, Ірина Деревенько, Павло Майструк, ¹ Національний університет «Львівська політехніка», вул. С. Бандери, 12, 79013, м. Львів, Україна	
ПІДХІД У МОДЕРНІЗАЦІЇ ВІБРАЦІЙНОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ З ІНЕРЦІЙНИМ ПРИВОДОМ _____	20
Іван Колодій, Олексій Ланець, Ірина Деревенько, Павло Майструк, ¹ Національний університет «Львівська політехніка», вул. С. Бандери, 12, 79013, м. Львів, Україна	
РЕАЛІЗАЦІЯ ЕФЕКТУ ЗОММЕРФЕЛЬДА НА ДВОМАСОВОМУ МАКЕТІ ВІБРАЦІЙНОГО СТОЛА З ІНЕРЦІЙНИМ ПРИВОДОМ _____	25
Роман Капало, Олексій Ланець, Ірина Деревенько, Павло Майструк, ¹ Національний університет «Львівська політехніка», вул. С. Бандери, 12, 79013, м. Львів, Україна	
АНАЛІЗ ПЕРСПЕКТИВ ВИКОРИСТАННЯ РОБОТІВ ІЗ ПАРАЛЕЛЬНОЮ КІНЕМАТИКОЮ ДЛЯ КЕРУВАННЯ БРАНДСПОЙТАМИ В АВТОМАТИЧНИХ СИСТЕМАХ ПОЖЕЖОГАСІННЯ _____	31
Віталій Корендій, Олександр Качур, Михайло Пилип, Роман Карпин, ¹ Національний університет «Львівська політехніка», вул. С. Бандери 12, Львів, 79013, Україна	
ВИЗНАЧЕННЯ ОСНОВНИХ ФАКТОРІВ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ПОТУЖНІСТЬ У ГРАВІТАЦІЙНОМУ ЗМІШУВАЧІ _____	36
Ростислав Рудик, Віктор Вірченко, Роман Сальніков, Юрій Кузуб, ¹ Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», проспект Віталія Грицаєнка 24, 36011, Україна	
ВИЗНАЧЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ ЗАЛЕЖНОСТІ АМПЛІТУДИ ВЕРТИКАЛЬНИХ ВІБРОПЕРЕМІЩЕНЬ ГАРМОНІЙНОЇ ВІБРОПЛОЩАДКИ НА ОСНОВІ ТРИФАКТОРНОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ _____	40
Олександр Орисенко, Олександр Шека, ¹ Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», проспект Віталія Грицаєнка, 24, 36011, Україна	
КОНЦЕПЦІЯ МАЛОГАБАРИТНОГО ВИЛОЧНОГО АВТОНОМНОГО НАВАНТАЖУВАЧА _____	43
Микола Кочеток, Дмитро Міщук, ¹ Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних сил 31, 03037, Україна	
МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ПОДАЧІ БУДІВЕЛЬНИХ СУМІШЕЙ У ВДОСКОНАЛЕНОМУ ШПАКЛЮВАЛЬНОМУ АГРЕГАТІ З ГІДРОПРИВОДОМ ____	46
Роман Сальніков, Віктор Вірченко, Ростислав Рудик, Юрій Кузуб, ¹ Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», проспект Віталія Грицаєнка 24, 36011, Україна	
ANALYSIS AND ASSESSMENT OF THE PRODUCTIVITY OF JAW CRUSHER DEPENDING ON THE FREQUENCY OF REVOLUTION OF THE WORKING BODIES__	50
Yevhen Mishchuk, ¹ Kyiv National University of Civil Engineering and Architecture, Air Force Avenue 31, 03037, Ukraine	

РОЗШИРЕННЯ ТЕХНІЧНОГО І ТЕХНОЛОГІЧНОГО ЗАСТОСУВАННЯ ГІДРОІМПУЛЬСНОГО ПРИВОДА ТА ПРИСТРОЇВ НА ЙОГО ОСНОВІ, ОСНАЩЕНИХ ПРУЖНИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ ВИСОКОЇ ЖОРСТКОСТІ _____	54
Роман Обертюх, Леонід Поліщук	
¹ Вінницький національний технічний університет, Хмельницьке шосе, 95, 21021, Україна	
ВЕРИФІКАЦІЯ ПЕРЕМІЩЕННЯ ПРОСТОРОВО ОРІЄНТОВАНОГО НОЖА НА ВИПРОБУВАЛЬНОМУ СТЕНДІ _____	57
Богдан Федішин, Максим Балака,	
¹ Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних Сил, 31, 03037, Україна	
ОЦІНКА СТАНУ ЛІТІЙ-ІОННИХ АКУМУЛЯТОРІВ _____	60
Сергій Буряк, Оксана Гололобова,	
¹ Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, м. Дніпро, 49010, Україна	
РЕЛАКСАЦІЙНІ ЯВИЩА ПРИ УЩІЛЬНЕННІ АРБОЛІТОВИХ ТА ПОЛІСТИРОЛБЕТОННИХ СУМІШЕЙ _____	63
Микола Нестеренко, Василь Ведмідь, Тетяна Нестеренко, Максим Пирлик,	
¹ Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», проспект Віталія Грицаєнка 24, 36011, Україна	
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ КОМБІНОВАНОГО ВІБРОАБРАЗИВНОГО ПРОЦЕСУ _____	66
Дмитро Бугров, Богдан Коробко, Тетяна Бугрова,	
¹ Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», проспект Віталія Грицаєнка 24, 36011, Україна	
ПОРІВНЯЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВИЗНАЧЕННЯ ПОТУЖНОСТІ ОДНОПОРШНЕВОГО РОЗЧИНОНАСОСА З КОМБІНОВАНИМ КОМПЕНСАТОРОМ ЗБІЛЬШЕНОГО ОБ'ЄМУ З РІЗНИМИ ТИПАМИ ПРИВОДІВ _____	70
Микола Шаповал, Вадим Михайлик,	
¹ Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», проспект Віталія Грицаєнка 24, 36011, Україна	
ВІБРОДІАГНОСТИКА МАШИН ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ _____	74
Сергій Орищенко,	
¹ Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних сил 31, 03037, Україна	
ПЕРСПЕКТИВНИЙ ВІБРОУДАРНИЙ ПРИСТРІЙ ДЛЯ РОЗВАНТАЖЕННЯ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ _____	78
Олена Гнатюк, Денис Гнатюк,	
¹ Житомирський агротехнічний фаховий коледж, Покровська 96, 10003, Україна	
ASSESSMENT AND ANALYSIS OF MOBILE CRUSHING AND SORTING COMPLEXES _____	81
Yevhen Mishchuk, Mykola Ruchinsky, Mykhailo Eremenko,	
¹ Kyiv National University of Civil Engineering and Architecture, Air Force Avenue 31, 03037, Ukraine	

СЕКЦІЯ 2

«ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ВІДНОВЛЕННЯ ІНФРАСТРУКТУРИ В УКРАЇНІ»

ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРИЧНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ ВИМУШЕНИХ КОЛИВАНЬ ДВОХЗВ'ЯЗНОЇ ОБОЛОНКИ МІНІМАЛЬНОЇ ПОВЕРХНІ ПРИ ТЕРМІЧНИХ І СИЛОВИХ НАВАНТАЖЕННЯХ З УРАХУВАННЯМ ГЕОМЕТРИЧНОЇ НЕЛІНІЙНОСТІ.

85

Олександр Кошевий,

¹ Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних сил 31, 03037, Україна

ТЕХНОЛОГІЧНЕ ПЕРЕЗАВАНТАЖЕННЯ: ІННОВАЦІЙНІ ПІДХОДИ ДО ВІДНОВЛЕННЯ ІНФРАСТРУКТУРИ УКРАЇНИ

89

Максюта Антон,

¹ Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних сил 31, 03037, Україна

ЗМІЦНЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ БЕЗПЕКИ УКРАЇНИ ШЛЯХОМ ДИВЕРСИФІКАЦІЇ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГОПОСТАЧАННЯ

91

Віталій Плоский, Олексій Забарилло, Юлія Коротких, Павло Забарилло,

¹ Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних сил 31, 03037, Україна

ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ В ПРОЦЕСІ ВІДБУДОВИ УКРАЇНИ: ШЛЯХИ ДО СТАЛОГО РОЗВИТКУ

95

Названов Денис,

¹ Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних сил 31, 03037, Україна

ПЕРЕХІД ВІД DESIGN-DRIVEN ДО DATA-DRIVEN СИСТЕМ У БУДІВЕЛЬНОМУ ПРОЕКТУВАННІ

97

Андрій Потєха,

¹ Вінницький національний технічний університет, Адреса: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95

3D-ДРУК ТРИМАЧА ДЛЯ ВІДБОРУ КЕРНІВ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ВІМ-ТЕХНОЛОГІЙ

101

Микола Корзаченко, Ігор Петренко,

¹ Національний університет «Чернігівська політехніка», вул. Шевченка 95, 14035, Україна

АКТУАЛЬНІСТЬ ЕФЕКТИВНОЇ ПЕРЕРОБКИ БЕТОНУ У ВТОРИННИЙ ЩЕБІНЬ І ОБЛАДНАННЯ, ЩО ПРИ ЦЬОМУ ВИКОРИСТОВУЄТЬСЯ

104

Максим Миколайчук, Владислав Кібаленко, Олександр Дьяченко, Володимир Слюсар,

¹ Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних сил 31, 03037, Україна

КОНЦЕПЦІЯ СИСТЕМИ «РОЗУМНОГО» ВИРОБНИЦТВА НА ОСНОВІ ІoT

108

Марія Данильченко, Євгеній Горбатюк, Дмитро Міщук,

¹ Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИЙ РЕНЕСАНС: ІННОВАЦІЙНІ БУДІВЕЛЬНІ ТЕХНОЛОГІЇ У ПОВОЄННІЙ ВІДБУДОВІ УКРАЇНИ

111

Ганна Шпакова, Андрій Шпаков, Ірина Глущенко,

¹ Київський національний університет будівництва і архітектури, просп. Повітряних Сил, 31, Україна

ОСОБЛИВОСТІ ОРГАНІЗАЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ РІШЕНЬ ПРИ ВІДНОВЛЕННІ ПОВОЄННИХ ТЕРИТОРІЙ _____ 114

Олександр Молодід, Володимир Рашківський, Микола Пристайло, Юрій Заєць,

¹ Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних сил 31, 03037, Україна

ВИКОРИСТАННЯ МЕХАНІЗОВАНИХ КОМПЛЕКСІВ ПРИ ВИКОНАННІ ДЕМОНТАЖНИХ РОБІТ НА ПОШКОДЖЕНИХ ОБ'ЄКТАХ НЕРУХОМОСТІ _____ 117

Євгеній Горбатюк, Максим Балака, Дмитро Литвинюк, Олександр Тіняков,

¹ Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних сил 31, 03037, Україна

ОСОБЛИВОСТІ ВИКОНАННЯ ДЕМОНТАЖНИХ РОБІТ НА ОБ'ЄКТАХ НЕРУХОМОСТІ З ПОТЕНЦІЙНОЮ НАЯВНІСТЮ ШКІДЛИВИХ БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ _____ 120

Володимир Рашківський, Костянтин Черненко, Сергій Білоконь, Володимир Муляр,

¹ Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних сил 31, 03037, Україна

РОЗРОБКА СИСТЕМИ ДИНАМІЧНОГО МОНІТОРИНГУ ПРОЦЕСІВ НА БУДІВЕЛЬНОМУ МАЙДАНЧИКУ _____ 124

Володимир Рашківський, Роман Демяненко, Наталія Єгорова, Микита Бурковський,

¹ Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних сил 31, 03037, Україна

СЕКЦІЯ 3

«МЕТОДИ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМ, МОНІТОРИНГ І ДІАГНОСТИКА ТЕХНІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ»

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНІЧНИХ КОНСТРУКЦІЙ В УМОВАХ ВПЛИВУ ДИНАМІЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ ВИПАДКОВОГО ХАРАКТЕРУ _____ 127

Олег Дєдов,

¹ Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних сил 31, 03037, Україна

ANALYSIS OF THE USE OF THE FRACTAL METHOD TO SOLVING THE PROBLEM OF DESTRUCTION OF SOLID MATERIALS _____ 131

Ivan Nazarenko, Valery Yakovenko, Yevhen Mishchuk,

¹ Kyiv National University of Civil Engineering and Architecture, Air Force Avenue 31, 03037, Ukraine

ІМІТАЦІЯ ДІЙ СИЛ ТЕРТЯ НА ОСНОВІ МОДЕЛІ ЛУ ГРЕ _____ 134

Цян Лі¹, Олександр Узунов²,

¹ Тунлін Університет, Вулиця Цуйху Сілу 1335, 244061, Китай

² Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», проспект Берестейський 37, 03056, Україна

ПЕРСПЕКТИВИ ТА РИЗИКИ ТЕХНОЛОГІЙ ВІДНОВЛЮВАНОЇ ЕНЕРГІЇ _____ 138

Тетяна Кривомаз, Артем Циба, Роман Гамоцький,

¹ Київський національний університет будівництва та архітектури, проспект Повітряних Сил 31, 03037, Україна

FREQUENCY ANALYSIS OF STRUCTURES: SPECTROGRAM AS A MONITORING TOOL _____ 141

Maksym Vabishchevych, Oleg Dedov, Dmytro Savchuk, Volodymyr Vynokur,

¹ Kyiv National University of Construction and Architecture, Povitryanykh syl avenue 31, 03037, Ukraine

MATHEMATICAL MODELING OF THE NATURE OF LOAD CHANGES IN THE MANIPULATOR ARM DRIVE NYRIO ONE	144
Yaroslav Korobenko, Dmytro Mishchuk,	
¹ Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine	
ОПТИМІЗАЦІЯ РОБОЧИХ РЕЖИМІВ ВІБРАЦІЙНОГО ЕЛЕКТРООСМОТИЧНОГО ЗНЕВОЛОЖУВАЧА СТОХАСТИЧНИМ МОДЕЛЮВАННЯМ	147
Ігор Паламарчук, Оксана Зозуляк,	
¹ Національний університет біоресурсів і природокористування України, вул. Героїв Оборони 15, м. Київ, 03041 Україна	
КОМПЛЕКСНИЙ МОНІТОРИНГ СИСТЕМ ЧЕРЕЗ ПРИЗМУ ТРЕЙСІВ, МЕТРИК ТА ЛОГІВ	152
Владислав Сусідко, Нікіта Панагода, Юлія Рябчун, Володимир Хроленко, Наталія Попович,	
¹ Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних сил 31, 03037, Україна	
ОБҐРУНТУВАННЯ СХЕМ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ З МЕХАНІЧНИМ ВІБРОЗБУДЖУВАЧЕМ	155
Ігор Паламарчук, Денис Наumenко,	
¹ Національний університет біоресурсів і природокористування України, вул. Героїв Оборони 15, м. Київ, 03041 Україна	
АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ЧИСЛОВОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПОШИРЕННЯ ТЕПЛОВИХ СТАЦІОНАРНИХ ПОТОКІВ В БАГАТОШАРОВИХ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЯХ	159
Ілля Мартинов, Валерій Андрухов,	
¹ Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Хмельницьке шосе 95, 21021, Україна	
РОЗРОБКА МОДЕЛІ ПРОГНОЗНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ТА РЕМОНТУ МАШИН І СПЕЦТЕХНІКИ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ТЕЛЕМАТИЧНИХ ДАНИХ	163
Дмитро Альбещенко, Микола Клименко,	
¹ Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних сил 31, 03037, Україна	

СЕКЦІЯ 4

«ВИКОРИСТАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ ТА ЕНЕРГООЩАДНИХ ТЕХНОЛОГІЙ В ПРОЦЕСАХ ОБРОБКИ ТА СТВОРЕННЯ МАТЕРІАЛІВ»	
ОЦІНКА КОНСТРУКЦІЇ РОБОЧИХ ОРГАНІВ ВЕРТИКАЛЬНИХ ВАЛКОВИХ МЛИНІВ ДЛЯ ПОМЕЛУ ЦЕМЕНТІВ ТА ГРАНУЛЬОВАНИХ ШЛАКІВ	166
Микола Клименко, Василь Марач, Михайло Губчик,	
¹ Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних сил 31, 03037, Україна	
ВДОСКОНАЛЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ МАШИН ДЛЯ УЩІЛЬНЕННЯ БУДІВЕЛЬНИХ СУМІШЕЙ	172
Володимир Слюсар,	
¹ Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних сил 31, 03037, Україна	
ГЕНЕРУВАННЯ ПРЯМОЛІНІЙНИХ, КОЛОВИХ ТА ЕЛІПТИЧНИХ ТРАЄКТОРІЙ КОЛИВАНЬ ОДНОМАСОВОЇ ВІБРАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ З КРИВОШИПНО-ПОВЗУННИМ ВІБРОЗБУДНИКОМ	176
Віталій Корендій, Тарас Вільчинський, Владислав Киричук, Олександр Янів,	
¹ Національний університет «Львівська політехніка», вул. С. Бандери 12, Львів, 79013, Україна	

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІ МАТЕРІАЛИ ТА КОНСТРУКЦІЇ, ОТРИМАНІ З ВИКОРИСТАННЯМ ДЕРЕВИНИ ТА ПРОДУКТІВ ЇЇ ПЕРЕРОБКИ	181
Катерина Пушкарьова, Ольга Кривенко, Марина Кочевих, Ольга Гончар,	

¹ Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних сил 31, 03037, Україна

ЕНЕРГЕТИКА ПРОЦЕСУ РУХУ ВІБРАЦІЙНОЇ ПЛИТИ ПРИ УЩІЛЬНЕННІ БУДІВЕЛЬНИХ СУМІШЕЙ	185
---	------------

Андрій Запривода,

¹ Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних сил 31, 03037, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА РУХ МАШИНИ ДЛЯ ФОРМУВАННЯ БЕТОННИХ ВИРОБІВ	188
---	------------

Іван Назаренко¹, Андрій Запривода¹, Андрій Бондаренко², Володимир Слюсар¹, Олексій Погребач¹,

¹ Київський національний університет будівництва та архітектури, Київ, Україна

² Одеська державна академія будівництва та архітектури, Одеса, Україна

ВИЗНАЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ ЗБІРНИХ ОДИНИЦЬ МАШИНИ ЗА УМОВ ДИНАМІЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ	190
--	------------

Іван Назаренко, Віктор Нечипорук, Василь Марач,

¹ Київський національний університет будівництва та архітектури, Київ, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ РЕЗОНАНСНОЇ ВІБРАЦІЙНОЇ МАШИНИ	191
--	------------

Іван Назаренко, Петро Ладкін,

¹ Київський національний університет будівництва та архітектури, Київ, Україна

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІ УЛЬТРАЗВУКОВІ КАВІТАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ОБРОБКИ ТЕХНОЛОГІЧНИХ СЕРЕДОВИЩ	193
---	------------

Ірина Берник, Ігор Драчук,

¹ Національний університет біоресурсів і природокористування, вул. Героїв Оборони, 15, 03041, м. Київ, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ НЕЛІНІЙНИХ ВІБРАЦІЙНИХ СИСТЕМ	196
---	------------

Микола Ручинський,

¹ Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект повітряних сил 31, 03037, Україна

СЕКЦІЯ 5

«ПРОБЛЕМИ ВИЩОЇ ОСВІТИ У ПІДГОТОВЦІ ФАХІВЦІВ У ВОЄННИЙ ТА ПОВОЄННИЙ ЧАС»

КВАНТОВІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ТРАДИЦІЙНІ СТАНДАРТИ: НОВІ ВИМОГИ ДО ВИКЛАДАННЯ МЕТРОЛОГІЧНИХ ДИСЦИПЛІН	200
---	------------

Ігор Косминський,

¹ Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних сил 31, 03037, Україна 200

НЕПЕРЕРВНА ІННОВАЦІЙНА ОСВІТА ЯК СТРАТЕГІЧНИЙ ЧИННИК РОЗВИТКУ ЛЮДСЬКОГО КАПІТАЛУ	203
---	------------

Петро Куліков, Юрій Єсаулов,

¹ Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, проспект Повітряних Сил, 31, 03037, Україна

ПРОФТЕХОСВІТА ЯК ПРІОРИТЕТ ВІДБУДОВИ ТА РОЗВИТКУ ДЕРЖАВИ	208
---	------------

Вячеслав Курепін,

¹ Миколаївський національний аграрний університет, вулиця Георгія Гонгадзе, 9, 54000, Україна

ОСВІТА МОЛОДІ: НАПРЯМИ УДОСКОНАЛЕННЯ ПІДГОТОВКИ ФАХІВЦІВ У ВОЄННИЙ ТА ПОВОЄННИЙ ПЕРІОД	211
Вячеслав Курепін,	

¹Миколаївський національний аграрний університет, вулиця Георгія Гонгадзе, 9, 54000, Україна

ШТУЧНИЙ ІНТЕЛЕКТ У ВИЩІЙ ОСВІТІ: ТЕНДЕНЦІЇ ТА ТРАНСФОРМАЦІЇ	214
Сергій Цвілий,	

¹Національний університет «Запорізька політехніка», Університетська 64, 69063

АКТУАЛЬНІСТЬ ВПРОВАДЖЕННЯ В ОДЕСЬКІЙ ДЕРЖАВНІЙ АКАДЕМІЇ БУДІВНИЦТВА ТА АРХІТЕКТУРИ В МЕЖАХ РЕАЛІЗАЦІЇ МІЖНАРОДНОГО ПРОЄКТУ ERASMUS+ KA2 THE BRIDGE ІННОВАЦІЙНОЇ ОСВІТНЬО – НАУКОВОЇ МАГІСТЕРСЬКОЇ ПРОГРАМИ	217
---	------------

Анатолій Ковров¹, Іван Назаренко², Анастасія Пандас¹,

¹Одеська державна академія будівництва та архітектури, м. Одеса, Україна

²Академії будівництва України, м. Київ, Україна

СЕКЦІЯ 6

«ТЕОРЕТИКО-ПРАКТИЧНІ ТА КОГНІТИВНІ АСПЕКТИ РОЗВИТКУ ЕКОНОМІКИ І МЕНЕДЖМЕНТУ В БУДІВНИЦТВІ»

ШАБЛОНІ УПРАВЛІННЯ БУДІВНИЦТВОМ ДЛЯ РОЗВИТКУ ЕКОНОМІКИ І МЕНЕДЖМЕНТУ	219
---	------------

Олександр Менейлюк, Олексій Нікіфоров,

¹ Одеська державна академія будівництва та архітектури, вул. Дідріхсона, 4, 65029, Одеса, Україна

ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ ТРАНСФОРМАЦІЇ В БУДІВЕЛЬНОМУ ДЕВЕЛОПМЕНТІ	222
Сергій Буняк, Галина Рижакова,	

¹Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних сил 31, 03037, Україна

ІНТЕГРАЦІЙНІ МОДЕЛІ УПРАВЛІННЯ СИСТЕМАМИ БУДІВЕЛЬНИХ ПРОЄКТІВ	225
Дмитро Приходько, Юлія Северенчук, Катерина Сосідко, Ростислав Заладовський	

¹Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних сил 31, 03037, Україна

«ЧИСТИЙ» ПРОМИСЛОВИЙ КУРС ЄС ЯК ОРІЄНТИР ДЛЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОГО ВІДНОВЛЕННЯ ІНФРАСТРУКТУРИ УКРАЇНИ: МОДЕЛІ, ВИКЛИКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ	228
--	------------

Ніна Петруха¹, Павло Ущенко²,

¹ Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, проспект Повітряних Сил, 31, 03037, Україна

² Західноукраїнський національний університет, м. Тернопіль, вул. Львівська, 11, 46009, Україна

КЛАСТЕРИ ЯК ОСНОВА СТІЙКОГО ПОВОЄННОГО ВІДНОВЛЕННЯ ІНФРАСТРУКТУРИ УКРАЇНИ	230
--	------------

Сергій Петруха¹, Владислав Яворський²,

¹Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, проспект Повітряних Сил, 31, 03037, Україна

²Західноукраїнський національний університет, м. Тернопіль, вул. Львівська, 11, 46009, Україна

РИНОК ПРАЦІ УКРАЇНИ В УМОВАХ ВІЙНИ	233
Юлія Чернявська, Надія Лисиця	

¹ Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних сил 31, 03037, Україна

РОЛЬ ЦИФРОВІЗАЦІЇ В УДОСКОНАЛЕННІ РОБОТИ ПРАЦІВНИКІВ БУДІВЕЛЬНОЇ СФЕРИ _____ **236**

Гаман Галина,

¹Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, проспект Повітряних Сил, 31, 03037, Україна

СУЧАСНІ НАПРЯМИ ФІНАНСОВОЇ НАУКИ _____ **239**

Корсун І.М.

¹Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних сил 31, 03037, Україна

АНАЛІЗ ІНДИКАТОРІВ ЕКОНОМІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ІНВЕСТИЦІЙНОЇ ДІЯЛЬНОСТІ ПІДПРИЄМСТВ _____ **242**

Анатолій Чинчик¹, Степан Голубка², Віталій Пивовар³, Яна Локтіонова¹,

¹ Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних сил 31, 03037, Україна

² ВНЗ "Національна академія управління", вул. Ушинського, 15, м. Київ, 03151, Україна

³ Бюро економічної безпеки України, вул. Шолуденка, 31, м. Київ, 04116, Україна

СЕКЦІЯ 7

«ТЕХНОЛОГІЇ ЗАХИСТУ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА»

ТОКСИКОКІНЕТИЧНІ АСПЕКТИ УПРАВЛІННЯ ЕКОЛОГІЧНОЮ БЕЗПЕКОЮ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОНЕНТІВ ВІДХОДІВ ЕЛЕКТРИЧНОГО ТА ЕЛЕКТРОННОГО ОБЛАДНАННЯ (ВЕЕО) _____ **246**

Євгеній Гречанюк, Віталій Іщенко,

¹Вінницький національний технічний університет, вул. Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, 21000, Україна

ЗАСТОСУВАННЯ УЛЬТРАЗВУКОВИХ КАВІТАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ОБРОБКИ РІДИН З МЕТОЮ ЗНЕЗАРАЖЕННЯ ТА ОЧИЩЕННЯ ВІД МЕХАНІЧНИХ ДОМШОК _____ **250**

Олександр Луговський, Андрій Зілінський, Ігор Гришко, Аліна Шульга,

¹Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", м.Київ, Берестейський проспект, 37, 03056, Україна

ТЕХНОЛОГІЇ ВІДЕОСПОСТЕРЕЖЕННЯ – ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИЙ ЗАХИСТ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА _____ **253**

Вячеслав Курепін¹, Валерія Іваненко²,

¹Миколаївський національний аграрний університет, вулиця Георгія Гонгадзе, 9, 54000, Україна

²Управління з питань надзвичайних ситуацій та цивільного захисту населення Миколаївської міської ради

БАЗАЛЬТОВИЙ ТУФ У ТЕХНОЛОГІЯХ ЗАХИСТУ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА _____ **256**

Вадим Радіонов¹,

¹Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, вул. Черноглазовская, 17, 61002, Україна

ГІС-ТЕХНОЛОГІЇ ЯК ЕФЕКТИВНИЙ ІНСТРУМЕНТ УПРАВЛІННЯ ТА КОНТРОЛЮ СТАНУ ПИТНОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ УРБОЕКОСИСТЕМ _____ **259**

Павло Старжинський, Ігор Прокопенко,

¹Київський національний університет будівництва та архітектури, м. Київ, пр-т Повітряних Сил, 31, 03037, Україна

**APPLICATION OF SATELLITE MONITORING TECHNOLOGY TO PROVIDE
MANAGEMENT MECHANISMS FOR ENVIRONMENTAL CONTROL IN UKRAINE __ 263**

Dmytro Todchuk¹, Alexander Apostolov², Igor Onopchuk¹, Lesya Yelistratova²,

¹Budget Institution "National Center for GHG Emission Inventory", Vasyl Lypkivskoho Str., 35, Kyiv, 03035, Ukraine

²Scientific Centre for Aerospace Research of the Earth of the IGS of the NAS of Ukraine, Olesia Honchara Str., 55-b, Kyiv, 01054, Ukraine 263

СЕКЦІЯ 1

«ЕНЕРГООЩАДНІ ЗАСОБИ МЕХАНІЗАЦІЇ ПРОЦЕСІВ ВІДНОВЛЕННЯ ОБ'ЄКТІВ І СПОРУД»

ПЕРЕДУМОВИ СТВОРЕННЯ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ВІБРАЦІЙНОГО СТОЛА ЕКСЦЕНТРИКОВО-МАЯТНИКОВОГО ТИПУ

Тарас Свищ, аспірант кафедри проєктування машин та автомобільного інжинірингу¹,
Олексій Ланець, професор, д.т.н., завідувач кафедри авіаційної та виробничої інженерії¹ (ORCID: 0000-0003-1053-8237),

Ірина Деревенько, доцент, к.т.н., доцент кафедри опору матеріалів та будівельної механіки¹,

Павло Майструк, Ph.D., асистент кафедри робототехніки та інтегрованих технологій машинобудування¹,

¹Національний університет «Львівська політехніка», вул. С. Бандери, 12, 79013, м.Львів, Україна

АНОТАЦІЯ. В матеріалах публікації розкриваються передумови та етапи створення вібраційного стола ексцентриково-маятникового типу. Описана його конструкція, у якій робочий орган встановлено на нерухому основу через віброізоляційні пружні елементи (елементи з низьким коефіцієнтом жорсткості у вертикальному напрямку). В корпусі робочого органа встановлено приводний вал, на який з ексцентриситетом посаджено маятник. Вал через пелюсткову муфту приводиться в рух від асинхронного електродвигуна. За рахунок обертового руху вала з коловою частотою виникає вектор сили збурення, що і приводить коливальну систему в рух. Робочий орган коливається в протифазі до маятника. Розроблений вібростіл ексцентриково-маятникового типу має низку переваг, основні з яких: використання лише одного електродвигуна, що приводить в рух вал з ексцентриситетом, для забезпечення вертикальних коливань робочого органа; миттєвий запуск та зупинка привода без затяжних перехідних режимів; відносна простота конструкції; безпечність експлуатації. Наведено розрахунок основних параметрів вібраційного стола, що забезпечують необхідні режими роботи.

Ключові слова: коливальна система; вібраційний стіл; двомасова конструкція; інерційні та жорсткісні параметри; ексцентриситет; маятник; асинхронний електродвигун

Вступ. Вібраційні машини як технологічне обладнання широко використовуються в усіх галузях промисловості країни [1]. Забезпечуючи високу виробничу ефективність, вібротехнології володіють низькою собівартістю, а тому економічно обґрунтовано приходять на заміну традиційним технологіям. Саме економічні чинники, висока виробнича доцільність, відносна простота виготовлення вібраційного обладнання та легкість його експлуатації обумовлює швидке поширення вібраційної техніки.

Аналіз літературних джерел та напрацювань. Для потреб виробництва в Національному університеті «Львівська політехніка» здійснювались розробки 50-герцових дебалансних вібростолів з габаритами поверхні стола від 1200×900 мм (рис. 1), що призначені для виготовлення будівельних виробів, а саме бруківки, облицювальної плитки, стоків. Передбачувалось, що маса завантаження стола до 250 кг, максимальна амплітуда коливань робочого органа суто у вертикальному напрямку 0.3 мм (еквівалент перевантаженню 3 g на частоті вимушених коливань 50 Гц).

На початку було запропоновано виготовити конструкцію двомасового резонансного вібростола з дебалансним приводом, наведену на рис. 1, а, проте вона містила низку недоліків, а саме: відносна складність реалізації, оскільки необхідно забезпечувати резонансні режими роботи та застосовувати для цього відносно дорогі плоскі пружні елементи, які з двома коливальними масами і утворюватимуть резонансну коливальну систему. Крім того, наведена конструкція, забезпечуючи підсилення коливань у вертикальному напрямку, не усуває бокове та кутове збурення робочого органа. Ці коливання хоча і будуть практично на порядок меншими, проте є не бажаними взагалі. Для усунення цього недоліку необхідно використати два мотор-вібратора, що обертатимуться на зустріч один одному, та це ще більше ускладнює конструкцію, роблячи її економічно невигідною.

Взамін вібростола на рис. 1, а було вирішено реалізувати конструктивно простіший за-резонасний вібростіл з дебалансним приводом (рис. 1, б), в якому використано спарені мотор-вібратори, віброзбуджувачі яких обертаються назустріч один одному і тим самим забезпечують тільки вертикальну складову збурення. Проте, використання двох віброзбуджувачів здорожчує конструкцію. Крім того, зміна маси завантаження та зміна її розташування по поверхні вібростола може викликати небажані перехідні процеси під час яких виникатимуть бокові та кутові коливання.

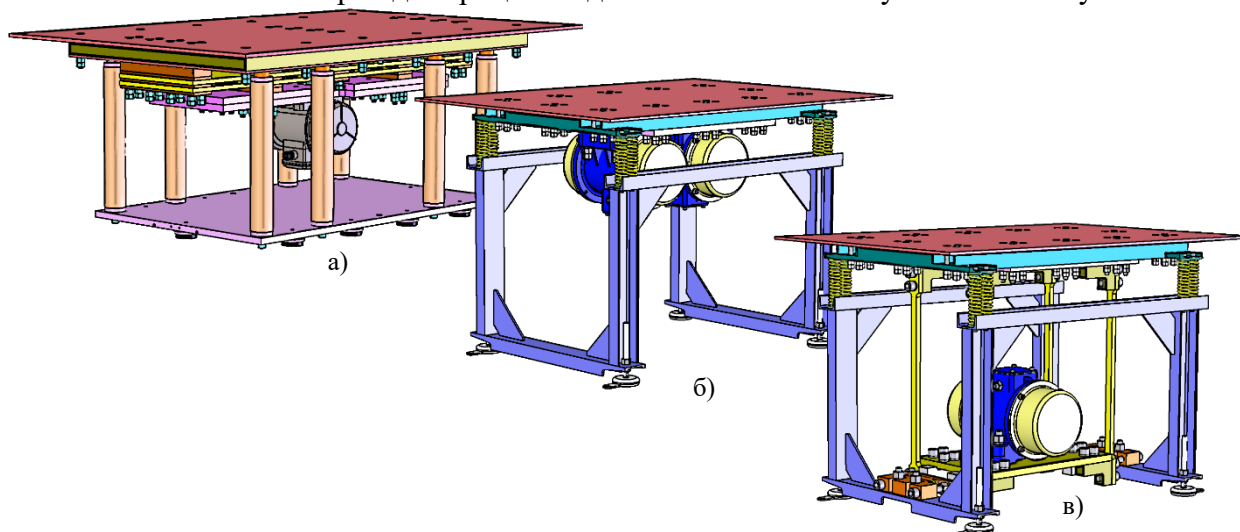


Рис. 1. Конструкції дебалансних вібростолів, що розроблялись в Національному університеті “Львівська політехніка”

Тому від використання двох мотор-вібраторів під час реалізації вібростола прийшлося відмовитись. Забезпечення суто вертикальних коливань вібростіла вирішено було реалізувати на базі одного мотора-вібратора (рис. 1, в), який встановлений на плиті, що з’єднана з робочим органом гнучкими стрижнями. Дана конструкція розраховувалась так, щоб жорсткість стрижнів в горизонтальному напрямку була мала (по суті стрижні працюють як віброізолятори). У такому випадку передача збурювального зусилля в горизонтальному напрямку мінімальна, а отже практично відсутні бокові та кутові коливання робочого органа. У вертикальному напрямку передача збурювального зусилля повна. Проте, коливання плити, на якій встановлений мотор-вібратор, в горизонтальному напрямку значні і на її приведення в рух в по горизонталі необхідно затрачати потужність співмірну з тою, що приводить в рух робочий орган в вертикальному напрямку. Іншими словами необхідно затрачати кіловати енергії на паразитний рух. Це, безумовно, невигідно і не раціонально. Тому і ця конструкції виявилась не придатною для використання.

Наведені вище розробки вібростолів містять явні конструктивні вади, які варто усунути. Взагалі, дебалансні вібромашини володіють низкою недоліків, основні з яких: під час запуску та зупинки вібромашин, що розташовані на віброізоляторах і утворюють тим самим одномасову механічну коливальну систему, на низьких частотах обертання дебаланса проходять через резонанс, спричинений рухом дебаланса з близькою частотою до власної частоти системи. Це може призвести до пошкодження обладнання; значний час виходу на номінальні режими роботи зі стану спокою і тривалий час зупинки; встановлення спеціальних заходів для примусової синхронізації або ж необхідність дотримання певних конструктивних параметрів для самосинхронізації віброзбудників; низька безпечність роботи біля обладнання з відкритими дебалансами, що викликано обертальним рухом тіл зі зміщеними центрами ваги.

Зважаючи на вище сказане, необхідно шукати шляхи створення конструкцій вібростолів без вище наведених недоліків. Не дивлячись на конструктивні вади привода на базі дебалансних віброзбуджувачів, вони широко використовуються в промисловості. Окрім реалізації ефекту самосинхронізації існує ще кілька способів забезпечення напрямленого руху робочого органа, використовуючи лише один електродвигун. Так, забезпечити напрямлені коливання можна завдяки примусовій синхронізації. У такому випадку синхронізація руху дебалансів забезпечується за

рахунок використання зубчастих зачеплень (рис. 2). Однак, зубчасті колеса сприймають значні динамічні навантаження, що часто призводить до їх руйнування.

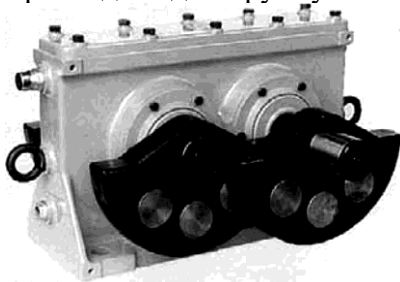


Рис. 2. Дебалансний привод з примусовою синхронізацією фірми Vimes (Італія)

Існують вібраційні привода на базі ексцентрика (рис. 3). В таких машинах частково усуваються недоліки вібраційних машин з дебалансним приводом, а саме короткий час виходу на номінальні режими роботи зі стану спокою і швидка зупинка, значно вища безпечність роботи біля такого віброобладнання порівняно з дебалансним приводом. В наведених конструкціях використано дві коливальні маси: активну і реактивну, з'єднані між собою шатуном, що приводиться від ексцентрика. Напрявлений рух реалізується засобами плоских пружних елементів або важільних підвісок. Для зменшення динамічного навантаження на підшипникові вузли, шатун з'єднується вільним кінцем до коливальної маси через гумові або виті пружні елементи.

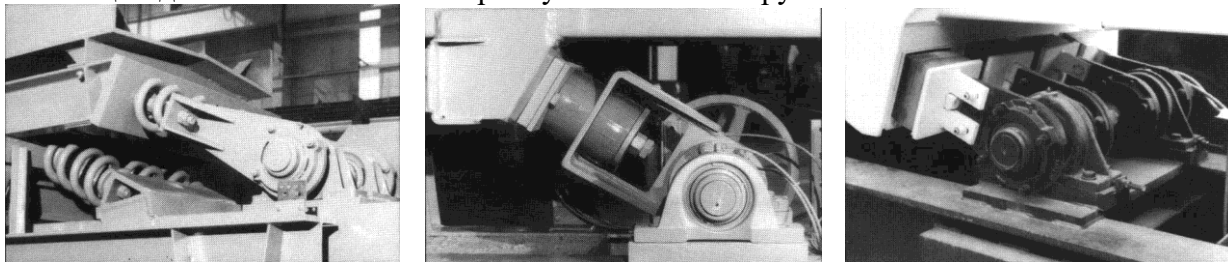


Рис. 3. Різновиди конструкцій ексцентрикових приводів вібраційних машин фірми виробника вібраційного обладнання Carrier (США)

Постановка задачі. Ідеєю, яку автори планують реалізувати – це реалізувати конструкцію вібраційного стола, яка б мала переваги ексцентрикового привода і була проста в реалізації (використання одного електродвигуна, відсутність механізмів напрямлення коливань). По суті, необхідно конструктивно просто реалізувати вертикальний напрямлений рух робочого органа вібростолу, зберігши усі переваги ексцентрикового привода.

Опис принципу побудови вібраційного стола. На рис. 4 подано принципову схему запропонованого вібраційного стола ексцентриково-маятникового типу. Робочий орган 1 встановлюють на нерухому основу через віброізоляційні пружні елементи 2 (елементи з низьким коефіцієнтом жорсткості у вертикальному напрямку). В корпусі робочого органа 1 встановлено приводний вал 3, на який з ексцентриситетом ε посаджено маятник 4. Вал 3 через пелюсткову муфту 5 приводиться в рух від асинхронного електродвигуна 6. За рахунок обертального руху вала з коловою частотою ω виникає вектор сили збурення F_0 , що і приводить коливальну систему в рух. Маса m_1 коливатиметься в протифазі до маятника масою m_3 .

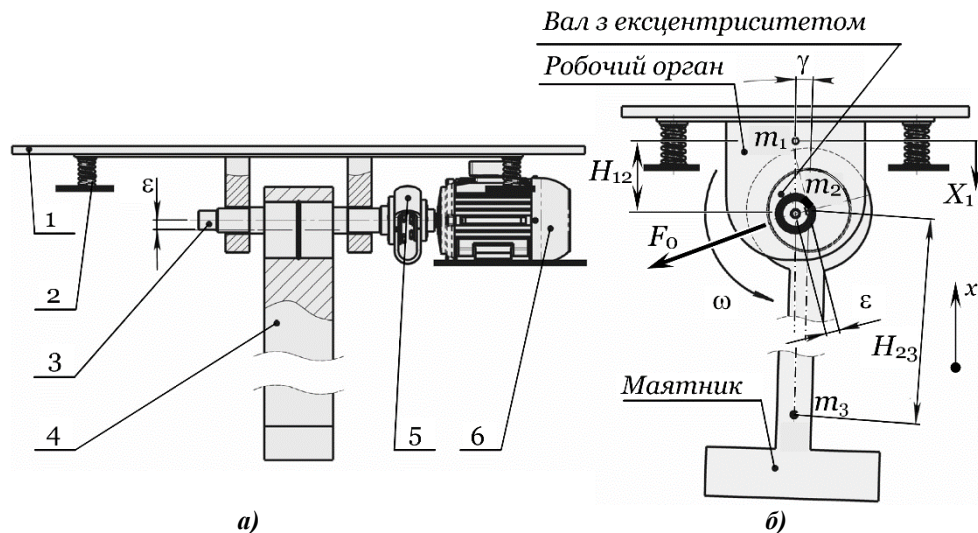


Рис. 4. Принципова схема вібраційного стола ексцентриково-маятничого типу: вигляд збоку (а) та спереду (б)

По суті, це двомасова зарезонансна коливальна система. Завдяки тому, що центр мас маятника опущений відносно осі обертання вала на H_{23} , передавання зусилля на робочий орган у вертикальному напрямку практично повне, у горизонтальному напрямку – часткове (що нижче опущений центр маси маятника відносно осі обертання вала, то менша силова передача в горизонтальному напрямку). Кут відхилення γ маятника малий.

Основне наше завдання – підібрати в комплексі інерційні параметри двох коливальних мас, значення ексцентриситету. Питання встановлення такої потужності електродвигуна, щоб на частоті вимушених коливань він рухався із заданою амплітудою коливань у вертикальному напрямку розглянуті в [2]. В принципі, для попереднього розрахунку параметрів ексцентриково-маятничого приводу можна розглядати тільки вертикальну складову руху коливальних мас.

Твердотіла модель вібростола. Визначення основних параметрів механічної коливальної системи. Розроблена твердотіла модель вібростола (рис. 5) повною мірою відтворюють закладену під час проектування ідею.

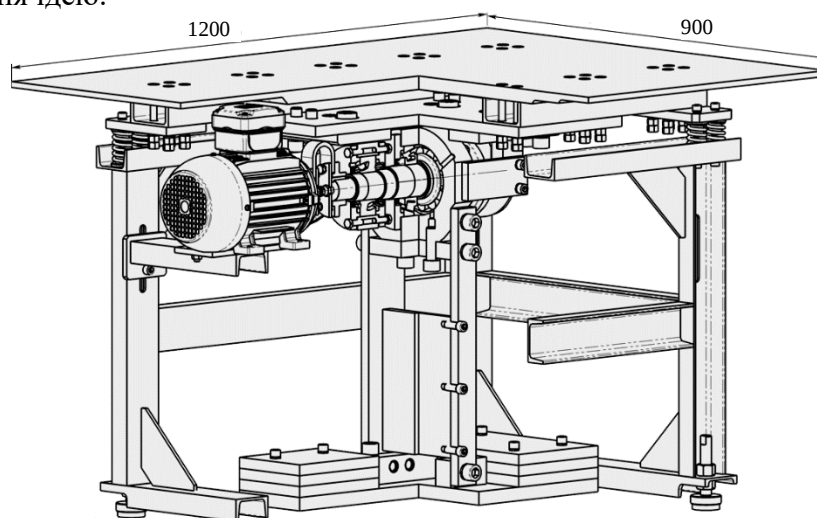


Рис. 5. Просторова модель вібростола

Встановимо значення інерційних параметрів коливальних мас вібростола. Так, маса робочого органа разом з вузлами, які рухаються як одне ціле з ним, згідно з результатами розрахунку, становить $m_{po} = 293.2 \text{ кг}$.

Необхідну масу маятника встановлюємо з таких міркувань. Передбачено, що робочий орган приводитиметься від асинхронного двигуна з номінальною частотою обертання $n_{en} = 2850 \text{ об/хв}$ (

$\Omega = 298 \text{ рад/с}$) і працюватиме з перевантаженням $\xi = 3$, достатнім для ущільнення рідких та напіврідких бетоносумішей. У такому випадку амплітуда коливань робочого органа у вертикальному напрямку становитиме [3]

$$X_1 = \frac{\xi g}{\Omega^2} = \frac{3 \cdot 9.81}{298^2} = 0.00033 \text{ м} = 0.33 \text{ мм} . \quad (1)$$

Приймаємо, що ексцентриситет на валу $\varepsilon = 1 \text{ мм}$. Середня маса завантаження $m_{\text{зав}} = 100 \text{ кг}$. Її частка, що умовно приєднується до робочого органа під час роботи вібраційної машини, становить $k_{\text{пр}} = 0.2$, а отже, розрахункова маса m_1 становитиме

$$m_1 = m_{\text{ро}} + k_{\text{пр}} m_{\text{зав}} = 293.2 + 0.2 \cdot 100 = 313.2 \text{ кг} . \quad (2)$$

Отже, для забезпечення амплітуди коливань $X_1 = 0.33 \text{ мм}$ маса маятника (маса m_3) повинна дорівнювати

$$m_3 = \frac{X_1 m_1}{\varepsilon - X_1} = \frac{0.00033 \cdot 313.2}{0.001 - 0.00033} = 154 \text{ кг} . \quad (3)$$

Таке саме значення маси маятника і реалізовано в конструкції вібростола. Знизу на маятник встановлено шість налагоджувальних плит, зміною кількості яких можна регулювати амплітуду коливань робочого органа. Кожна з плит масою $m_{\text{пл}} = 10 \text{ кг}$. Отже, маса маятника може коливатися від $m_3 = 154 \text{ кг}$ до $m_3 = 94 \text{ кг}$, а тому перевантаження на робочому органі можна змінювати з $\xi = 3$ ($X_1 = 0.33 \text{ мм}$) до

$$X_1 = \frac{\varepsilon m_3}{m_1 + m_3} = \frac{0.001 \cdot 94}{313.2 + 94} = 0.23 \text{ мм} \text{ тобто } \xi = 2 . \quad (4)$$

Зрозуміло, що з чим меншим перевантаженням працюватиме вібростіл, тим більший його ресурс роботи. Висоту маятника конструктивно реалізовано максимально можливою. Чим більша вона, тим менша горизонтальна складова коливань робочого органа.

Розрахунок ексцентрикового вала. Саме маса $m_3 = 154 \text{ кг}$ маятника, яка рухається на валу з ексцентриситетом $\varepsilon = 1 \text{ мм}$, і генерує гармонійне збурювальне зусилля, що і приводить у рух робочий орган з необхідними технологічними параметрами. Найнавантаженіші деталі – ексцентриковий вал та підшипники. Амплітудне значення динамічного навантаження у вертикальному напрямку, що діє на вал, встановлюємо за інерційними силами від руху коливальних мас, а саме

$$F_0 = X_1 m_1 \Omega^2 = 0.00033 \cdot 313.2 \cdot 298^2 = 9178 \text{ Н} . \quad (5)$$

Такий самий результат можна отримати через амплітуду коливань маси m_3 . Так, амплітуда коливань X_3 становить

$$X_3 = \frac{\varepsilon m_1}{m_1 + m_3} = \frac{0.001 \cdot 313.2}{313.2 + 154} = 0.00067 \text{ м} = 0.67 \text{ мм} \quad (6)$$

або ж

$$X_3 = \varepsilon - X_1 = 0.001 - 0.00033 = 0.00067 \text{ м} = 0.67 \text{ мм} , \quad (7)$$

або ж, оскільки під час роботи робочий орган та маятник зрівноважують себе, причому їх амплітуди коливань у вертикальному напрямку обернено пропорційні до інерційних параметрів їх мас, амплітуду коливань X_3 можна знайти як

$$X_3 = X_1 m_1 / m_3 = 0.00033 \cdot 313.2 / 154 = 0.00067 \text{ м} = 0.67 \text{ мм} . \quad (8)$$

Отже, через параметр X_3 амплітудне значення сили F_0

$$F_{\text{ін}} = F_0 = X_3 m_3 \Omega^2 = 0.00067 \cdot 154 \cdot 298^2 = 9162 \text{ Н} , \quad (9)$$

а похибка встановлення значення F_0 спричинена лише точністю підставлених значень параметрів системи.

Параметр F_0 змінюється гармонійно, спричиняючи знакозмінне навантаження на вал. Розробивши вал, зімітувавши його закріплення в підшипникових вузлах, що входять до маси робочого органа, та навантаживши його розрахованим зусиллям $F_0 = 9178 \text{ Н}$ в місцях кріплення маятника, бачимо, що максимальне значення напруження вала (рис. 6) $\sigma_{\max} = 82 \text{ МПа}$ і є прийнятним для знакозмінного навантаження сталей 45, 40Х, 45Х тощо.

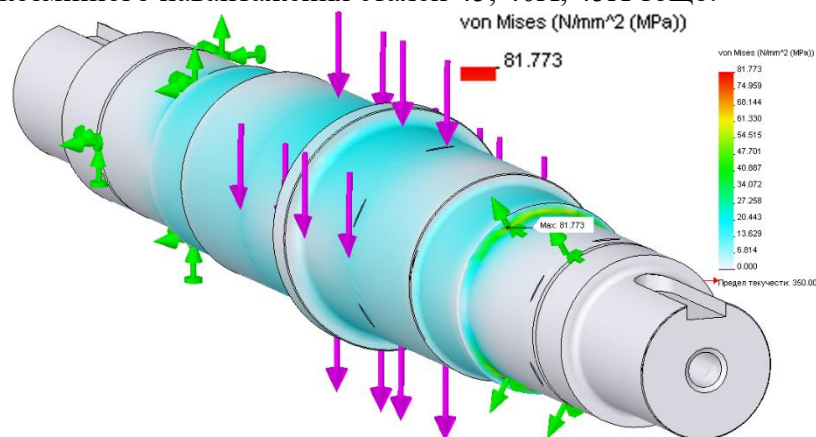


Рис. 6. Результат розрахунку вала на міцність методом скінчених елементів у продукті SolidWorks

Висновки. Розроблений вібраційний стіл ексцентриково-маятникового типу має низку переваг, основні з яких: використання лише одного електродвигуна, що приводить в рух вал з ексцентриситетом, для забезпечення вертикальних коливань робочого органа. Горизонтальна складова руху робочого органа мінімальна; миттєвий запуск та зупинка привода без затяжних перехідних режимів; відносна простота конструкції; безпечність експлуатації, оскільки відсутній обертовий рух незрівноважених мас (дебалансів).

Можна констатувати, що запропонована конструкція вібраційного стола ексцентриково-маятникового типу є придатною для реалізації обладнання цього призначення. Це засвідчує великі перспективи використання запропонованої схеми вібростанини.

Список використаних джерел:

1. Nazarenko, I.I. (2010). Prykladni zadachi teorii vibratsiinykh system: Navchalnyi posibnyk [Applied problems of the theory of vibration systems. Textbook]. (2-he vyd.). Kyiv: Vydavnychiy Dim «Slovo» [in Ukrainian].
2. Lanets, O. S., Dmytriv, V. T., Borovets, V. M., Derevenko, I. A. & Horodetskyi I.M. (2020). Analytical model of the two-mass above resonance system of the eccentric-pendulum type vibration table. International Journal of Applied Mechanics and Engineering, Vol. 25, № 4, 116–129. <http://dx.doi.org/10.2478/ijame-2020-0053>
3. Lanets, O. (2018) Osnovy rozrakhunku ta konstruiuvannya vibratsiinykh mashyn: navchalnyi posibnyk. [Fundamentals of Analysis and Design of Vibratory Machines: tutorial]. Lviv: Lviv Polytechnic Publishing House. <https://vlp.com.ua/node/19256> [in Ukrainian].

ПІДХІД У МОДЕРНІЗАЦІЇ ВІБРАЦІЙНОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ З ІНЕРЦІЙНИМ ПРИВОДОМ

Іван Колодій, аспірант кафедри проектування машин та автомобільного інжинірингу¹,
Олексій Ланець, професор, д. т. н., завідувач кафедри авіаційної та виробничої інженерії¹ (ORCID: 0000-0003-1053-8237),

Ірина Деревенько, доцент, к. т. н., доцент кафедри опору матеріалів та будівельної механіки¹,

Павло Майструк, Ph. D., асистент кафедри робототехніки та інтегрованих технологій машинобудування¹,

¹Національний університет «Львівська політехніка», вул. С. Бандери, 12, 79013, м. Львів, Україна

АНОТАЦІЯ. На практиці часто виникає потреба у модернізації існуючого вібраційного технологічного обладнання, шляхом підвищення його ефективності функціонування. Такі машини, особливо на енергомістких підприємствах, є металосжмиками і технологічно не простими. Все це відбивається на вартості самого обладнання. Тому, надзвичайно рентабельно, не витрачаючи кошти на впровадження у виробництво нового обладнання, створювати на базі наявних конструкцій, високоефективні зразки вібраційних машин. Використовуючи відомий метод розрахунку коливальних систем вібраційного технологічного обладнання з інерційним приводом, розвинено інженерну методику модернізації існуючих конструкцій вібромашин на базі інерційного привода. Наведена методика дозволяє модернізувати одно- та двомасове резонансне вібраційне технологічне обладнання з інерційним приводом, перетворюючи його з мінімальними капіталовкладеннями у високоефективні міжрезонансні системи. Результати роботи відкривають перспективи для оновлення великогабаритного віброобладнання енергомістких галузей промисловості.

Ключові слова: коливальні системи вібраційних машин; дебалансний привод; резонансні та міжрезонансні режими роботи; інерційні та жорсткісні параметри коливальної системи; амплітудно-частотна характеристика

Вступ. У пріоритетних для нашої країни галузях авіаційної, машинобудівної, будівельної, гірничої, хімічної та металургійної промисловостей використовуються великогабаритні та потужні віброустановки. Найпоширенішим типом приводу переважної більшості таких машин є інерційний на основі дебалансних віброзбудників завдяки їх компактності при великій збурювальній силі, відносній легкості їх виготовлення та простоті застосування [1].

Основні методики розрахунку такого вібраційного технологічного обладнання були закладені ще в минулому столітті. Хоча розвинені наукові підходи цілком забезпечують реалізацію широкого класу вібраційного обладнання різноманітного призначення, у більшості випадків воно залишається енергомістким (споживана потужність приводом – від кількох десятків кВт), а методики розрахунку застарілими. Впровадження енергоощадних принципів проектування вібраційних машин матиме загальномасштабний характер у технологічному переоснащенні різного роду виробництв і дасть значний економічний ефект у межах країни.

Постановка задачі. На практиці часто виникає потреба у модернізації існуючого вібраційного технологічного обладнання, шляхом підвищення його ефективності функціонування, під чим розумітимемо зменшення питомих затрат потужності привода на приведення в рух механічної коливальної системи (МКС) за умови забезпечення необхідних технологічних показників віброобладнання [2]. Тому, надзвичайно рентабельно, не витрачати кошти на впровадження у виробництво нового обладнання, а модернізувати базові конструкції, переводячи їх у високоефективні (енергоощадні) зразки вібромашин.

Аналіз літературних джерел. У якості базового розрахунку інерційно-жорсткісних параметрів механічних коливальних систем, що покладений в основу інженерної методики модернізації існуючих конструкцій резонансних вібромашин з інерційним приводом, вибрано метод, наведений в [3]. Цей підхід у розрахунку дозволяє однозначно синтезувати такі параметри вібраційної машини, при яких МКС набуде якісно нову здатність накопичувати високий динамічний потенціал у міжрезонансних режимах роботи, що дозволяє суттєво знижувати необхідну потужність приводу.

Мета роботи. Використовуючи відомий метод розрахунку механічних коливальних систем вібраційного технологічного обладнання з інерційним приводом [3], розвинути інженерну методологію модернізації існуючих конструкцій резонансних вібромашин на базі інерційного привода. Коротко окреслимо даний метод.

Виклад основних аналітичних залежностей у розрахунку міжрезонансних коливальних систем. Як досліджувану МКС взято тримасову конструкцію вібраційної машини (рис. 1), в якій реалізовані прямолінійні коливання і динаміка якої відбувається за тримасовою схемою. Активна 1, проміжна 2 та реактивна 3 маси з інерційними параметрами відповідно m_a , m_n та m_p здійснюють прямолінійні коливання вздовж вертикальної осі x за узагальненими координатами відповідно x_1 , x_2 та x_3 . Активна маса приводиться в рух завдяки кінематичному збуренню від проміжної маси. Збурення вимушених коливань відбувається за рахунок синусоїдального зусилля $p(t) = P \sin(\omega t + \varepsilon)$ (тут P – амплітудне значення збурювального зусилля; t – час; ε – зсув фаз сила–переміщення), що прикладається до реактивної маси. Активна та проміжна, проміжна та реактивна маси попарно з’єднані між собою пружними системами відповідно 4 та 5 із жорсткостями c_1 та c_2 у напрямку руху, що на рис. 1 схематично зображені у вигляді витих пружин. МКС вібромашини встановлена через проміжну масу на віброізолятори 6 жорсткістю c_{i3} .

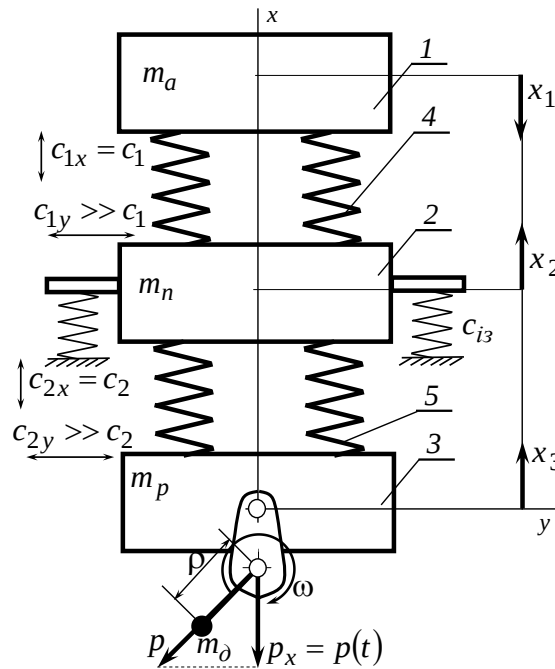


Рис. 1. Принципова схема МКС тримасової вібраційної машини з дебалансним віброзбудником

Вважається, що переміщення реактивної маси 3 у горизонтальному напрямку (вздовж осі y) під дією незрівноваженої маси дебалансу m_θ незначні, що пов'язано з наявністю маятникової підвіски, яка практично нівелює вплив збурювального зусилля у горизонтальному напрямку. Отже, покладаємо, що на реактивну масу 3 діє синусоїдальне збурювальне зусилля лише у вертикальному напрямку (вздовж осі x), знехтувавши рухом по колу з частотою вимушених коливань ω незрівноваженої маси m_θ на ексцентриситеті ρ . Коефіцієнтами дисипації в системі під час синтезу параметрів нехтуємо.

Система диференціальних рівнянь руху за лінійними координатами для тримасової МКС набуде вигляду:

$$\begin{cases} m_a \ddot{x}_1 + c_1 (x_1 - x_2) = 0; \\ m_n \ddot{x}_2 + c_1 (x_2 - x_1) + c_2 (x_2 - x_3) + c_{i3} x_2 = 0; \\ m_p \ddot{x}_3 + c_2 (x_3 - x_2) = P \cdot \sin(\omega t + \varepsilon). \end{cases} \quad (1)$$

Вирази для амплітуд коливань мас відповідно активної X_1 , проміжної X_2 та реактивної X_3 в усталених режимах зведуться до вигляду:

$$X_1 = -P \cdot k_{12} k_{23} / D; \quad X_2 = P \cdot k_{11} k_{23} / D; \quad X_3 = -P \cdot (-k_{12} k_{21} + k_{22} k_{11}) / D, \quad (2)$$

де $D = k_{12}k_{21}k_{33} - k_{11}k_{22}k_{33} + k_{11}k_{23}k_{32}$; $k_{11} = c_1 - m_a\omega^2$; $k_{22} = c_1 + c_2 + c_{i3} - m_n\omega^2$; $k_{33} = c_2 - m_p\omega^2$; $k_{12} = k_{21} = -c_1$; $k_{13} = 0$; $k_{23} = k_{32} = -c_2$; $k_{31} = 0$. Використовуючи спільний знаменник у виразах (2) (детермінант системи рівнянь (1)), знехтувавши дисипацією в системі та жорсткістю c_{i3} :

$$-(c_1 - m_a\omega^2)(c_1 + c_2 - m_n\omega^2)(c_2 - m_p\omega^2) + (c_1 - m_a\omega^2)c_2^2 + c_1^2(c_2 - m_p\omega^2), \quad (3)$$

можна визначити необхідні значення жорсткостей пружних елементів 4 та 5 (рис. 1), задовольнивши умову резонансу. Так, жорсткість c_2 в аналітичному вигляді визначається з (3), прирівнявши його до нуля та враховуючи резонансне налагодження Z МКС шляхом заміни значення ω на ω/z :

$$c_2 = m_p \left(\frac{\omega}{z} \right)^2 \eta, \quad (4)$$

де η – безрозмірний коефіцієнт, який називатимемо часткою від жорсткості C_2 , що математично він собою і являє:

$$\eta = \frac{m_a m_n \left(\frac{\omega}{z} \right)^2 - c_1 (m_a + m_n)}{m_a \left(\frac{\omega}{z} \right)^2 (m_n + m_p) - c_1 (m_a + m_n + m_p)}. \quad (5)$$

Надалі параметром η конструктивно задаємось, причому $\eta \in [0 \dots 1]$. Із виразу (5) визначаємо значення жорсткості C_1 :

$$c_1 = m_a \left(\frac{\omega}{z} \right)^2 \left(\frac{m_p \eta + m_n (\eta - 1)}{(\eta - 1)(m_a + m_n) + m_p \eta} \right). \quad (6)$$

Аналітичні залежності (4) та (6), що пов'язані через параметр η , повністю задовольняють умови характеристичного рівняння тримасової МКС і фіксують другу власну частоту ω_{e2} системи зі значенням ω/z , а перша ω_{e1} встановлюється залежно від конструктивного вибору значення η , яке перерозподіляє інерційно-жорсткісні параметри МКС. Збурення ж системи на частоті ω відбувається у міжрезонансній зоні, причому $\omega_{e1} < \omega < \omega_{e2}$ (рис. 3).

Умова забезпечення синфазних коливань передбачає, що реактивна маса 3 (рис. 1), перебуваючи в силовому збуренні, рухатиметься як одне ціле – синфазно разом з проміжною, тобто їхні коливання будуть однаковими як за амплітудою ($X_2 = X_3$), так і за зсувом фаз ($\varepsilon_2 = \varepsilon_3$) відносно збурювального зусилля P . Ця умова необхідна під час якомога ближчого зведення двох резонансних піків, а саме першого неробочого до другого робочого. Це, власне, і обумовлює явище накладання резонансів, що призводить до зростання коефіцієнтів динамічності в системі. Для реалізації цієї умови прирівнявши другий та третій аналітичні вирази системи рівнянь (2), визначається, як найраціональніше, інерційне значення m_p реактивної маси з врахуванням виразів (4) та (6):

$$m_p = \frac{m_n \left[(1 - \eta) \left((m_a + m_n)(1 - z^2) \right) \right]}{\eta \left[m_n (1 - z^2) + m_a \right]}. \quad (7)$$

Введемо параметр $\check{D}$, який визначається як співвідношення коефіцієнтів динамічності (або ж амплітуд коливань) запропонованих систем відносно резонансних двомасових із інерційним збуренням від реактивної маси. По суті, параметри $\check{D}$ і є показниками енергоощадності, оскільки збільшення коефіцієнта динамічності в системі пропорційно знижує споживану потужність привода. Так, використовуючи аналітичний запис для параметра $\check{D}$, отримавши його із співвідношення першого виразу системи (2) до виразу $X_1 = P/(\omega^2(1 - z^2)(m_a + m_n))$, який відповідає двомасовим системам зі збуренням від однієї маси, як це і відбувається в резонансних двомасових МКС з інерційним збуренням від реактивної маси (рис. 2, а), враховуючи (7), встановлюємо вираз

для частки жорсткості η :

$$\eta = \frac{m_a \ddot{D}}{m_n (1 - z^2) + m_a (1 + \ddot{D})}. \quad (8)$$

Розроблення інженерної методики модернізації існуючого резонансного вібраційного технологічного обладнання, реалізованого на базі інерційного привода. Необхідно розглянути два випадки: а) резонансна двомасова МКС (рис. 2, а); б) одномасова резонансна МКС (рис. 2, б), що працює на низькій вимушеній частоті та налагоджена на білярезонансний режим роботи, де функцію резонансних пружних елементів виконують роль опорні пружні пакети. Така схема використовується рідко і переважно в великогабаритних низькочастотних грохотах, де необхідно досягати високі амплітуди коливань.

Розглянемо структурну схему (рис. 2, а). Підставивши (7) в (5) визначаємо одну з мас, інерційне значення якої необхідно коректувати за залежністю:

$$m_a = \frac{c m_n}{m_n \omega^2 - c}; \quad (9)$$

$$m_n = \frac{c m_a}{m_a \omega^2 - c}. \quad (10)$$

Так, якщо легшою є маса, яка у тримасовій системі виконуватиме функцію активної (кінематично збудованої), необхідно користуватись виразом (9). Якщо ж легшою є маса, яка у тримасовій системі виконуватиме функцію проміжної, необхідно користуватись виразом (10).

Методика модернізації резонансного двомасового інерційного обладнання (рис. 2, а) полягає в наступному. Коректується згідно (10) в більшу сторону менша маса, тобто реактивна маса базової двомасової МКС, що у новоствореній системі виконує функцію проміжної. Вона повинна бути обтяжена приблизно на 10 %, залежно від резонансного налагодження Z , яке було закладене в базову двомасову систему. Конструктивно закладаючи параметр додаткового динамічного підсилення коливань $\ddot{D}$, визначаємо згідно (8) частку жорсткості η . Використовуючи вираз (7) розраховуємо інерційне значення реактивної маси новоутвореної системи, яка буде на багато менша за активну та проміжну ($m_p \ll m_a$, $m_p \ll m_n$). Згідно (4) визначається необхідне значення жорсткості c_2 ($c_2 \ll c_1$). Жорсткість $c_1 = c$, в чому можна переконатись визначивши її згідно (6). У такому випадку вібромашина за тримасовою схемою споживатиме в $\ddot{D}$ разів менше потужності порівняно з базовою моделлю, забезпечуючи ті ж амплітуди коливань мас.

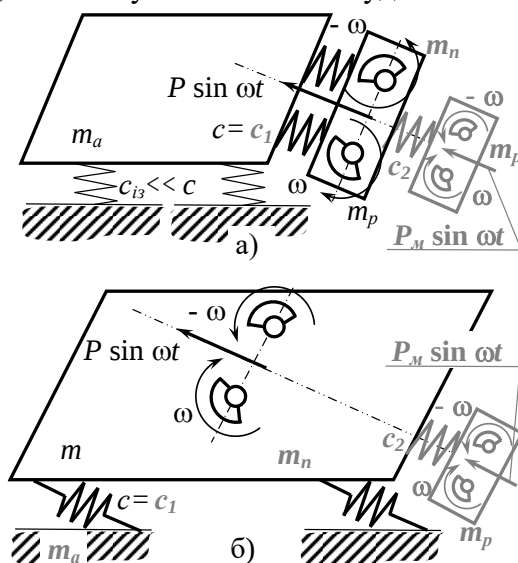


Рис. 2. Структурне відображення модернізації дво- (а) та одномасової (б) МКС вібраційної машини з інерційним приводом (для якої контури та позначення наведені чорним кольором) у високоефективну тримасову систему (структурні введення та позначення якої в сірому відтінку)

Розглянемо структурну схему на рис. 2, б. Реально така система двомасова, оскільки другою масою виступає фундамент. Модернізація такого обладнання відбувається аналогічно методиці наведеній вище. Так, нехай, на базі одномасового резонансного грохота, шляхом модернізації, необхідно створити високоефективний. Під час аналізу базової моделі встановлено, що маса робочого органа становить близько $m = 20000 \text{ кг}$. Резонансне налагодження системи (обов'язкова умова $z < 1$) $z = 0.96$, частота вимушених коливань $\nu = 12 \text{ Гц}$ ($\omega = 75.4 \text{ рад/с}$). Тому жорсткість пружної системи згідно $c = m_{\text{зв}} (\omega / z)^2$, де $m_{\text{зв}} = m_a m_p / (m_a + m_p)$ – зведена маса; Z – резонансне налагодження МКС, становить: $c = 1.23 \cdot 10^8 \text{ Н/м}$, коли $m_a \rightarrow \infty$.

Покладено, що коефіцієнт додаткового динамічного підсилення коливань становить $\bar{D} = 10$. Тоді, згідно (8) частка жорсткості рівна $\eta = 0.91$, згідно (10) інерційне значення проміжної маси новоствореної системи повинне становити $m_n = 21700 \text{ кг}$, тобто маса робочого органа повинна бути обтяжена на 1700 кг . З врахуванням того, що $m_n \ll m_a$, формула (10) може бути переписана як:

$$m_n = \lim_{m_a \rightarrow \infty} \left(\frac{c m_a}{m_a \omega^2 - c} \right) = \frac{c}{\omega^2} = \frac{m}{z^2}. \quad (11)$$

До проміжної маси уже тримасової системи через пружну систему жорсткістю $c_2 = 9.54 \cdot 10^5 \text{ Н/м}$ (згідно (4)) кріпиться реактивна маса $m_p = 170 \text{ кг}$ (згідно (7)), на яку і встановлюються малопотужні віброзбудники. Віброзбудників на новоутвореній проміжній масі, безумовно, уже не потрібно. Зауважимо, що $c_1 = c = 1.23 \cdot 10^8 \text{ Н/м}$, в чому можна переконатись провівши розрахунок згідно (6). У такому випадку грохот за тримасовою схемою споживатиме в $\bar{D} = 10 \text{ разів}$ менше потужності порівняно з базовою моделлю, забезпечуючи ті ж амплітуди коливань мас (рис. 3).

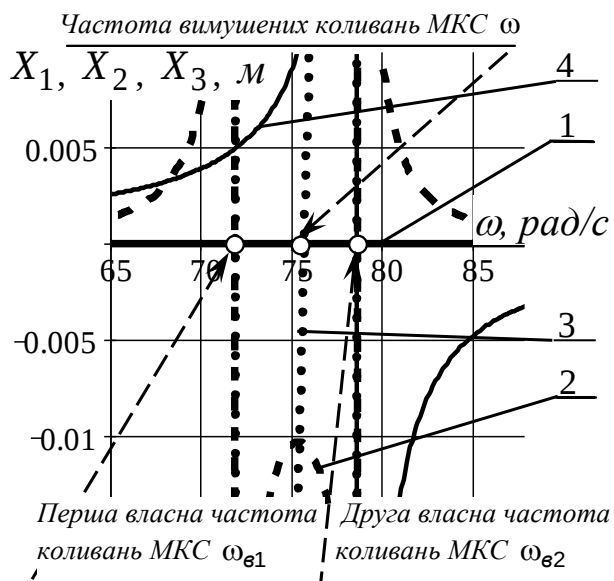


Рис. 3. АЧХ систем: 1, 2, 3 – модернізованої тримасової МКС, для якої збудувальне зусилля $P_m = 10 \text{ кН}$; 4 – базової одномасової, для якої $P = 100 \text{ кН}$, де 1 – активна, 2 – проміжна (робочий орган модернізованої системи) та 3 – реактивна маси; 4 – робочий орган базової моделі

Висновок. Отримані теоретичні результати наочно підтверджують можливість використання розроблених підходів і розрахунків під час модернізації існуючих конструкцій вібраційного технологічного обладнання з інерційним приводом. Новоутворені модернізовані конструкції можуть на порядок менше споживати електроенергії.

Загалом наведена методика дозволяє модернізовувати одно- та двомасове резонансне вібраційне технологічне обладнання з інерційним приводом, перетворюючи його з мінімальними

капіталовкладеннями у високоефективні міжрезонансні системи. Результати роботи відкривають перспективи для оновлення великогабаритного віброобладнання енергомістких галузей промисловості.

Список використаних джерел:

1. Nazarenko, I.I. (2010). *Prykladni zadachi teorii vibratsiinykh system: Navchalnyi posibnyk* [Applied problems of the theory of vibration systems. Textbook]. (2-he vyd.). Kyiv: Vydavnychy Dim «Slovo» [in Ukrainian].
2. V. Gursky and O. Lanets. Modernization of high-frequency vibratory table with an electromagnetic drive: theoretical principle and modeling / *Mathematical Models in Engineering*, vol. 1, no. 2, pp. 34–42, 2015. <https://www.extrica.com/article/16483>
3. Lanets, O.S. (2008). *Vysokoeфекtyvni mizhrezonansni vibratsiini mashyny z elektromahnitnym pryvodom (Teoretychni osnovy ta praktyka stvorennia): Monohrafiia* [High-efficiency interresonant vibrating machines with electromagnetic drive (Theoretical foundations and practice of creation): Monograph]. Lviv: Vydavnytstvo Natsionalnoho universytetu “Lvivska politekhnika”. <https://vlp.com.ua/node/493> [in Ukrainian].

РЕАЛІЗАЦІЯ ЕФЕКТУ ЗОММЕРФЕЛЬДА НА ДВОМАСОВОМУ МАКЕТІ ВІБРАЦІЙНОГО СТОЛА З ІНЕРЦІЙНИМ ПРИВОДОМ

Роман Капало, аспірант кафедри проектування машин та автомобільного інжинірингу¹,
Олексій Ланець, професор, д. т. н., завідувач кафедри авіаційної та виробничої інженерії¹ (ORCID: 0000-0003-1053-8237),

Ірина Деревенько, доцент, к. т. н., доцент кафедри опору матеріалів та будівельної механіки¹,

Павло Майструк, Ph. D., асистент кафедри робототехніки та інтегрованих технологій машинобудування¹,

¹Національний університет «Львівська політехніка», вул. С. Бандери, 12, 79013, м. Львів, Україна

АНОТАЦІЯ. В матеріалах публікації пропонується синтез резонансного вібраційного технологічного обладнання з інерційним приводом здійснювати на базі процесів, пов'язаних з явищем Зоммерфельда. У такому випадку, з наближенням кутової швидкості ротора електродвигуна до резонансного піка системи, оберти дебаланса “зависають” в околі резонансу завдяки процесам, пов'язаних з явищем Зоммерфельда. Це дозволить “зафіксувати” частоту вимушених коливань з близьким дорезонансним налагодженням, реалізуючи в коливальній системі вібраційної машини енергоощадні режими роботи. Для цього розроблено та змодельовано макет вібраційного стола, резонансні режими в якому базуються на ефекті Зоммерфельда. Наведено аналітичні залежності для встановлення інерційно-жорсткісних та силових параметрів коливальної системи, що забезпечують робочі білярезонансні режими роботи вібраційної машини з інерційним збудженням. Складена математична модель такої машини та проаналізовано рух її коливальних мас та маси дебаланса в перехідних та усталених режимах роботи.

Ключові слова: двомасова коливальна система; вібраційна машина; дебалансний привод; резонансний режим роботи; інерційні та жорсткісні параметри; часові залежності руху мас

Вступ. На сьогодні у світі стрімко розвиваються двомасові вібраційні машини з дебалансними віброзбуджувачами, режим роботи яких дорезонансний відносно власної частоти коливань системи [1]. Даний підхід дозволяє суттєво знизити споживану потужність приводу, що в першу чергу викликано наявністю в білярезонансних режимах роботи високих коефіцієнтів динамічності системи. При таких режимах амплітуди коливань мас суттєво зростають залежно від резонансного налагодження механічної коливальної системи.

Аналіз літературних джерел. В існуючих і резонансних вібраційних машинах з інерційним приводом [2–4] для стабілізації частоти обертання дебаланса в околі резонансного піка використовують дорогі системи керування. Проте, електронні пристрої для регулювання обертів електродвигуна значно здорожчують вібраційне обладнання. Зі зростанням потужностей установок непропорційно зростає вартість систем керування.

Формування ідеї. Пропонується синтез резонансного вібраційного технологічного обладнання з інерційним приводом здійснювати на базі процесів, пов'язаних з явищем Зоммерфельда. Частоту вимушених коливань системи брати дещо нижчою за номінальну частоту обертання ротора електродвигуна. У такому випадку, з наближенням кутової швидкості ротора

електродвигуна до резонансного піка системи, оберти дебаланса “зависатимуть” в околі резонансну завдяки процесам, пов’язаних з явищем Зоммерфельда. Це дозволить “зафіксувати” частоту вимушених коливань з близьким дорезонансним налагодженням, реалізуючи в коливальній системі вібраційної машини енергоощадні режими роботи. Тоді, незбалансований ротор, не маючи необхідної потужності для переходу через резонансний пік, “зависне” на певній частоті обертання в близькому дорезонансному режимі. Частота “зависання” обертів дебаланса і буде для вібраційної машини вимушеною. Електродвигун постійного струму за таких умов не повинен вийти з ладу.

Опис моделі двомасового вібростолу. Двомасовий вібростіл з інерційним приводом (рис. 1), в якому реалізуються прямолінійні коливання вздовж осі x за незалежними координатами x_1 і x_2 , містить масу m_2 та масу m_1 , утворену з робочого органа m_{po} та умовно приєднаної частини $k_{np} m_{зав}$ маси середовища завантаження. Маса дебаланса m_d входить в масу m_2 . Коливальні маси з’єднані між собою пружною системою жорсткістю c_{12} . Вібраційна машина встановлена на нерухому основу через віброізолятори жорсткістю c_{i3} , що кріпляться до маси m_2 .

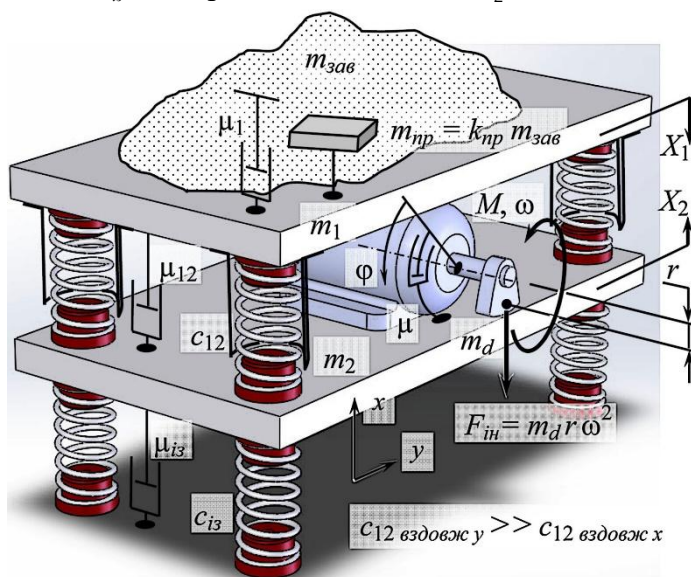


Рис. 1. Принципова схема двомасового вібраційного стола на базі інерційного вібробудника

Силове збурення вимушених коливань в системі відбувається за рахунок примусового обертання з кутовою частотою ω дебаланса масою m_d , розташованого на радіусі r відносно власної осі симетрії ротора. Відцентрова сила $F_{in} = m_d r \omega^2$, що виникає, є причиною знакозмінного силового збурення $F_{in}^x = m_d r \omega^2 \sin \omega t$ маси m_2 вздовж осі x , а як наслідок – її коливальних рухів в цьому напрямку. Передбачається, що конструкція вібромашини виключатиме паразитні кутові коливання мас і вздовж осі y коливання будуть мізерно малими ($c_{12 \text{ вздовж } y} \gg c_{12 \text{ вздовж } x}$), а тому цими рухами нехтуємо. Маса m_1 приводиться в рух завдяки кінематичному збуренню від маси m_2 . В модель у вигляді демпферів вводяться коефіцієнти в'язкого тертя, які пропорційні швидкості. Коефіцієнт μ_1 відображає зовнішній в'язкий опір руху маси m_1 , викликаний впливом маси завантаження $m_{зав}$. Коефіцієнт μ_{12} описує розсіювання енергії у резонансній пружній системі жорсткістю c_{12} ; μ_{i3} – в'язке тертя у віброізоляційних пружних елементах жорсткістю c_{i3} ; μ – відображає в'язке тертя під час обертання за координатою ϕ ротора двигуна з жорстко закріпленим до нього дебалансом.

Розроблення макета вібраційного стола. Приймаємо, що розміри поверхні робочого органа майданчика 134×194 мм. Зважаючи на те, що дві коливальні маси макета вібростолу повинні бути легкими (для таких габаритів необхідно забезпечити параметри $m_1 = 0.22$ кг, $m_2 = 0.9$ кг),

вирішено робочий орган виконувати з оргскла, реактивну масу з алюмінію, а башмаки з текстоліта. Розроблений макет вібростола наведено на (рис. 2).

Динамічна модель вібростола та її аналіз. Система трьох диференціальних рівнянь руху, що описує модель вібростола з інерційним приводом, має вигляд [5]:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + c_{12}(x_1 - x_2) + \mu_1 \dot{x}_1 + \mu_{12}(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) = 0; \\ m_2 \ddot{x}_2 - m_d r (\ddot{\phi} \sin \phi + \dot{\phi}^2 \cos \phi) + c_{12}(x_2 - x_1) + \mu_{12}(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + c_{i3} x_2 + \mu_{i3} \dot{x}_2 = 0; \\ J \ddot{\phi} - m_d r \sin \phi (\ddot{x}_2 - g) = M(\dot{\phi}) - \mu \dot{\phi}, \end{cases} \quad (1)$$

де $J = J_p + m_d r^2$ – сумарний момент інерції маси дебаланса m_d на радіусі розташування r та момента інерції ротора відносно власної осі симетрії; $g = 9.8 \text{ м/с}^2$.

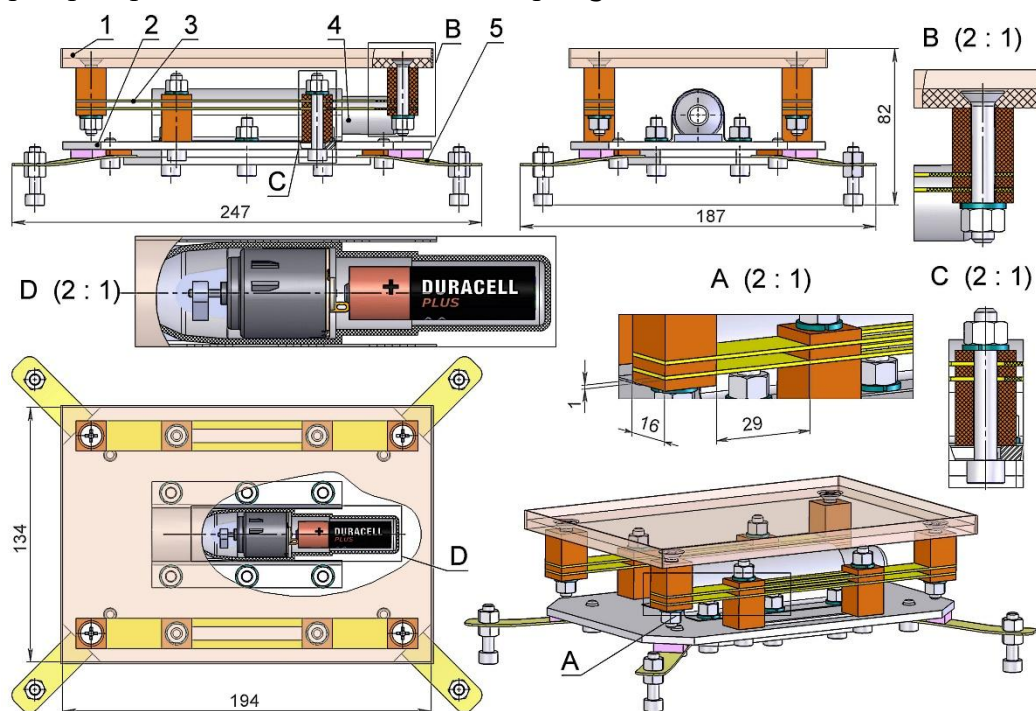


Рис. 2. Макет вібростола, де: 1 – робочий орган масою m_1 , 2 – реактивна маса m_2 , 3 – пружні елементи жорсткістю c_{12} , 4 – мотор-вібратор, 5 – віброізолятори жорсткістю c_{i3}

В якості привода вибрано малопотужний двигун постійного струму марки QX-RF-130-2860 (виробник QX Motor co., Ltd, Гонконг). Для такого електродвигуна момент збурення M є функцією швидкості обертання $\dot{\phi}$ дебаланса, який можна записати у вигляді лінійної залежності $M(\dot{\phi}) = M_0 - a \dot{\phi}$, справедливої для двигуна постійного струму. Тут M_0 – значення момента збурення M при нерухомому дебалансі (коли $\dot{\phi} = 0$); $a = \tan \beta$; β – кут нахилу лінійної залежності $M(\dot{\phi})$ відносно осі абсцис.

Встановимо аналітично частотно-силову характеристику електродвигуна. При пуску електродвигуна ($\dot{\phi} = 0$) момент на роторі становить $M_0 = 0.0043 \text{ Н} \cdot \text{м}$, а при кутовій швидкості $\dot{\phi} = 796 \text{ рад/с}$ ($n = 7600 \text{ об/хв}$) він спадає до $M = 0.00075 \text{ Н} \cdot \text{м}$, можна записати наступну залежність: $M(\dot{\phi}) = M_0 - a \dot{\phi} = 0.0043 - 5.6 \cdot 10^{-6} \dot{\phi}$. На частоті ж вимушених коливань $\Omega = 628.3 \text{ рад/с}$ момент збурення становитиме $M_\Omega = 0.0007 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

В систему нелінійних диференціальних рівнянь (1) час t не входить у явному вигляді. Ці рівняння описують рух автономної механічної коливальної системи. Попередньо не розв'язавши їх, закон зміни в часі кута повороту ϕ незбалансованого ротора встановити неможливо. Наближений аналітичний розв'язок системи (1) є надто складним. Тому, в статті автори обмежились чисельним

розрахунком з використанням методу Рунге-Кутти. Для цього систему (1) подано у нормальному вигляді відносно старших похідних:

$$\left\{ \begin{array}{l} \ddot{x}_1 = \frac{c_{12}(x_1 - x_2) + \mu_{12}(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + \mu_1 \dot{x}_1}{-m_1}, \\ \ddot{x}_2 = \frac{\left[m_d^2 r^2 g \sin^2 \varphi - m_d r \sin \varphi (M(\dot{\varphi}) - \mu \dot{\varphi}) - \right.}{m_d^2 r^2 \sin^2 \varphi - J m_2} \left. - m_d r J \dot{\varphi}^2 \cos \varphi + J [c_{12}(x_2 - x_1) + \mu_{12}(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + c_{i3} x_2 + \mu_{i3} \dot{x}_2] \right], \\ \ddot{\varphi} = \frac{\left[-m_2 (M(\dot{\varphi}) - \mu \dot{\varphi}) + m_d r \sin \varphi \times \left[c_{12}(x_2 - x_1) + \mu_{12}(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + c_{i3} x_2 + \mu_{i3} \dot{x}_2 - \right. \right.}{m_d^2 r^2 \sin^2 \varphi - J m_2} \left. \left. - m_d r \dot{\varphi}^2 \cos \varphi + m_2 g \right] \right]. \end{array} \right. \quad (2)$$

Моделювання роботи вібростола. Зведені дані про параметри макета вібростола наведені в табл. 1. Розв'язуючи систему диференціальних рівнянь (2) в програмному продукті Matcad 13, використовуючи параметри системи наведені в табл. 1, часові залежності руху коливальних мас в першу секунду після запуску вібраційної машини (рис. 3) свідчать, що встановлені значення амплітуд коливань двох мас $X_1 = 0.2 \text{ мм}$, $X_2 = 0.05 \text{ мм}$ на коловій частоті вимушених коливань $\Omega = 100 \text{ Гц}$.

Таблиця 1

Параметри макета двомасового вібраційного стола з інерційним приводом
Інерційні та конструктивні:

Параметр	Значення
$m_1, \text{кг}$	0.22
$m_2, \text{кг}$	0.9
$m_d, \text{кг}$	0.003
$r, \text{м}$	0.003
$X_1, \text{м}$	0.0002
$J, \text{кг} \cdot \text{м}^2$	$1 \cdot 10^{-6}$

Коефіцієнти жорсткості:

Параметр	Значення
$c_{12}, \text{Н / м}$	$7.27 \cdot 10^4$
$c_{i3}, \text{Н / м}$	$\approx 1 \cdot 10^3$

Силові:

Параметр	Значення
$M_\Omega, \text{Н} \cdot \text{м}$	0.0007
$N, \text{Вт}$	0.5

Частотні (наведено для довідок):

Параметр	Значення
$\Omega_s, \text{рад / с}$	641.7
$\Omega, \text{рад / с}$	628.3*
z	0.98*

Коефіцієнти в'язкого опору

Параметр	Значення
$\mu_{12} = \mu_1, \text{Н} \cdot \text{с / м}$	2.3
$\mu_{i3}, \text{Н} \cdot \text{с / м}$	10
$\mu, \text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с / рад}$	$1 \cdot 10^{-6}$

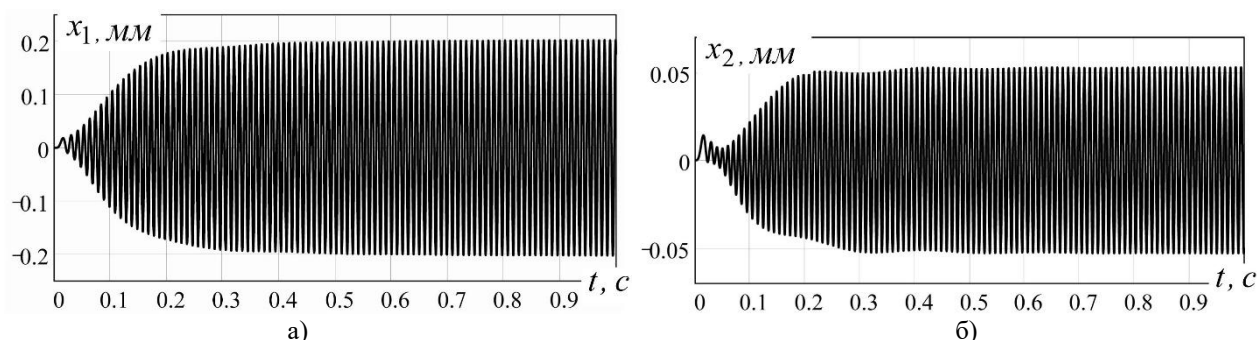


Рис. 3. Теоретичні часові залежності руху мас m_1 та m_2 (відповідно (а) та (б) в дорезонансному режимі відносно власного піка системи при $M(\dot{\varphi}) = M_0 - a\dot{\varphi} = 0.0043 - 5.6 \cdot 10^{-6} \dot{\varphi}$

Перехідні процеси проходять відносно швидко, що пов'язано з доволі високим пусковим моментом для двигуна постійного струму. Оберти дебаланса “зависають” на лівій гілці власного піка системи (рис.4, а), який пройти вона не в змозі. Вібратійний стіл починає працювати в усталеному стійкому дорезонансному режимі відносно першого піка системи на частоті вимушених коливань 101 Гц (рис. 4, б та рис. 5, а). Момент збурення M є замалим для подолання моменту опору на незбалансованому роторі.

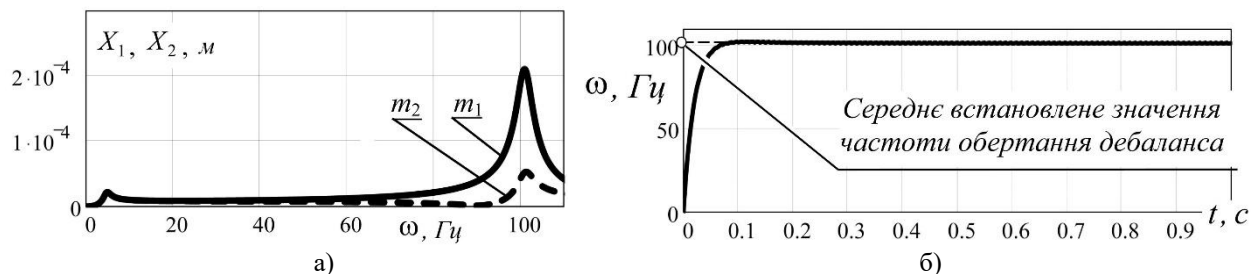


Рис. 4. АЧХ системи (а); вихід частоти обертання дебаланса на дорезонансний режим відносно власного піка системи (б)

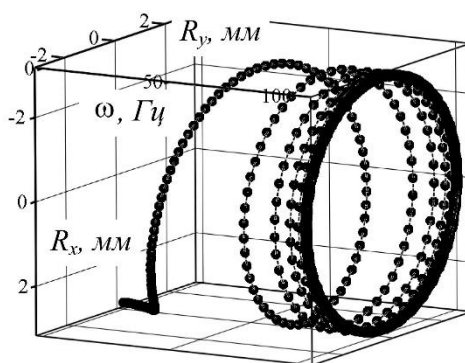


Рис. 5. Зміна колової частоти (кутової швидкості $\dot{\phi}$) обертання дебаланса залежно від проекцій радіуса вектора R розташування дебаланса m_d на осі x та y нерухомої системи координат

Якщо для даної коливальної системи взяти потужніший двигун, його силова характеристика (функція моменту збурення $M(\phi)$) зміниться. Вона буде зміщена паралельно собі вгору, збільшивши початковий момент збурення M_0 . Так, якщо початковий момент збурення зросте з $M_0 = 0.0043 \text{ Н} \cdot \text{м}$ до $M_0 = 0.005 \text{ Н} \cdot \text{м}$, після запуску системи відбудеться “зривання” коливань (рис. 6). Оберти дебаланса проскочать резонансну зону системи і зафіксуються на частоті приблизно 120 Гц .

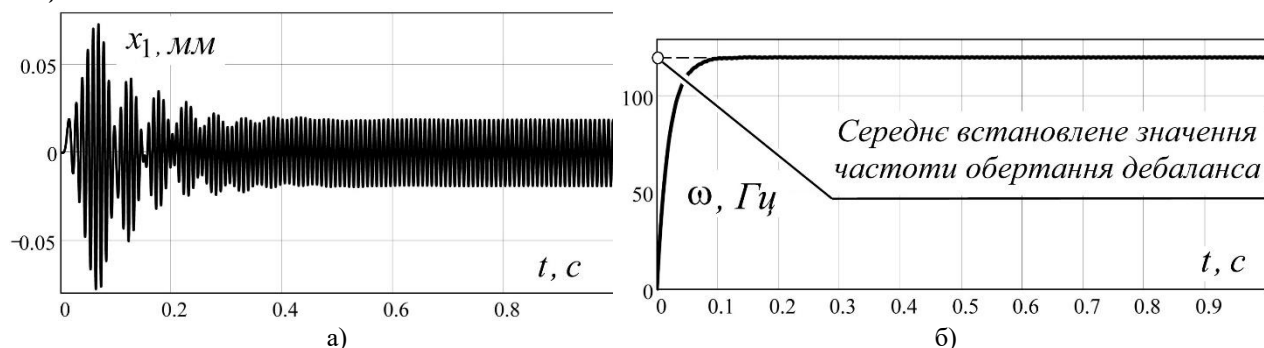


Рис. 6. Теоретичні часові залежності: а) – руху маси m_1 та б) – частоти обертання дебаланса при $M(\phi) = 0.005 - 5.6 \cdot 10^{-6} \dot{\phi}$

Якщо взяти слабший за потужністю двигун, початковий момент збурення буде дещо меншим, для прикладу $M_0 = 0.0035 \text{ Н} \cdot \text{м}$. При збуренні системи від такого двигуна дебаланс не вийде на номінальну частоту обертання і технологічно необхідної амплітуди коливань маси m_1 досягнути не вдасться (рис. 7).

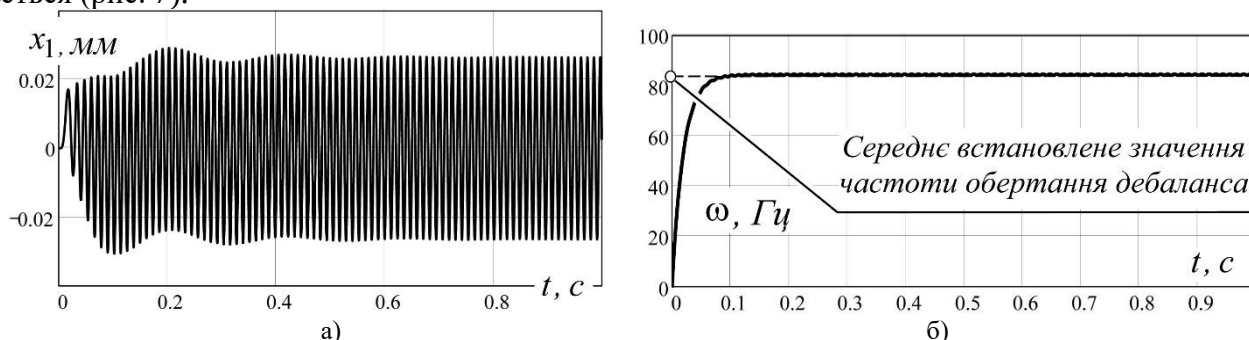


Рис. 7. Теоретичні часові залежності: а) – руху маси m_1 та б) – частоти обертання дебаланса при $M(\phi) = 0.0035 - 5.6 \cdot 10^{-6} \phi$

Висновок. На прикладі макета вібростола з інерційним приводом підтверджена можливість реалізації енергоощадних резонансних режимів, що базуються на ефекті Зоммерфельда. Виявлено, що за умови використання двигунів постійного струму можна забезпечувати стабільну роботу вібраційного технологічного обладнання у білярезонансному режимі роботи. Підтверджено правильність виведених аналітичних залежностей для встановлення інерційно-жорсткісних та силових параметрів системи, адже зняті часові та спектральні характеристики амплітуд коливань мас експериментального зразка двомасової вібраційної машини з інерційним збуренням практично повністю узгоджуються з теоретичними залежностями коливань, побудованими з використанням математичної моделі у вигляді автономної системи трьох диференціальних рівнянь руху.

Список використаних джерел:

1. Nazarenko, I.I. (2010). *Prykladni zadachi teorii vibratsiinykh system: Navchalnyi posibnyk* [Applied problems of the theory of vibration systems. Textbook]. (2-he vyd.). Kyiv: Vydavnychiy Dim «Slovo» [in Ukrainian].
2. P. Czubak. (2016) Vibratory Conveyor of the Controlled Transport Velocity with the Possibility of the Reversal Operations / *Journal of Vibroengineering*, vol. 18, pp. 3539-3547. <http://dx.doi.org/10.21595/jve.2016.17257>
3. Z. V. Despotovic, A. M. Pavlovic, D. Ivanic. (2019) *Exciting Force Frequency Control of Unbalanced Vibratory Actuators*/ Proceedings of the 2019 20th International Symposium on Power Electronics (Ee), Novi Sad, Serbia, 23-26 October 2019, pp. 1-6. <http://dx.doi.org/10.1109/PEE.2019.8923574>
4. V. Gursky, P. Krot, V. Korendiy, R. Zimroz. (2022) Dynamic Analysis of an Enhanced Multi-Frequency Inertial Exciter for Industrial Vibrating Machines/ *Machines*, vol. 10, 130. <http://dx.doi.org/10.3390/machines10020130>
5. Lanets, O.S. (2008). *Vysokoeфекtyvni mizhrezonansni vibratsiini mashyny z elektromahnitnym pryvodom (Teoretychni osnovy ta praktyka stvorennia): Monohrafiia* [High-efficiency interresonant vibrating machines with electromagnetic drive (Theoretical foundations and practice of creation): Monograph]. Lviv: Vydavnytstvo Natsionalnoho universytetu "Lvivska politekhnika". <https://vlp.com.ua/node/493> [in Ukrainian].

АНАЛІЗ ПЕРСПЕКТИВ ВИКОРИСТАННЯ РОБОТІВ ІЗ ПАРАЛЕЛЬНОЮ КІНЕМАТИКОЮ ДЛЯ КЕРУВАННЯ БРАНДСПОЙТАМИ В АВТОМАТИЧНИХ СИСТЕМАХ ПОЖЕЖОГАСІННЯ

Віталій Корендій, доцент, к.т.н., завідувач кафедри ¹ (ORCID: 0000-0002-6025-3013),

Олександр Качур, доцент, д-р філософії, доцент ¹ (ORCID: 0000-0003-2263-6360),

Михайло Пилип, аспірант ¹ (ORCID: 0009-0003-7964-0624),

Роман Карпин, аспірант ¹ (ORCID: 0009-0005-1695-492X),

¹ Національний університет «Львівська політехніка», вул. С. Бандери 12, Львів, 79013, Україна

АНОТАЦІЯ. У дослідженні аналізуються перспективи застосування роботів із паралельною кінематикою для керування брандспойтами в автоматичних системах пожежогасіння. Обґрунтовано актуальність підвищення швидкодії та точності автоматичних систем пожежогасіння через обмеженість традиційних приводів брандспойтів, особливо при компенсації реактивних сил. Розглянуто потенційні переваги роботів із паралельною кінематикою, такі як висока швидкість, жорсткість та точність, для ефективного наведення вогнегасної речовини. Проведено порівняльний аналіз основних типів роботів із паралельною кінематикою (гексаподи, Дельта-роботи, сферичні маніпулятори тощо) за критеріями робочої зони, ступенів вільності, жорсткості та швидкодії. Встановлено, що найбільш перспективними структурами для керування брандспойтами у системах пожежогасіння є платформи Стюарта з 6-ма ступенями вільності завдяки найкращим параметрам маневреності та високим показникам вантажопідйомності й жорсткості. Визначено основні невирішені завдання, зокрема обґрунтування вибору оптимальних геометричних та інерційно-жорсткісних параметрів платформи під дією реактивних сил, розробка високоточних адаптивних систем керування та забезпечення захисту конструкції від негативних зовнішніх чинників (агресивних середовищ, високих температур тощо).

Ключові слова: робот із паралельною кінематикою; брандспойт; автоматична система пожежогасіння; гексапод; платформа Стюарта; Дельта-робот; система керування.

Вступ та постановка проблеми. Забезпечення ефективного та своєчасного пожежогасіння є критично важливим завданням для захисту людських життів, збереження матеріальних цінностей та мінімізації екологічної шкоди, особливо на сучасних промислових об'єктах, енергетичній інфраструктурі та в місцях зберігання небезпечних матеріалів. Актуальність даного дослідження визначається зростаючими вимогами до надійності та швидкодії автоматичних систем пожежогасіння (АСПГ), оскільки швидкість реагування та точність подачі вогнегасної речовини безпосередньо впливають на успішність локалізації та ліквідації займання на ранніх стадіях. Нагальна проблема, що розглядатиметься в даній роботі, полягає в тому, що традиційні виконавчі механізми АСПГ, які керують напрямком брандспойтів (наприклад, стаціонарні лафетні стволи з приводами панорамування та нахилу), часто мають обмеження щодо швидкості перенацілювання, точності позиціонування в динамічних умовах та здатності ефективно компенсувати значні реактивні сили, що виникають від струменя вогнегасної речовини під високим тиском. Це може призводити до неефективного використання води/піни та збільшення часу гасіння.

Незважаючи на те, що застосування робототехніки для завдань пожежогасіння є відомим напрямком (існують мобільні пожежні роботи, роботизовані установки на базі маніпуляторів з послідовною кінематикою), дослідження потенціалу використання саме роботів із паралельною кінематикою (РПК), таких як гексаподи чи дельта-подібні структури, для безпосереднього керування брандспойтами як в стаціонарних, так і в мобільних АСПГ залишається недостатньо висвітленим. Відомі переваги РПК – висока швидкість, прискорення, точність та жорсткість – теоретично можуть надати суттєві переваги для швидкого та прецизійного наведення брандспойта на осередок займання. Таким чином, аналіз перспектив інтеграції РПК в АСПГ є логічним розвитком існуючих наукових досліджень у галузях робототехніки та систем пожежної автоматики, що має значний практичний потенціал.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження та розробка роботів із паралельною кінематикою (РПК) є активною галуззю сучасної робототехніки. Значна кількість публікацій присвячена аналізу їх кінематики, динаміки, сингулярностей, оптимізації конструктивних параметрів та розробці систем керування [1-3]. РПК знайшли широке застосування в різних сферах, таких як високошвидкісна збірка та пакування (Дельта-роботи) [4], точне позиціонування та

симулятори руху (гексаподи/платформи Стюарта) [5]. Водночас, застосування робототехнічних систем для автоматизації процесів у небезпечних середовищах, зокрема для пожежогасіння, також є предметом численних досліджень [6, 7]. Існуючі автоматизовані та роботизовані системи пожежогасіння переважно використовують або стаціонарні установки з обмеженими ступенями свободи (поворотно-похилі платформи) [9], або мобільні роботи з маніпуляторами на базі послідовної кінематики [8]. Такі системи мають свої переваги, але можуть поступатися РПК у швидкості реакції, точності наведення та жорсткості конструкції при роботі зі значними реактивними силами від струменя вогнегасної речовини. Дослідження в напрямку роботизованого керування брандспойтами активно розвиваються. Зокрема, у праці [10] було проведено кінематичний аналіз та розроблено конструкцію робота-маніпулятора саме для таких завдань, що підкреслює актуальність напрямку. Роботи [11-13] присвячені аналізу та оптимізації структурних параметрів маніпуляційних систем загального призначення, що також є важливим для проектування надійних виконавчих механізмів АСПГ. Однак, комплексний аналіз саме перспектив використання паралельних кінематичних структур для керування брандспойтами, з детальною оцінкою їх потенційних переваг (швидкодія, точність, стійкість до реактивних навантажень) [14] та викликів (складність керування [15], захист механізмів, робоча зона) в контексті АСПГ, представлений у науковій літературі недостатньо. Дане дослідження спрямоване на заповнення цієї прогалини шляхом системного аналізу можливостей застосування РПК у цій специфічній галузі.

Формулювання невирішених частин загальної проблеми. Незважаючи на значний доробок у теорії та практиці роботів із паралельною кінематикою (РПК) та визнання актуальності автоматизації пожежогасіння, застосування РПК для безпосереднього керування брандспойтами в автоматичних системах пожежогасіння (АСПГ) залишає низку невирішених науково-технічних питань. На основі проведеного аналізу можна виділити такі невирішені частини загальної проблеми: 1) вибір оптимальної кінематичної структури РПК; 2) кількісна оцінка потенційної ефективності; 3) розробка спеціалізованих алгоритмів керування; 4) забезпечення надійності та захищеності; 5) комплексна інтеграція та техніко-економічне обґрунтування. Вирішення цих питань є необхідним для обґрунтованої оцінки перспектив та практичного впровадження РПК в автоматичні системи пожежогасіння.

Цілі роботи та постановка задач дослідження. Метою даної роботи є аналіз технічних перспектив та ключових проблем використання роботів із паралельною кінематикою (РПК) для керування брандспойтами в автоматичних системах пожежогасіння (АСПГ), а також визначення потенційно ефективних конфігурацій та пріоритетних напрямків для подальших досліджень. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі основні завдання: 1) провести порівняльний аналіз основних типів паралельних кінематичних структур (зокрема, гексаподів, дельта-роботів та інших можливих конфігурацій) щодо їх придатності для застосування в якості виконавчого механізму керування брандспойтом, враховуючи критерії робочої зони, швидкодії, точності, жорсткості та потенційної здатності протидіяти реактивним навантаженням; 2) на основі проведеного аналізу сформулювати висновки щодо найбільш перспективних типів РПК для даного застосування та окреслити ключові напрямки подальших теоретичних та експериментальних досліджень, необхідних для їх практичної реалізації та техніко-економічного обґрунтування.

Порівняльний аналіз основних типів паралельних кінематичних структур. Паралельні кінематичні структури (ПКС), також відомі як паралельні маніпулятори (ПМ), являють собою клас роботизованих механізмів, у яких кінцева ланка (рухома платформа) з'єднана з нерухомою основою за допомогою кількох незалежних кінематичних ланцюгів (кінцівок або ніг), що діють паралельно. Ключовою особливістю ПКС є їх замкнена кінематична структура. Це принципово відрізняє їх від послідовних кінематичних маніпуляторів, які характеризуються відкритою кінематичною ланцюговою структурою, де ланки та з'єднання розташовані послідовно одна за одною, подібно до людської руки. Послідовні роботи часто мають консольну структуру, що впливає на їхні характеристики.

Замкнена структура ПКС обумовлює низку переваг порівняно з послідовними аналогами. Однією з найважливіших є значно вища жорсткість. Навантаження, що діє на кінцеву ланку (рухома платформа), розподіляється між кількома кінематичними ланцюгами, що призводить до менших

деформацій під навантаженням. Це особливо важливо для задач, що вимагають високої точності або роботи зі значними зовнішніми силами, як, наприклад, реактивні сили від пожежного брандспойта. Іншою перевагою є потенціал для високих швидкостей та прискорень. У багатьох конструкціях ПКС приводи (двигуни) розташовані на нерухомій основі або близько до неї. Це суттєво зменшує масу рухомих частин (інерційність) порівняно з послідовними роботами, де двигуни часто розташовані вздовж маніпулятора. Зменшена інерційність дозволяє досягати вищих прискорень та швидкостей при меншому споживанні енергії. ПКС також мають потенціал для високої точності позиціонування та повторюваності. На відміну від послідовних ланцюгів, де похибки окремих з'єднань накопичуються вздовж ланцюга, у замкненій структурі ПКС похибки можуть частково компенсуватися або усереднюватися. Крім того, розподіл навантаження та потенційно легші рухомі частини сприяють вищому співвідношенню вантажопідйомності до власної ваги.

Незважаючи на ці переваги, ПКС мають і суттєві недоліки. Їх робоча зона, як правило, менша за розміром і має складнішу форму порівняно з послідовними роботами аналогічних габаритів. Це пов'язано з тим, що робоча зона ПКС є перетином робочих зон окремих кінцівок. Визначення та аналіз робочої зони ПКС є складним завданням. Кінематичний аналіз ПКС також є складнішим. Хоча обернена задача кінематики (визначення вхідних параметрів приводів для досягнення заданої позиції та орієнтації рухомої платформи) часто є відносно простою, пряма задача кінематики (визначення позиції та орієнтації рухомої платформи за відомими параметрами приводів) зазвичай є дуже складною, часто не має аналітичного розв'язку і може мати множинні рішення (конфігурації збірки). Ще однією серйозною проблемою ПКС є наявність сингулярних конфігурацій всередині робочої зони. У таких конфігураціях маніпулятор може втрачати або набувати ступені вільності, втрачати жорсткість або ставати некерованим. Існують різні типи сингулярностей (Тип 1/Послідовні, Тип 2/Паралельні, Тип 3/Комбіновані), а їх аналіз та уникнення є критично важливими аспектами проектування та керування ПКС.

Існує значна різноманітність паралельних кінематичних структур, що зумовлено широким спектром потенційних застосувань та необхідністю оптимізації під конкретні завдання. Класифікація ПКС може здійснюватися за різними критеріями, що допомагає систематизувати їх вивчення та вибір. Найбільш поширеними критеріями класифікації є:

1. Кількість ступенів вільності (DoF), що визначає кількість незалежних рухів, які може здійснювати кінцева ланка (рухома платформа). ПКС можуть мати від 2 до 6 ступенів вільності. Маніпулятори з меншою кількістю DoF (lower-mobility manipulators) часто є простішими та оптимізованими для конкретних завдань.

2. Тип руху/Геометрія. ПКС поділяються на плоскі (рух у площині, зазвичай 2 поступальних та 1 обертальний рух – 2T1R), сферичні (чисто обертальний рух навколо фіксованого центру – 3R) та просторові (комбінація поступальних та обертальних рухів, наприклад, 3T, 3T1R - рух Шенфліса, або повні 6-DOF – 3T3R).

3. Тип приводів. Приводи можуть бути призматичними (лінійними), як у класичній платформі Стюарта, або обертальними, як у роботі Дельта або 3-RRR маніпуляторах.

4. Кількість кінцівок: зазвичай від 3 до 6 кінцівок.

5. Структура кінцівок, яка визначає типи з'єднань (наприклад, RRR, PRR, SPS, UPS, де R – обертальне, P – призматичне, S – сферичне, U – універсальне з'єднання).

Найчастіше в існуючих дослідженнях та в промисловості зустрічаються наступні типи ПКС, які є релевантними для потенційних просторових маніпуляційних завдань, таких як керування пожежним брандспойтом: 1) платформа Стюарта (просторова, 6-DOF, рис. 1(а)); 2) Дельта-робот (просторовий, 3T або 3T1R, рис. 1(б)); 3) паралельний SCARA (плоский/просторовий, 3T1R, рис. 1(в)); 4) плоскі 3-DOF маніпулятори (наприклад, 3-RRR, рис. 1(г)); 5) сферичні 3-DOF маніпулятори (наприклад, Agile Eye, рис. 1(д)).



Рис.1. Основні типи паралельних кінематичних структур, що використовуються в робототехніці.

Аналіз ключових характеристик ПКС у контексті вимог до керування пожежним брандспойтом виявляє необхідність значних компромісів:

1. Робоча зона та досяжність. Гасіння пожежі вимагає як значних поступальних переміщень для позиціонування брандспойта, так і значних обертальних рухів (великої орієнтаційної робочої зони) для наведення. Багато ПКС, включаючи платформи Стюарта та Дельта, мають обмежену «поступальну» робочу зону порівняно з послідовними роботами. Навпаки, сферичні паралельні маніпулятори, такі як Agile Eye, пропонують дуже велику (навіть, в певній мірі, необмежену) орієнтаційну зону, але не мають можливості поступально переміщати кінцеву ланку. Плоскі та паралельні SCARA роботи є непридатними через недостатню просторову рухливість і невідповідний тип робочої зони.

2. Жорсткість та реактивні сили. Пожежні брандспойти генерують значні, часто непередбачувані реактивні сили. Висока жорсткість маніпулятора є критично важливою для підтримки точності наведення та стабільності під цими навантаженнями. Платформи Стюарта характеризуються високою жорсткістю, а сферичні паралельні маніпулятори також можуть мати високу обертальну жорсткість. Роботи Дельта, оптимізовані для швидкодії, можуть мати недостатню динамічну жорсткість під такими навантаженнями, а вибіркова податливість паралельних SCARA робить їх практично непридатними для керування брандспойтами.

3. *Швидкість та час реакції.* Швидке реагування на зміну обстановки пожежі є життєво важливим. Роботи Дельта пропонують найвищу поступальну швидкість, тоді як сферичні паралельні маніпулятори (Agile Eye) демонструють надзвичайно високу кутову швидкість для швидкого наведення. Платформи Стюарта у цьому плані пропонують баланс, але можуть бути повільнішими за спеціалізовані конструкції.

4. *Точність та наведення.* Точне наведення струменя води є ключовим для ефективного гасіння. Різні типи ПКС мають потенціал для високої точності, але реальна точність залежить від калібрування та здатності системи керування компенсувати динамічні ефекти, включаючи реактивні сили.

5. *Вантажопідйомність та навантаження.* Робот повинен витримувати вагу брандспойта, шланга та протидіяти реактивним силам. Платформи Стюарта мають високу вантажопідйомність, тоді як роботи Дельта та паралельні SCARA мають значно нижчу.

6. *Ступені вільності та відповідність поставленим завданням.* Керування брандспойтом вимагає як мінімум 3 поступальних та 2 обертальних ступенів вільності (3T2R) для позиціонування та наведення в просторі, тоді як 3T3R (6-DOF) надає повну гнучкість брандспойта. Платформа Стюарта (6-DOF) повністю відповідає цим вимогам. Робот Дельта (3T або 3T1R) не забезпечує необхідної орієнтації. Сферичні паралельні маніпулятори (3R) не забезпечують поступального руху для позиціонування. Плоскі (2T1R) та паралельні SCARA (2T1R або 3T1R) не мають достатньої просторової рухливості.

Висновки. Таким чином, проектування та вибір ПКС завжди передбачає пошук компромісу між бажаними високими динамічними характеристиками (швидкість, жорсткість) та необхідністю забезпечення достатньої робочої зони, вільної від сингулярностей, а також керованості та точності. Замкнена структура, що забезпечує жорсткість та дозволяє розміщувати приводи біля основи для швидкості, водночас обмежує рухливість, призводячи до менших робочих зон порівняно з відкритими послідовними ланцюгами. Взаємодія між цими замкненими контурами створює складні кінематичні залежності, що призводить до сингулярних конфігурацій, де продуктивність погіршується або втрачається керування. Конструкції, оптимізовані для швидкості (наприклад, Delta), часто жертвують вантажопідйомністю або складністю робочої зони, тоді як ті, що оптимізовані для жорсткості/вантажопідйомності (наприклад, деякі платформи Стюарта), можуть мати повільнішу динаміку або складніше керування. Ця внутрішня суперечність стимулює різноманітність конструкцій ПКС. Тим не менше, виходячи з проведеного у даному дослідженні порівняльного аналізу, найбільш перспективними архітектурами для керування пожежними брандспойтами є платформи Стюарта (6-DOF), що забезпечують необхідні ступені вільності, високу жорсткість та вантажопідйомність.

Список використаних джерел:

1. Merlet, J.-P. (2006). *Parallel Robots*. Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/1-4020-4133-0>
2. Taghirad, H. D. (2013). *Parallel Robots: Mechanics and Control*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b16096>
3. Choudhury, R., & Singh, Y. (2024). Planar parallel manipulators: A review on kinematic, dynamic, and control aspects. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 238(4), 1991–2016. <https://doi.org/10.1177/09544089231158187>
4. Bonev, I. A. (2001). Delta Parallel Robot – The Story of Success. [Electronic resource]. Access mode: <http://robby.caltech.edu/~jwb/courses/ME115/handouts/DeltaRobotHistory.pdf>
5. Patel, Y. D., & George, P. M. (2012). Parallel manipulators applications – A survey. *Modern Mechanical Engineering*, 02(03), 57–64. <http://dx.doi.org/10.4236/mme.2012.23008>
6. Wang, M., Chen, X., & Huang, X. (2024). Robotic firefighting: A review and future perspective. In X. Huang & W. C. Tam (Eds.), *Intelligent Building Fire Safety and Smart Firefighting. Digital Innovations in Architecture, Engineering and Construction* (pp. 475–499). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-48161-1_20
7. Laxmi, N., Sreeja, K., Shiva Shankar, B., & Anusha, J. (2024). A review paper on fire fighting robot. *Interantional Journal of Scientific Research in Engineering and Management*, 08(04), 1–5. <https://doi.org/10.55041/IJSREM31068>
8. Korendiy, V., Kachur, O., Boikiv, M., Novitskyi, Y., & Yaniv, O. (2023). Analysis of kinematic characteristics of a mobile caterpillar robot with a SCARA-type manipulator. *Transport Technologies*, 4(2), 56–67. <https://doi.org/10.23939/tt2023.02.056>

9. Manikandan, R., Subash, K., Joshua sujith, T., Jayasuriyan, R., Jerendran, J., Rajpradeesh, T., & Rajesh, S. (2021). Design and development of an industrial firefighting rover. *Materials Today: Proceedings*, 45(9), 7965–7969. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.961>
10. Korendiy, V. M., Kachur, O. Yu., Pylyp, M. V., & Karpyn, R. B. (2025). Kinematychnyi analiz ta konstruiuvannia robota-manipulatora dlia keruvannia brandsploityamy [Kinematic analysis and design of a robot manipulator for controlling fire hoses]. *Moloda nauka - robotyzatsiia i nano-tekhnologii suchasnoho mashynobuduvannia*: zbirnyk naukovykh prats Mizhnarodnoi molodizhnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii, 16–18 kvitnia 2025 r. [Young Science - Robotics and Nanotechnology of Modern Mechanical Engineering: Collection of scientific papers of the International Youth Scientific and Technical Conference, April 16–18, 2025] (pp. 183–190). [in Ukrainian].
11. Korendiy, V., Zinko, R., & Cherevko, Y. (2019). Structural and kinematic analysis of pantograph-type manipulator with three degrees of freedom. *Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Materials Science*, 5(2), 68–82. <https://doi.org/10.23939/ujmms2019.02.068>
12. Korendiy, V., Kachur, O., Augousti, A., & Lanets, O. (2024). Optimizing the structural parameters of the robotic system to ensure the efficiency and reliability of work in the production environment. *CEUR Workshop Proceedings*, 3699, 180–197. <https://ceur-ws.org/Vol-3699/paper13.pdf>
13. Korendiy, V. M., Kachur, O. Yu., Pylyp, M. V., & Karpyn, R. B. (2025). Rozroblennia ta doslidzhennia zovnishnikh i vnutrishnikh skhopliuvachiv dlia mizhoperatsiinoho peremishchennia kil'tsepodibnykh detalei [Development and research of external and internal grippers for inter-operational movement of ring-shaped parts]. *Prohresyvni tekhnologii v mashynobuduvanni*: zbirnyk naukovykh prats XIII Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii, Lviv-Zveniv, 18 liutoho – 21 liutoho 2025 roku [Progressive technologies in mechanical engineering: collection of scientific papers of the XIII International scientific-practical conference, Lviv-Zveniv, February 18 – February 21, 2025] (pp. 70–73). [in Ukrainian].
14. Briot, S., & Bonev, I. A. (2010). Accuracy analysis of 3T1R fully-parallel robots. *Mechanism and Machine Theory*, 45(5), 695–706. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2009.04.002>
15. Staicu, S. (2011). Dynamics of the 6-6 Stewart parallel manipulator. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 27(1), 212–220. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2010.07.011>

ВИЗНАЧЕННЯ ОСНОВНИХ ФАКТОРІВ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ПОТУЖНІСТЬ У ГРАВІТАЦІЙНОМУ ЗМІШУВАЧІ

Ростислав Рудик, аспірант ¹ (ORCID: 0000-0001-8386-977X),

Віктор Вірченко, доцент, к.т.н., доцент ¹ (ORCID: 0000-0002-5346-9545),

Роман Сальников, аспірант ¹ (ORCID: 0009-0001-0408-4358),

Юрій Кузуб, аспірант ¹ (ORCID: 0009-0006-8463-3914),

¹ Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», проспект Віталія Грицаєнка 24, 36011, Україна

АНОТАЦІЯ. Розглянуто основні чинники, що впливають на енергоспоживання гравітаційного бетонозмішувача під час приготування бетонної суміші. Проаналізовано вплив обертового та коливального рухів барабана на однорідність суміші та рівень енерговитрат, а також обґрунтовано математичні залежності для розрахунку потужності, необхідної для змішування. Окрема увага приділена енерговитратам, пов'язаним із силами внутрішнього тертя між частинками суміші, а також із процесами завантаження компонентів і вивантаження готового матеріалу. Визначено вплив маси, висоти підйому та конструктивних особливостей механізмів на загальну енергетичну ефективність установки. Отримані результати можуть бути використані для оптимізації конструкції малогабаритних бетонозмішувачів, підвищення їх автономності та зниження енерговитрат у будівельних умовах із обмеженою інфраструктурою.

Ключові слова: гравітаційний бетонозмішувач; бетонна суміш; потужність приводу; змішування; енерговитрати; тертя; будівельне обладнання; автономна установка.

Вступ. В умовах зростаючих вимог до мобільності та енергоефективності будівельного обладнання особливого значення набуває оптимізація конструкцій гравітаційних бетонозмішувачів. Застосування таких установок є актуальним для будівництва в умовах будівельного майданчика, а також для відновлення будівель і споруд постраждалих внаслідок воєнних дій. Одним із ключових технічних показників, що визначає ефективність роботи бетонозмішувача, є потужність приводу, яка має враховувати всі елементи енергоспоживання: від обертання барабана до завантаження і вивантаження суміші.

Аналіз літературних джерел. У науковій літературі розглянуто різноманітні підходи до оптимізації роботи бетонозмішувачів. Зокрема, досліджено вплив геометричних параметрів,

кінематики руху барабана та фізико-механічних властивостей бетонної суміші на енерговитрати. У статті [1] наведено результати досліджень щодо визначення раціональних параметрів гравітаційних бетонозмішувачів, зокрема розглянуто геометричні характеристики та параметри руху, що забезпечують якісне перемішування суміші. Автори акцентують увагу на ролі коефіцієнта заповнення барабана, а також враховують вплив сил тертя під час змішування. У статті [3] проведено дослідження впливу добавок до бетонних сумішей на рівень енергоспоживання в процесі їх змішування. Встановлено залежність між в'язкістю суміші та ефективністю змішування, що є важливим для уточнення витрат потужності, пов'язаних із внутрішнім тертям.

Мета роботи. Метою дослідження є визначення та кількісна оцінка основних факторів, що впливають на потужність гравітаційного бетонозмішувача під час виконання робочого циклу, а також розробка математичних залежностей для її точного розрахунку з урахуванням обертального та осциляційного рухів, сил тертя, операцій завантаження і вивантаження бетонної суміші.

Виклад основного матеріалу. Процес приготування бетонної суміші супроводжується значними енергетичними витратами, які формуються під впливом кількох ключових факторів. До них належать робочий цикл обертання змішувального барабана; наявність вібраційних або коливальних рухів; сили внутрішнього тертя між складовими суміші та поверхнею обладнання [1].

Найбільша частка енергоспоживання припадає на обертання барабана. Це пов'язано з необхідністю подолання масової інерції матеріалу та забезпечення його ефективного перемішування. Потужність, потрібна для обертання барабана, розраховується наступним чином:

$$P_{обр} = M_{обр} \cdot \omega = \omega \cdot (\rho \cdot V_{зам} \cdot g \cdot R_{ср} \cdot \sin \theta + \rho \cdot V_{зам} \cdot \omega^2 \cdot R_{ср}^2), \quad (1)$$

де $M_{обр}$ – крутний момент, Н·м; $P_{обр}$ – потужність обертання, Вт; ω – кутова швидкість обертання барабана, рад/с; $R_{ср}$ – середній радіус, який враховує ефективну площу барабана; $V_{зам}$ – об'єм суміші у барабані, м³; g – прискорення вільного падіння, м/с²; θ – кут нахилу барабана, рад.

Об'єм суміші у барабані визначається:

$$V_{зам} = \left(\frac{2}{3} \pi h (R^2 + Rr + r^2) + \pi R^2 H \right) \cdot k_{геом}, \quad (2)$$

де $k_{геом}$ — коефіцієнт заповнення.

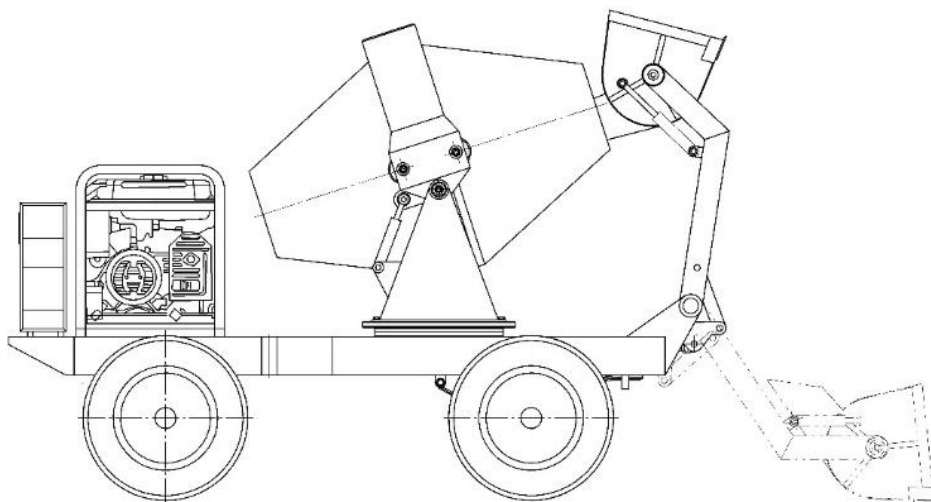


Рис.1. Гравітаційний бетонозмішувач

Осциляційні рухи змішувального барабана значно покращують якість перемішування, забезпечуючи більш однорідний розподіл компонентів у бетонній суміші [2]. Однак ця технологічна перевага супроводжується додатковим споживанням енергії, величина якої визначається трьома основними параметрами: моментом інерції системи, частотою коливань, амплітудою коливального руху.

Для кількісної оцінки цих енерговитрат використовується наступна розрахункова залежність:

$$P_{осц} = \frac{1}{2} m_o R^2 \cdot \theta_o \omega_{осц}^3 \sin(\omega_{осц} t). \quad (3)$$

Процес тертя під час приготування бетонної суміші проявляється у трьох ключових зонах, таких як взаємодія між окремими частинками наповнювача, контакт суміші з внутрішньою поверхнею барабана, взаємодія матеріалу з робочими органами змішувача (лопатями). Для точного розрахунку енерговитрат на подолання сил тертя необхідно враховувати коефіцієнт тертя матеріалів, нормальні сили тиску, особливості руху частинок у процесі змішування.

Враховуючи багатокомпонентність бетонної суміші, втрати на тертя між частинками розраховуються через коефіцієнт тертя між бетонною сумішшю та поверхнею барабана:

$$P_{тертя} = \mu \cdot N \cdot v, \quad (4)$$

де μ – коефіцієнт тертя; N – нормальна сила притискання між сумішшю та поверхнею барабана, Н; v – відносна швидкість руху частинок суміші щодо стінки барабана, м/с.

Процеси завантаження компонентів і вивантаження готової суміші суттєво впливають на загальну потужність обладнання, особливо при використанні автоматизованих систем. Завантаження матеріалів зазвичай здійснюється за допомогою ковшового механізму, встановленого на рамі, тоді як вивантаження відбувається шляхом нахилу барабана. Потужність, необхідна для завантаження компонентів, залежить від маси матеріалів, висоти підйому ковша та швидкості його переміщення [3]. Розрахунок цієї потужності виконується за наступною формулою:

$$P_{завантаж} = \frac{m_{завантаж} \cdot g \cdot h_{підйом}}{t_{завантаж}}, \quad (5)$$

де $P_{завантаж}$ – потужність завантаження, Вт; $m_{завантаж}$ – маса компонентів, що завантажуються за один цикл, кг; $h_{підйом}$ – висота підйому ковша, м; $t_{завантаж}$ – час завантаження компонентів, с.

Робочий механізм ковша, який відповідає за завантаження компонентів, витрачає енергію на три основні процеси: підйом маси матеріалів, подолання сил тертя в напрямних елементах та опору в гідравліці. Потужність, необхідна для підйомної операції, безпосередньо залежить від сумарної маси ковша з матеріалом та висоти підйому, що виражається наступною розрахунковою залежністю:

$$P_{підйом} = \frac{(m_{ковш} + m_{завантаж}) \cdot g \cdot h_{підйом}}{t_{завантаж}}, \quad (6)$$

де $m_{ковш}$ – маса ковша, кг; $m_{завантаж}$ – маса завантажуваних компонентів за один цикл, кг; $h_{підйом}$ – висота підйому ковша, м; $t_{завантаж}$ – час підйому ковша, с.

Для точного визначення енерговитрат під час підйому бетонної суміші важливо враховувати сили, що діють на конструктивні елементи механізму переміщення, зокрема на направляючі. Вага вантажу створює нормальне навантаження на ці елементи, що впливає на загальну потужність системи підйому. Нормальна сила на направляючі визначається за наступною формулою:

$$F_{норм} = (m_{ковш} + m_{завантаж}) \cdot g. \quad (7)$$

Далі слід оцінити швидкість руху ковша, від якої залежать як тривалість циклу завантаження, так і відповідна потужність приводу. Швидкість переміщення залежить від висоти підйому та часу, за який здійснюється цей підйом. Швидкість руху ковша визначається за наступною формулою:

$$v_{ковш} = \frac{h_{підйом}}{t_{завантаж}}. \quad (8)$$

З урахуванням усіх складових – маси елементів, сили тяжіння, втрат у системі та швидкості підйому – можна розрахувати потужність, необхідну для приведення в дію приводу, що виконує підйом. Цей показник є критичним для вибору відповідного електродвигуна або іншого джерела енергії. Потужність приводу визначається за наступною формулою:

$$P_{привід} = (m_{ковш} + m_{завантаж}) \cdot g \cdot h_{підйом} \cdot \left(\frac{1 + \mu_{напр}}{t_{завантаж}} \right). \quad (9)$$

Після завершення змішування бетонна суміш вивантажується шляхом нахилу барабана. Цей процес, як і завантаження, супроводжується витратами енергії, які потрібно врахувати для забезпечення оптимальної роботи системи. Потужність, необхідна для вивантаження, залежить від маси суміші, висоти підйому, зумовленої нахилом, та тривалості цього процесу. Потужність вивантаження визначається за наступною формулою:

$$P_{\text{вивантаж}} = \frac{m_{\text{вивантаж}} \cdot g \cdot h_{\text{нахил}}}{t_{\text{вивантаж}}}, \quad (10)$$

де, $P_{\text{вивантаж}}$ – потужність вивантаження, Вт; $m_{\text{вивантаж}}$ – маса суміші, що вивантажується, кг; $h_{\text{нахил}}$ – висота підйому, зумовлена нахилом барабана, м; $t_{\text{вивантаж}}$ – час нахилу барабана, с.

Таким чином, на основі аналізу основних факторів, що впливають на енерговитрати під час роботи гравітаційного бетонозмішувача за один цикл було отримано узагальнений вираз для розрахунку необхідної потужності:

$$P_{\text{заг}} = P_{\text{обр}} + P_{\text{осц}} + P_{\text{тертя}} + P_{\text{завантаж}} + P_{\text{вивантаж}}. \quad (11)$$

Враховуючи всі перелічені параметри, остаточна розрахункова формула має такий вигляд:

$$P_{\text{заг}} = \omega \cdot (\rho \cdot V_{\text{заг}} \cdot g \cdot R_{\text{ср}} \cdot \sin \theta + \rho \cdot V_{\text{заг}} \cdot \omega^2 \cdot R_{\text{ср}}^2) + \frac{1}{2} m_{\theta} R^2 \cdot \theta_0 \cdot \omega_{\text{сум}}^3 + \\ + \mu \cdot (m_{\text{сум}} \cdot g \cdot \cos \theta + m_{\text{сум}} \cdot \omega^2 \cdot R) \cdot v_{\text{відносна}} + \\ + \frac{(m_{\text{ковш}} + m_{\text{завантаж}}) \cdot g \cdot h_{\text{підйом}} \cdot (1 + \mu_{\text{напр}})}{t_{\text{навантаж}}} + \frac{m_{\text{вивантаж}} \cdot g \cdot h_{\text{нахил}}}{t_{\text{вивантаж}}}. \quad (12)$$

Отже, на основі проведених розрахунків та аналізу впливу окремих технологічних етапів – обертання, осциляцій, тертя, завантаження та вивантаження – сформовано загальний підхід до визначення потужності приводу гравітаційного бетонозмішувача. Отримані залежності враховують фізичні параметри суміші та конструктивні особливості обладнання, що дозволяє підвищити точність розрахунків і забезпечити енергоефективну роботу установки.

Висновки. У ході проведеного дослідження було визначено основні фактори, що впливають на потужність, необхідну для ефективної роботи гравітаційного бетонозмішувача. Найбільше енергії витрачається на обертання змішувального барабана, що обумовлено потребою подолання інерції бетонної суміші та забезпечення її якісного перемішування. Потужність приводу при цьому значною мірою залежить від маси матеріалу, геометрії барабана та частоти обертання. Додаткові осциляційні рухи барабана покращують однорідність бетонної суміші, проте призводять до збільшення енерговитрат. Величина цих витрат визначається моментом інерції, амплітудою та частотою коливань, що потребує ретельного вибору параметрів приводу осциляційного механізму.

Важливу роль у формуванні загального енергоспоживання відіграють втрати на тертя, які виникають як між частинками бетонної суміші, так і між сумішшю та внутрішньою поверхнею барабана. Для їх врахування доцільно використовувати показники в'язкості суміші та швидкості її переміщення, що дозволяє більш точно оцінити необхідну потужність.

Крім того, процеси завантаження компонентів і вивантаження готової суміші також супроводжуються витратами енергії. Ці витрати залежать від маси матеріалів, висоти підйому та тривалості відповідних операцій. Їх необхідно враховувати під час проектування приводу, особливо для мобільних і автономних установок.

Список використаних джерел:

1. Nazarenko, I.I., Klymenko, M.O., Svidersky A.T., Pecherskyi V. (2017) Vyznachennia ratsionalnykh parametriv hravitatsiinykh betonozmishuvachiv [Determination of rational parameters of gravity concrete mixers]. *Hirnychi, budivelni, dorozhni ta melioratyvni mashyny* - Mining, construction, road and land reclamation machines, 90, 67-72[in Ukrainian].
2. Пат. 159089 Україна. МПК В28С 5/00, С04В 40/00 (2025.01). Спосіб змішування бетонних сумішей / Рудик Р.Ю., Вірченко В.В., Сальніков Р.Ю.; власник : Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка». – и 2024 04718; заявл. 01.10.2024; опубл. 24.04.2025, Бюл. № 17.
3. Arularasi, V., Pachappan, T., Avudaiappan, S., Raman, S. N., Guindos, P., Amran, M., Fediuk, R., & Vatin, N. I. (2022). Effects of Admixtures on Energy Consumption in the Process of Ready-Mixed Concrete Mixing. *Materials*, 15(12), 4143. <https://doi.org/10.3390/ma15124143>

ВИЗНАЧЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ ЗАЛЕЖНОСТІ АМПЛІТУДИ ВЕРТИКАЛЬНИХ ВІБРОПЕРЕМІЩЕНЬ ГАРМОНІЙНОЇ ВІБРОПЛОЩАДКИ НА ОСНОВІ ТРИФАКТОРНОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ

Олександр Орисенко, доцент, к.т.н., завідувач кафедри галузевого машинобудування та мехатроніки¹ (ORCID: 0000-0003-3103-0096),

Олександр Шека, аспірант¹ (ORCID: 0009-0005-1328-1416),

¹ Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», проспект Віталія Грицаєнка, 24, 36011, Україна

АНОТАЦІЯ. Під час проведення пробних досліджень було встановлено, що на амплітуду вібропереміщень точок рухомої рами віброплощадки найсуттєвіший вплив створюють такі параметри як: жорсткість вібраційних опор, відстань від центра коливань та маса рухомої частини. Ці чинники були обрані за незалежні фактори при проведенні досліджень за допомогою трифакторного експерименту. У результаті математико-статистичної обробки отриманих даних експерименту було одержано рівняння множинної регресії другого порядку. Розраховані значення дисперсії в нульовій точці, дисперсія адекватності та критерій Фішера підтверджують можливість використання отриманого рівняння для опису досліджуваного процесу. За результатами досліджень побудовано тривимірні поверхні відгуку у кодованій формі та при фіксованому значенні одного з факторів. Отримані результати дозволяють встановлювати оптимальне регулювання віброізоляційних опор зі змінною жорсткістю, що, в свою чергу, дозволяє підвищити якість ущільнення бетонних виробів.

Ключові слова: віброплощадка; вібраційна опора; амплітуда вібропереміщень; жорсткість; трифакторний експеримент.

Вступ. Вібраційні площадки з малою вантажопідйомністю, які застосовують для формування малогабаритних та дрібноштучних виробів, виконують переважно з об'ємним або поверхневим ущільненням бетонних сумішей. Як правило, такі віброплощадки належать до класу одномасових вібраційних машин з гармонійним резонансним режимом роботи [1]. Їхні рухомі частини встановлюються на пружні віброізоляційні опори і приводяться у коливальний рух від зовнішніх дебалансних віброзбуджувачів. Найпоширенішими є вібраційні площадки коливання яких спрямовані вертикально та мають циклічні частоти вимушених коливань в діапазоні 25 – 50 Гц, амплітуди вібропереміщень робочих органів яких знаходяться в межах 0,3 – 0,6 мм [2 – 4].

На амплітуду вимушених коливань робочого органу віброплощадки впливає сукупність незалежних чинників різної фізичної природи, серед яких: маса робочого органу, маса та реологічні характеристики бетонної суміші, жорсткість віброізоляційних опор, величина змущувальної сили, наявність та маса привантажувача, а також інші експлуатаційні параметри.

Оскільки амплітуда вимушених коливань робочого органу вібромашини залежить від жорсткості її пружної ланки – віброізоляційних опор, то, можна стверджувати, що і якість ущільнення бетонних сумішей залежить від пружної деформабельності цих елементів.

Аналіз літературних джерел. У наукових джерелах наведено приклади застосування багатофакторних експериментів для дослідження параметрів різних технологічних процесів. У роботі [5] представлено результати дослідження режимів ущільнення легкобетонних сумішей на ударно-вібраційній установці із застосуванням методу математичного планування експерименту. За допомогою реалізації трифакторного експерименту було встановлено вплив конструктивних параметрів установки на міцнісні характеристики відформованих бетонних виробів.

Зокрема, у роботі [6] досліджують оптимізацію параметрів роботи вібраційної машини шляхом застосування методів багатофакторного експерименту. Метою дослідження є визначення раціональних режимів роботи машини для забезпечення ефективного ущільнення бетонних сумішей.

Мета роботи. Висвітлення результатів дослідження оптимального робочого режиму пружної віброопори змінної жорсткості віброплощадки з гармонійним резонансним режимом роботи на основі вивчення впливу вхідних факторів на амплітуду вертикальних вібропереміщень точок поверхні її рухомої рами.

Виклад основного матеріалу. За результатами пробних дослідів встановлено, що на амплітуду вібропереміщень точок поверхні робочого органу віброплощини найбільший вплив створюють такі фактори як: жорсткість віброопор, відстань від центра коливань та маса рухомої частини установки. Зазначені параметри є керованими, піддаються вимірюванням та можуть бути зафіксовані на заданих рівнях. З метою встановлення функціональної залежності амплітуди вимушених коливань від обраних факторів, з урахуванням їх кількості, було прийнято рішення про проведення експериментальних досліджень із використанням трифакторного плану експерименту [7].

При проведенні дослідів, згідно до прийнятого плану, фактори варіювались на трьох рівнях – основному, верхньому і нижньому. Отримані в результаті проведення дослідів дані зведено до таблиці 1.

Таблиця 1

Фактори, їх рівні та інтервали варіювання						
Рівні досліджуваних факторів	Досліджувані фактори					
	Жорсткість віброізоляційної опори c_{iz} , Н/м		Відстань від центра l , м		Маса рухомої частини m , кг	
	X_1	x_1	X_2	x_2	X_3	x_3
Верхній рівень $X_{i\max}$	121833,69	+1	0	+1	130	+1
Нульовий рівень X_{oi}	243667,38	0	0,25375	0	110	0
Нижній рівень $X_{i\min}$	365501,07	-1	0,5075	-1	90	-1
Інтервали варіювання ΔX_i	-121833,69	1	-0,25375	1	20	1

У результаті математико-статистичної обробки даних експерименту одержано рівняння множинної регресії другого порядку:

$$\hat{y}_i = 0,22084 + 0,022x_1 + 0,0401x_2 - 0,0019x_3 + 0,04763x_1^2 - 0,02387x_2^2 - 0,00867x_3^2 - 0,00088x_1x_2 + 0,01940x_1x_3 + 0,01363x_2x_3 \quad (1)$$

де $\hat{y}_i$ – амплітуда вимушених коливань, яка оптимізується;

x_1, x_2, x_3 – вхідні фактори у кодованій формі.

Таблиця 2

Значення розрахованих критеріїв до отриманої регресійної моделі		
Критерії оцінки	Позначення критерію	Функція відгуку $\hat{y}_i$
Дисперсія в нульовій точці	S_0^2	0,000024333
Дисперсія адекватності	S_{ad}^2	0,00024328
Критерій Фішера	F_p	9,998
Критичне значення критерію Фішера для 5% рівня значимості	$[F_p]$	19,30

Для наочності результату дослідження побудовано тривимірні поверхні відгуку отриманої регресійної моделі у кодованій формі при фіксованому значенні одного з факторів на основному рівні і зміні двох інших факторів. Для побудови поверхонь використано інженерну обчислювальну систему PTC Mathcad Prime 10.

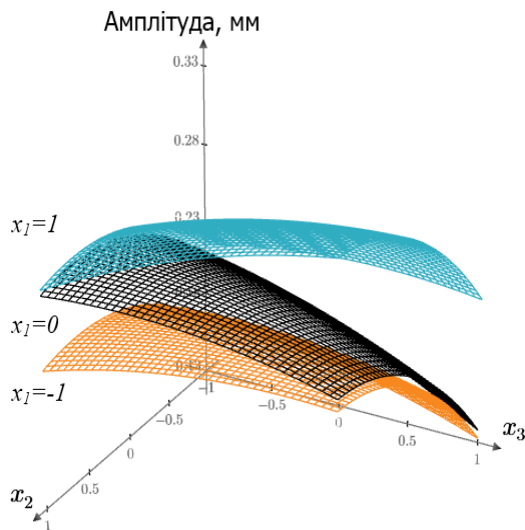


Рис.1. Графік залежності амплітуди вертикальних коливань від жорсткості опор та відстані від центра коливань при фіксованій масі рухомої частини

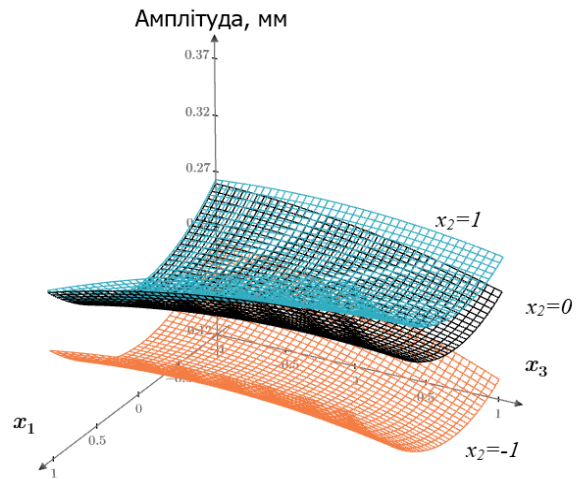


Рис.2. Графік залежності амплітуди вертикальних коливань від жорсткості опор та маси рухомої частини при фіксованій відстані від центра коливань

Висновки. При аналізі отриманих поверхонь, що показані на рисунку 1, можна зробити висновок, що при мінімальному значенні жорсткості опори $x_1 = +1$ амплітуда вібропереміщень є найбільшою, і зі збільшенням маси (фактор x_3) та відстані від центра коливань (фактор x_1) в межах зазначених діапазонів майже не змінюється. При фіксованому значенні фактора $x_1 = -1$ амплітуда вібропереміщень швидко спадає при збільшенні маси та повільніше спадає при збільшенні відстані від коливного центра. При фіксованому значенні фактора x_1 на основному рівні зміни амплітуди вібропереміщень є аналогічними до попереднього випадку особливо при збільшенні маси рухомої частини віброплощини.

Розглянувши поверхню, що відповідає залежності при відстані $x_2 = -1$, можна простежити, що при зменшенні жорсткості віброопори (фактор x_1) амплітуда вібропереміщень збільшується до максимального значення. Маса також впливає на амплітуду вібропереміщень: із зменшення маси рухомої частини амплітуда коливань збільшується. Збільшення маси (фактор x_1) призводить до зменшення амплітуди. Дві тривимірні поверхні, які розташовані вище, показують залежність амплітуди від тих самих факторів, але відповідно для відстаней точок від коливного центра $x_2 = 0$ та $x_2 = +1$. Характер прив'язки цих поверхонь майже повністю повторює форму поверхні при $x_2 = -1$. Ці висновки відповідають законові Гука, згідно з яким зі збільшенням жорсткості пружної віброопори амплітуда вібропереміщень рухомої частини зменшується, і навпаки. Відповідно змінюється і амплітуда вібропереміщень точок поверхні віброплити.

Список використаних джерел:

1. Nazarenko, I. I. (2007). *Prykladni zadachi teorii vibratsiinykh system* (2-e vydannia) [Applied problems of the theory of vibration systems (2nd edition)]. Kyiv: KNUCA. [in Ukrainian].
2. Lanets, O. S. (2018). *Osnovy rozrakhunku ta konstruiuvannia vibratsiinykh mashyn: Knyha 1. Teoriia ta praktyka stvorennia vibratsiinykh mashyn z harmoniinyim rukhom robochoho orhana* [Basics of calculation and design of vibration machines: Book 1. Theory and practice of creating vibration machines with harmonious movement of the working organ]. NU «Lvivska politekhnika» Publ ISBN 978-966-941-217-1.
3. Nazarenko, I. I., Dedov, O. P., Diachenko, O. S., & Svidersky, A. T. (2017). *Ogljad i analiz vibracijnogo obladnannja dlja formuvannja ploskih плит zalizobetonnih virobiv. Girnychi, budivel'ni, dorozhni ta melioratyvni mashyny* [Review and analysis of vibration equipment for the formation of flat reinforced concrete products. Mining, construction, road and melioration machines].

of vibrating equipment for the formation of flat reinforced concrete products], Iss. 90, 49-58. [in Ukrainian]. <https://doi:10.32347/gbdmm2019.93.0301>

4. Dudar, I. N., Zahreba, V. P., & Kovalenko, A. O. (2012). *Tekhnolohiia rozdilnoho vibroimpulsnoho formuvannia kamenebetonnykh vyrobiv: Monohrafiia* [Technology of separate vibro-pulse moulding of stone concrete products: Monograph]. Vinnytsia: VNTU ISBN 978-966-641-493-2. [in Ukrainian].
5. Tsurkan, O. V., Horbatiuk, R. M., & Prysiazhniuk, D. V. (2020). *Planuvannia bahatofaktornoho eksperymentu dlia vyznachennia ratsionalnykh parametriv roboty vibratsiinoi mashyny* [Planning of a multifactor experiment to determine the rational parameters of a vibration machine]. *Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh – Vibrations in Engineering and Technology*, (2(97)), 5–14. [in Ukrainian].
6. Nesterenko, M. M. (2013). *Doslidzhennia rezhymiv ushchilnennia lehkobetonnykh sumishei na udarno-vibratsiinii ustanovtsi za dopomohoiu metodu matematychnoho planuvannia eksperymentu* [Investigation of compaction modes of lightweight concrete mixtures on a shock-vibration installation using the method of mathematical planning of the experiment]. *Tekhnika budivnytstva*, (31), 19–24. [in Ukrainian].
7. Nechaiev, V. P., et al. (2005). *Teoriia planuvannia eksperymentu: Navchalnyi posibnyk dlia studentiv vyshchykh navchalnykh zakladiv* [Theory of experiment planning: A textbook for students of higher educational institutions]. Kyiv: Kondor. [in Ukrainian].

КОНЦЕПЦІЯ МАЛОГАБАРИТНОГО ВИЛОЧНОГО АВТОНОМНОГО НАВАНТАЖУВАЧА

Микола Кочеток, студент¹,

Дмитро Мішук, к.т.н., доцент¹ (ORCID: 0000-0002-8263-9400),

¹Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних сил 31, 03037, Україна

АНОТАЦІЯ. Малогабаритні виловні навантажувачі мають великі перспективи їхнього застосування при будівництві об'єктів в стиснених умовах та густозаселених агломераціях. Також такі технічні системи дозволяють значно підвищити ефективність застосування вантажних автомобілів. В даній роботі показано концепцію конструкції малогабаритного навантажувача, який може бути застосований, як автономна машина для розвантажувально-завантажувальних робіт. Навантажувач містить ходову раму з двигуном потужністю 16,2 кВт та підйомник з гідравлічним приводом і ланцюговим поліспастом. Висота підймання вил підйомником досягає 2,4 м.

Ключові слова: автовантажувач; малогабаритний навантажувач; автономна платформа.

Сучасні потокові технологічні і автоматизовані лінії, міжцеховий і цеховий транспорт, вантажно-розвантажувальні операції вимагають застосування різноманітних типів підйомно-транспортних машин і механізмів, що забезпечують безперервність і ритмічність виробничих процесів. Саме тому підйомально-транспортне обладнання в даний час відіграє важливу роль в механізації виробничих процесів [1].

Фронтальні універсальні вилкові навантажувачі застосовують на вантажно-розвантажувальних і будівельно-монтажних роботах, для транспортування на невеликі відстані та штабелювання штучних і тарних вантажів на відкритих майданчиках і дорогах з твердим покриттям, а також в складському господарстві. Зазвичай навантажувачі обладнуються комплектом змінних робочих органів:

- вилами та спеціальними захоплювачами для навантаження і розвантаження, переміщення та складування штучних, тарних і довгомірних вантажів (труб, контейнерів, будівельних блоків та ін.);
- стрілами з грейферними ковшами для насипних і кускових вантажів;
- вантажними стрілами (блоковими та безблоковими) для підймання вантажів на невелику висоту та монтажу різних будівельних конструкцій і обладнання.

Створення мобільних малогабаритних та автономних систем є перспективним напрямком розробки вилкових навантажувачів [1, 2]. На рис. 1. показано конструкцію розробленої концепції малогабаритного мобільного навантажувача, яка складається з основної ходової шарнірно-зламної рами 1, підйомника 2, двигуна 3 та виконавчих систем гідроприводу 4.

Основним робочим органом даного навантажувача є робочий орган у вигляді двох вигнутих під прямим кутом сталевих брусів. Даний виловний робочий орган встановлюється шарнірно на підйомну каретку підйомника, яка складається з основної рами, що шарнірно прикріплена до

ходової рами машини. В середині основної рами на роликах переміщається висувна рама, вздовж напрямних якої на власних роликах переміщається вантажна каретка із закріпленим до неї робочим органом. Висувна рама переміщається гідроциліндром, а підйомна каретка – двома вантажними ланцюгами, які огинають зірочки на висувній рамі і кріпляться на основній рамі утворюючи двократний поліспаст для виграшу в швидкості. При переміщенні висувної рами гідроциліндром вгору каретка і вантаж піднімаються зі швидкістю вдвічі більшою швидкості руху штока гідроциліндра. Основна рама підйомника може відхилятися від вертикалі двома гідроциліндрами вперед, а також і назад та укладатися в транспортне положення. Шарнірна рама і колісна ходова база для даного навантажувача є актуальною розробкою в багатьох подібних рішеннях, де необхідна велика маневреність машини [3].

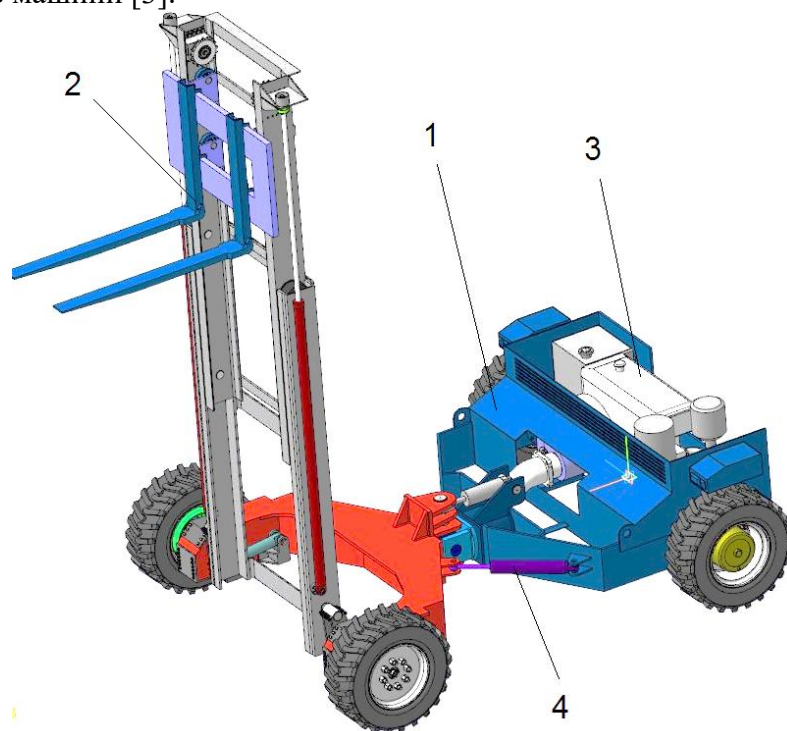


Рис. 1. Загальний вид концепції малогабаритного навантажувача

Механізм нахилу підйомника є одним із найбільш складних в реалізації, так як при значних його навантаженнях повинен мати при цьому мінімальні розміри. Найбільше зусилля на штоку циліндрів нахилу підйомника виникає при зворотному повороті підйомника з вантажем, який нахилений вперед на граничний кут α .

Для визначення навантажень в даному вузлу розглядуваної системи прийнято такі припущення: центр ваги вантажу по висоті знаходиться на середині роликів підйомної каретки, а по горизонталі – на відстані l (рис. 2) від передньої спинки вил; центр ваги каретки з вилами знаходиться на середині товщини спинки вил; центр ваги рухомих рам підйомника разом з циліндром підйому знаходиться посередині таких рам. За рис. 2 складається рівняння рівноваги моментів відносно точки повороту підйомника та з урахування розподілення навантаження на два циліндра повороту визначається зусилля на штоку гідроциліндра нахилу підйомника, H :

Зусилля на штоку гідроциліндра нахилу підйомника, H :

$$S'_u = \frac{1}{2(\cos \phi H_4 - \sin \phi b_2)} (Q_H \sin \alpha H_b + G_k \sin \alpha H_b + G_e \sin \alpha H_2 + \\ + G_n \sin \alpha H_3 + Q \cos \alpha (a_2 + b') + G_k \cos \alpha (a_2 + b'_1) + (G_e + G_n) \cos \alpha a_2), \quad (1)$$

де G_n – вага зовнішньої напрямної рами; H_b , H_2 , H_3 , H_4 – висоти від осі повороту підйомника відповідно до центра ваги вантажу і підйомної каретки з вилами, висувної рами, зовнішньої рами та до осі кріплення штока циліндрів нахилу; b' – відстань центра ваги вантажу від осі рами ($b' = b + l_1$).

); b'_1 – відстань центра ваги підйомної каретки від осі рами; b_2 – відстань між шарнірами осі повороту підйомника і штоком циліндра нахилу на зовнішній рамі; a_2 – відстань по горизонталі від середини рами до центру повороту підйомника; φ – кут нахилу циліндра, який з урахуванням кута нахилу підйомника вперед на кут $\alpha = 10^\circ$ приймається $\varphi = 0$.

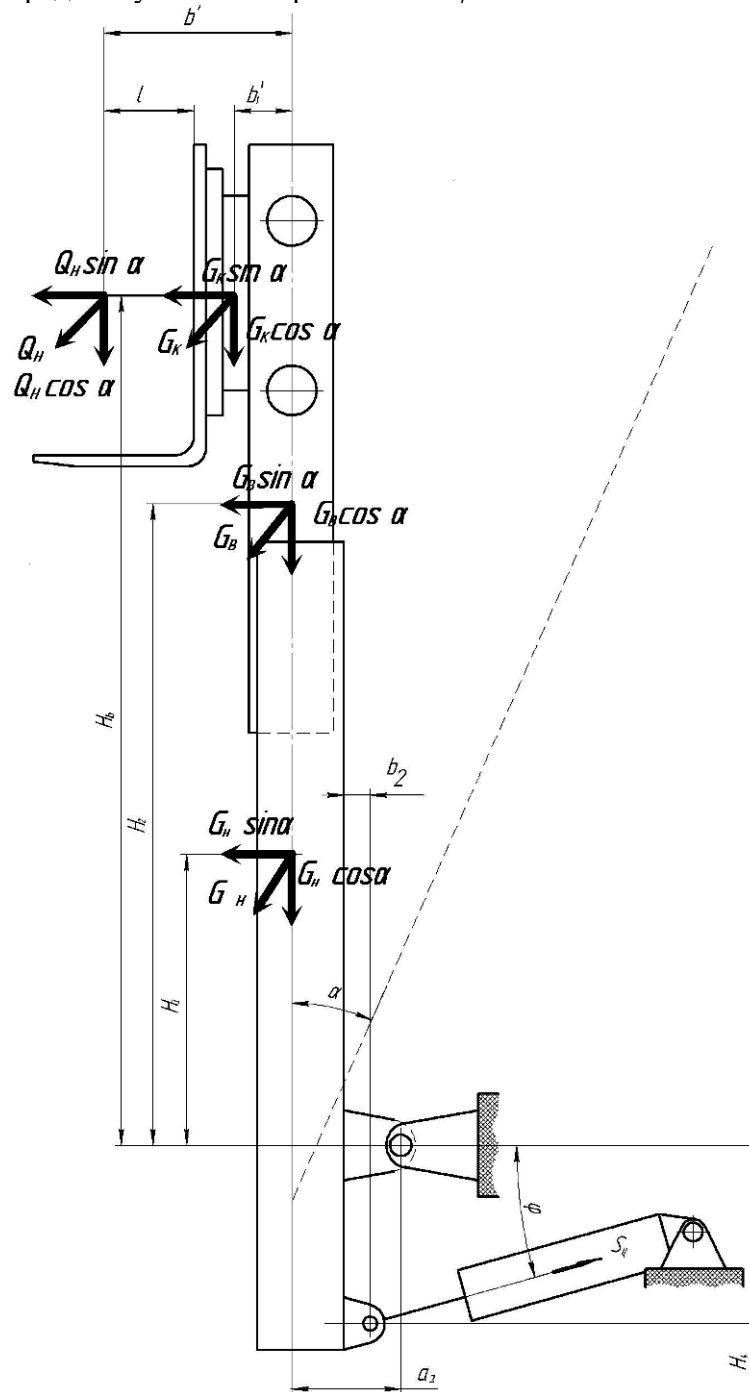


Рис. 2. Схема дії сил в механізмі нахилу вантажопідйомником

Список використаних джерел:

1. Livinskii O.M., Kyrok O.I., Pelevin L.Ye., Malich V. O., Kovalenko V.M., Babichenko V.Ya. (2016). Lifting, transport and loading and unloading machines. Book, Kyiv, Lusiya Publ., 677.
2. Mishchuk D. O., Mishchuk E. O., Balaka M. M. (2021). Assessment of the possibilities of energy storage by the drive of a forklift. *Bulletin of the Kharkiv National Automobile and Road University*, Issue 95. 171–177. DOI: <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2021.95.0.171>.
3. Korobenko, Y., Mishchuk, D., & Balaka, M. (2024). Overview of suspension systems for mobile wheeled robots. *Girnich, budivelni, Dorozhni Ta meliorativni Mashini*, (104), 28–37.

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ПОДАЧІ БУДІВЕЛЬНИХ СУМІШЕЙ У ВДОСКОНАЛЕНОМУ ШПАКЛЮВАЛЬНОМУ АГРЕГАТІ З ГІДРОПРИВОДОМ

Роман Сальніков, аспірант¹ (ORCID: 0009-0001-0408-4358),
Віктор Вірченко, доцент, к.т.н., доцент¹ (ORCID: 0000-0002-5346-9545),
Ростислав Рудик, аспірант¹ (ORCID: 0000-0001-8386-977X),
Юрій Кузуб, аспірант¹ (ORCID: 0009-0006-8463-3914),

¹ Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», проспект Віталія Грицаєнка 24, 36011, Україна

АНОТАЦІЯ. У роботі представлено результати математичного моделювання процесу подачі будівельних сумішей у вдосконаленому шпаклювальному агрегаті, створеному на основі моделі СО-150. Основною технічною інновацією є впровадження гідравлічного приводу для шнекового живильника та гвинтового насоса, що дозволяє точно регулювати параметри подачі відповідно до фізико-механічних властивостей суміші. Розроблена математична модель враховує основні елементи системи: гідропривід, трубопровід, втрати тиску, параметри насосів. Застосування цієї моделі дає змогу обґрунтовано підбирати характеристики обладнання, забезпечуючи стабільність та ефективність роботи. Запропоноване рішення спрямоване на підвищення продуктивності, якості та надійності механізованих оздоблювальних процесів у сучасному будівництві.

Ключові слова: шпаклювальний агрегат; будівельна суміш; гідравлічний привід; перекачування; шнековий живильник; гвинтовий насос.

Вступ. У сучасних умовах стрімкого розвитку будівельної галузі особливого значення набувають технології, що забезпечують високу продуктивність, точність та якість виконання оздоблювальних робіт. Механізація процесів нанесення будівельних сумішей – таких як шпаклівки, розчини, ґрунтовки та фарби – є ключовим чинником підвищення ефективності будівництва, особливо в умовах великих обсягів робіт і обмежених термінів виконання. Водночас зростає потреба в удосконаленні існуючого обладнання з метою адаптації до нових вимог щодо економічності, надійності, екологічності та зручності експлуатації.

Одним із важливих напрямів модернізації будівельного обладнання є вдосконалення систем подачі робочих сумішей. Від стабільності, рівномірності та точності подачі безпосередньо залежать якість нанесення матеріалу, рівномірність покриття та витрата суміші. Існуючі моделі шпаклювальних агрегатів, зокрема агрегат СО-150, мають низку конструктивних обмежень, які ускладнюють їхню ефективну експлуатацію в умовах роботи з сумішами різної в'язкості та гранулометричного складу. Зокрема, електропривід шнекового живильника часто не забезпечує достатнього крутного моменту для стабільної подачі густих або крупнозернистих сумішей. Це призводить до зниження якості нанесення, підвищеного зношування вузлів і втрат часу на технічне обслуговування.

У зв'язку з цим актуальним стає впровадження нових технічних рішень, які дозволяють забезпечити адаптивність, гнучкість та енергоефективність обладнання. Одним із перспективних напрямів є заміна електроприводу гідравлічною системою. Гідропривід надає можливість реалізувати плавне регулювання частоти обертання виконавчих механізмів, точно дозувати подачу матеріалу залежно від властивостей суміші, а також підвищити надійність і довговічність агрегатів.

Крім того, гідросистеми мають високу перевантажувальну здатність і стійкість до коливань навантаження, що критично важливо для стабільного функціонування під час подачі неоднорідних сумішей.

Для обґрунтування доцільності модернізації шпаклювального агрегату за рахунок впровадження гідроприводу необхідно здійснити глибокий аналіз процесу подачі суміші. З цією метою у даній роботі запропоновано математичну модель, яка враховує основні компоненти системи — шнековий живильник, гвинтовий насос, параметри гідроприводу, геометричні та фізико-механічні характеристики сумішей. Розроблена модель дозволяє виконувати як аналітичні, так і чисельні розрахунки, необхідні для оптимізації конструкції та режимів роботи агрегату.

Представлене дослідження має прикладне значення та може бути використане при створенні нових або модернізації наявних зразків будівельного обладнання з урахуванням сучасних вимог до ефективності та якості механізованих оздоблювальних робіт..

Аналіз літературних джерел. У дослідженні [1] розглянуто розробку устаткування для малоімпульсної подачі будівельних сумішей при мокрому торкретуванні. Автор запропонував використання однопоршневого компенсатора та кільцевого поршневого блока для зменшення імпульсності подачі суміші, що дозволяє покращити якість нанесення та зменшити енерговитрати. Ці підходи можуть бути адаптовані для вдосконалення шпаклювальних агрегатів з гідроприводом. Авторами роботи [2] розглянуто принципи дії, конструктивні особливості та методи регулювання режимів роботи спеціальних гідромашин, включаючи гідроприводи та гвинтові насоси. Ці знання є фундаментальними для розробки математичних моделей систем подачі будівельних сумішей, що враховують взаємодію між механічними та гідравлічними компонентами. У роботі [3], присвяченій науковим основам створення обладнання для механічної активації та пресування будівельних сумішей, розглянуто системний підхід до розробки обладнання, що включає в себе аналіз процесів механічної активації та пресування. Ці дослідження можуть бути корисними для розуміння впливу властивостей сумішей на ефективність їх подачі та нанесення.

Мета роботи. Метою роботи є наукове обґрунтування та розробка математичної моделі процесу подачі будівельних сумішей у вдосконаленому шпаклювальному агрегаті з гідравлічним приводом, що базується на конструкції агрегату типу СО-150. З урахуванням сучасних вимог до якості оздоблювальних робіт, енергоефективності та технологічної гнучкості, робота спрямована на виявлення закономірностей взаємодії між основними елементами системи подачі суміші — шнековим живильником, гвинтовим насосом, гідроприводом та трубопроводом, — з метою забезпечення стабільного, регульованого та безперервного транспортування сумішей різної щільності та в'язкості.

Виклад основного матеріалу. У сучасних умовах інтенсифікації будівельних процесів зростає попит на механізовані засоби, здатні забезпечити ефективне, рівномірне та якісне нанесення оздоблювальних матеріалів. Серед них важливе місце посідають агрегати для подачі та нанесення шпаклівок, фарб, ґрунтовок, клеїв і розчинів, які використовуються під час внутрішнього та зовнішнього оздоблення. Водночас традиційні моделі обладнання часто не відповідають зростаючим вимогам до точності дозування, енергоефективності, надійності та адаптивності до різних типів сумішей.

Одним із найпоширеніших агрегатів, які використовуються у будівельній практиці, є шпаклювальний пристрій СО-150. Попри свою функціональність і простоту конструкції, він має обмеження, які негативно впливають на якість робіт. Зокрема, електропривід шнекового живильника часто не забезпечує достатнього крутного моменту для стабільної подачі густих, високов'язких або неоднорідних сумішей. Це призводить до нерівномірної подачі, нестабільної роботи насоса, підсмоктування повітря в систему та, як наслідок, до зниження якості нанесення матеріалу на поверхню.

З огляду на ці недоліки, доцільним є вдосконалення конструкції агрегату шляхом впровадження гідроприводу. Гідравлічні системи дозволяють здійснювати плавне та точне регулювання частоти обертання виконавчих механізмів, мають високу перевантажувальну здатність та забезпечують стабільність роботи навіть за умов змінного навантаження або варіативних

властивостей суміші. Це робить їх особливо ефективними в умовах реального будівництва, де матеріали можуть мати різну густину, зернистість і динамічні характеристики.

Для оцінювання ефективності запропонованого технічного рішення в роботі представлено математичну модель процесу подачі будівельної суміші у вдосконаленому агрегаті. У межах цієї моделі враховано основні компоненти системи: шнековий живильник, гвинтовий насос (типу «Мойне»), гідропривід та трубопровід. Модель включає рівняння для визначення об'ємної продуктивності шнека з урахуванням його діаметра, кроку спіралі, частоти обертання та коефіцієнта заповнення. Також враховується взаємозв'язок між витратою гідравлічної рідини, робочим об'ємом гідромотора та частотою обертання шнека.

Окремим компонентом моделі є рівняння для гвинтового насоса, який забезпечує лінійну залежність подачі матеріалу від частоти обертання. Для стабільної роботи системи подачі критично важливо, щоб продуктивність шнека не була меншою за продуктивність насоса, що дозволяє уникнути розриву потоку та повітряних пробок. Крім того, модель враховує гідравлічні втрати в трубопроводі згідно з формулою Дарсі-Вейсбаха, що дозволяє оцінити вплив довжини, діаметра та швидкості потоку на загальну ефективність системи.

Розроблена система рівнянь дає змогу здійснювати як аналітичні, так і чисельні розрахунки, необхідні для вибору оптимальних параметрів елементів гідросистеми. Це дає змогу вдосконалення конструкції агрегату, автоматизації процесу регулювання подачі, підвищення точності та зниження енерговитрат. У перспективі запропоноване технічне рішення може бути інтегроване в інтелектуальні системи керування будівельним обладнанням.

Одним із ключових факторів підвищення ефективності механізованого нанесення будівельних сумішей є оптимізація роботи системи подачі матеріалу.

У вдосконаленому шпаклювальному агрегаті, який базується на моделі СО-150, впроваджено гідравлічний привід для шнекового живильника та гвинтового насоса (Рис. 1). Це забезпечує можливість точного регулювання параметрів подачі в залежності від фізико-механічних властивостей суміші.

З метою аналітичного обґрунтування роботи агрегату розроблено математичну модель, що описує процес транспортування суміші.

Шнековий живильник виконує функцію транспортування суміші з бункера до всмоктувальної зони гвинтового насоса. Його продуктивність визначається за формулою:

$$Q_{ш} = \frac{\pi D_{ш}^2}{4} \cdot s \cdot n_{ш} \cdot \eta_{зап}, \quad (1)$$

де $Q_{ш}$ - об'ємна подача шнека, м³/с; $D_{ш}$ - діаметр шнека, м; s - крок спіралі шнека, м; $n_{ш}$ - частота обертання шнека, об/с; $\eta_{зап}$ - коефіцієнт заповнення (0,5–0,8 залежно від в'язкості).

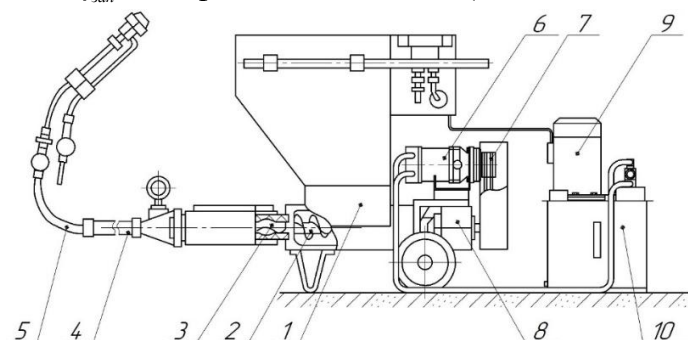


Рис.1. Шпаклювальний агрегат СО-150 з гідравлічним приводом

1 - бункер, 2 - шнековий живильник, 3 - гвинтовий насос, 4 - з'єднувальний патрубок, 5 - гумовий шланг, 6 - гідромотор, 7 - шків, 8 - редуктор, 9 - маслостанція, 10 - гідравлічний бак

Ця залежність дозволяє оцінити, який обсяг матеріалу переміщується кожного оберту шнека з урахуванням часткового заповнення транспортувального каналу.

У новій конструкції частота обертання шнека регулюється за допомогою гідроприводу. Її можна визначити рівнянням

$$n_{ш} = \frac{q \cdot Q_z}{2\pi \cdot V_{зм}}, \quad (2)$$

де Q_z - витрата гідравлічної рідини, м³/с; $V_{зм}$ - робочий об'єм гідромотора, м³/об; q - передавальне число редуктора та шківів.

Це рівняння описує пряму залежність між витратою рідини в гідросистемі та швидкістю обертання виконавчого механізму.

Гвинтовий насос, або насос типу "Мойне", характеризується лінійною залежністю продуктивності від частоти обертання

$$Q_n = C_{zv} \cdot n_n, \quad (3)$$

де Q_n - подача насоса, м³/с; C_{zv} - конструктивний об'ємний коефіцієнт насоса, м³/об; n_n - частота обертання ротора насоса, об/с.

Для забезпечення стабільності подачі матеріалу необхідно, щоб об'ємна подача шнека була не меншою за подачу насоса

$$Q_{ш} \geq Q_n \quad (4)$$

Це дозволяє уникнути зривів потоку або підсмоктування повітря у всмоктувальну зону.

Втрати тиску при транспортуванні суміші через трубопровід можна оцінити за формулою Дарсі-Вейсбаха:

$$\Delta p = \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2} \quad (5)$$

де Δp - втрати тиску, Па; λ - коефіцієнт тертя; L - довжина трубопроводу, м; D - внутрішній діаметр трубопроводу, м; ρ - густина суміші, кг/м³; v - швидкість руху суміші, м/с.

Таким чином, модель подачі в агрегаті формується як система рівнянь

$$\begin{cases} Q_{ш} = \frac{\pi D_{ш}^2}{4} \cdot s \cdot \frac{q Q_z}{2\pi V_{зм}} \cdot \eta_{зан} \\ Q_n = C_{zv} \cdot n_n \\ Q_{ш} \geq Q_n \\ \Delta p = \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{\rho v^2}{2} \end{cases} \quad (6)$$

Висновки. У ході дослідження було розроблено та представлено математичну модель процесу подачі будівельних сумішей у вдосконаленому шпаклювальному агрегаті з гідроприводом. Аналіз існуючого обладнання, зокрема агрегату СО-150, виявив низку конструктивних недоліків, що обмежують ефективність його використання при роботі з густими або неоднорідними сумішами. Основним недоліком виявлено недостатню потужність електроприводу шнекового живильника, що призводить до нестабільної подачі матеріалу, зниження якості нанесення та зростання експлуатаційних втрат.

Запропоноване технічне рішення передбачає заміну електроприводу гідравлічною системою, яка дозволяє плавно регулювати швидкість обертання шнека та ротора гвинтового насоса, що суттєво підвищує адаптивність обладнання до змінних умов експлуатації та фізико-механічних властивостей суміші. Удосконалений агрегат забезпечує стабільну та рівномірну подачу матеріалу, зменшує ймовірність розриву потоку та сприяє підвищенню якості оздоблювальних робіт.

Розроблена математична модель включає систему рівнянь, які описують залежності між геометричними та функціональними параметрами системи подачі: діаметр і крок спіралі шнека, частота його обертання, об'єм гідромотора, витрата гідравлічної рідини, втрати тиску в трубопроводі, конструктивні параметри гвинтового насоса. Така модель дозволяє проводити як аналітичний, так і чисельний аналіз ефективності системи при зміні окремих параметрів, що особливо важливо на етапі проектування та оптимізації.

Практичне значення розробленого підходу полягає в можливості його застосування для створення нового покоління шпаклювальних агрегатів, здатних ефективно працювати в умовах сучасного будівництва. Отримані результати також можуть бути використані в навчальному процесі, при викладанні дисциплін з механізації будівельних процесів, гідроприводів, моделювання технічних систем.

Таким чином, робота не лише підтверджує доцільність впровадження гідроприводу у шпаклювальні агрегати, але й надає інструменти для подальшого вдосконалення конструкцій на основі системного математичного аналізу. Перспективи подальших досліджень включають експериментальну перевірку моделі, розробку систем автоматизованого керування подачею суміші, а також адаптацію моделі до інших типів будівельного обладнання, що використовує подібні механізми транспортування матеріалів.

Список використаних джерел:

1. D. Yan, Q. Tang, A. Kovacevic et al. (2018). Rotor Profile Design and Numerical Analysis of 2-3 Type Multiphase Twin-Screw Pumps. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 232(2), 186–202. <http://dx.doi.org/10.1177/0954408917691798>
2. Wang J., Cui F., Wei S. et al. (2017) Study on a novel screw rotor with variable cross-section profiles for twin-screw vacuum pumps. *Vacuum*, vol. 145, pp. 299–307, doi: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2017.09.006>
3. Salnikov, R.Yu., Virchenko, V.V., Rudyk R.Yu (2024) Zastosuvannia zasobiv kompiuternykh tekhnolohii ta 3D modeliuvannia pry rozroblenni vdoskonalenoho vuzla dlia perekachuvannia shtukaturnykh ta budivelnykh rozchyniv [Application of computer technology and 3D modeling tools in the development of an improved unit for pumping plaster and mortars] *Hirnychi, budivelni, dorozhni ta melioratyvni mashyny - Mining, construction, road and land reclamation machines*, 15-18.
4. Salnikov R., Rudyk, R. (2023) Improving the efficiency of the screw unit of plastering plants. *ACADEMIC JOURNAL Industrial Machine Building, Civil Engineering*, T. 1, (60), 31–37. <https://doi.org/10.26906/znp.2023.59.0000>

ANALYSIS AND ASSESSMENT OF THE PRODUCTIVITY OF JAW CRUSHER DEPENDING ON THE FREQUENCY OF REVOLUTION OF THE WORKING BODIES

Yevhen Mishchuk, Associate Professor, PhD¹ (ORCID: 0000-0002-7850-0975),

¹ Kyiv National University of Civil Engineering and Architecture, Air Force Avenue 31, 03037, Ukraine

ABSTRACT. The development of the construction industry today is not possible without the participation of energy-efficient machines and equipment. A key role among such machines is occupied by crushing machines, which include jaw, cone, roller, vibrating and impact crushers. The main determining parameters of the energy efficiency of a crushing machine, which at the same time complement each other, are power and productivity. The impact of productivity on energy costs is obvious. There are various approaches to determining productivity, but today there is no systematic analysis of such methods and approaches that could indicate similar and different patterns of the processes of material destruction by the working bodies of crushing machines. The paper considers methods for determining the productivity of jaw crushers. The frequency of oscillations of the working bodies of crushing machines has a significant impact on productivity. Graphs of the dependence of productivity on the frequency of oscillations of the working bodies of crushing machines are presented, which allow a better understanding of the characteristics of productivity changes. A general equation is proposed for determining the productivity of a jaw crusher, which should include functional dependencies on the relevant parameters. The conclusions identify the shortcomings of existing methods for determining productivity and suggest directions for further research.

Keywords: crusher; energy efficiency; productivity; oscillation frequency; degree of crushing.

Introduction. The development of the construction industry today is not possible without the participation of energy-efficient machines and equipment. A key role among such machines is occupied by crushing machines, which include jaw, cone, roller, vibrating and impact crushers [10]. The main determining parameters of the energy efficiency of a crushing machine, which at the same time complement each other, are power and productivity. The issue of energy consumption lies in the field of determining the minimum energy required for the destruction of material in the crushing chamber [1],[2]. In addition, in research and creation of methods for applying load in order to minimize energy consumption. One of

such areas is the selective disintegration method [3],[4]. The impact of productivity on energy consumption is obvious. There are different approaches to determining productivity, but today there is no systematic analysis of such methods and approaches, which could indicate similar and different patterns of the processes of destruction of materials by the working bodies of crushing machines.

Review of Recent Studies and Publications. In work [5], [9] in parallel with the study of energy consumption in crushing machines, the productivity is determined as a mass balance depending on the inlet and outlet. That is, the influence of the material feed parameters and individual crusher parameters on energy efficiency is established. The work defines three types of crushing machines: jaw crusher, vertical shaft impact crusher and high-pressure roller crusher. The influence of the crusher outlet and material feed rate on productivity is considered in more detail. An analysis of the influence of the crushing process parameters on productivity is performed in work [6], however, this work does not currently take into account the design features of modern crushing equipment. However, the work does not determine the functional influence of machine, process and working environment parameters on productivity.

Purpose of work. Analysis of approaches and methods for determining the productivity of cone and jaw crushers. Assessment of the influence of the frequency of rotation of the crusher working elements on their productivity.

Materials and methods. The main materials for the analysis are scientific, technical and reference literature on domestic and foreign samples of modern crushing equipment. The main methods used in the work are the use of mathematical analysis in calculating the parameters of the mechanical mode of crushing machines. To perform calculations and plot graphs, software was used Wolfram Mathematica.

Results. Let us consider methods for determining the productivity of jaw crushers. In general, the productivity of a jaw crusher can be written as a dependence on a number of the following parameters:

$$\Pi = (n, L, S, d, \alpha, \mu, i), \quad (1)$$

where n – frequency of oscillation of the moving cheek, oscillations/time period; L – length of the crushing chamber of the crusher, m; S – movement of the movable cheek, m; d – average size of the crushed product, m; α – angle of capture; μ – the coefficient of loosening of the mass of material that fell out of the crusher outlet slot; i – degree of crushing.

There are several different approaches to determining the productivity of a jaw crusher. The classic approach states that the productivity of a jaw crusher is determined by the condition that for each jaw movement or one rotation of the main shaft, a finished product in the form of a prism of trapezoidal cross-section is discharged from the crushing chamber. In the source [7], in the case of n complete swings of the moving jaw in 1 s, the crusher productivity is determined as follows, m^3/sec :

$$\Pi_1 = \frac{3600nLSd\mu}{\text{tg}\alpha}, \quad (2)$$

Here it is necessary to mention one more characteristic of the operation of the jaw crusher. It turns out that at a low frequency of oscillation of the crushing jaw, the productivity is directly proportional to the frequency of oscillation up to some optimal value, on the basis of which the formula for determining the productivity has the form [8]:

$$\Pi_H = 3600S n_c L (2L_{\min} + S) \left(\frac{i}{i-1} \right), \quad (3)$$

where $S = L_{\max} - L_{\min}$ – difference between the maximum and minimum outlet clearance values; $i = B/e$ – the reduction ratio of the material size after it passes through the crushing chamber.

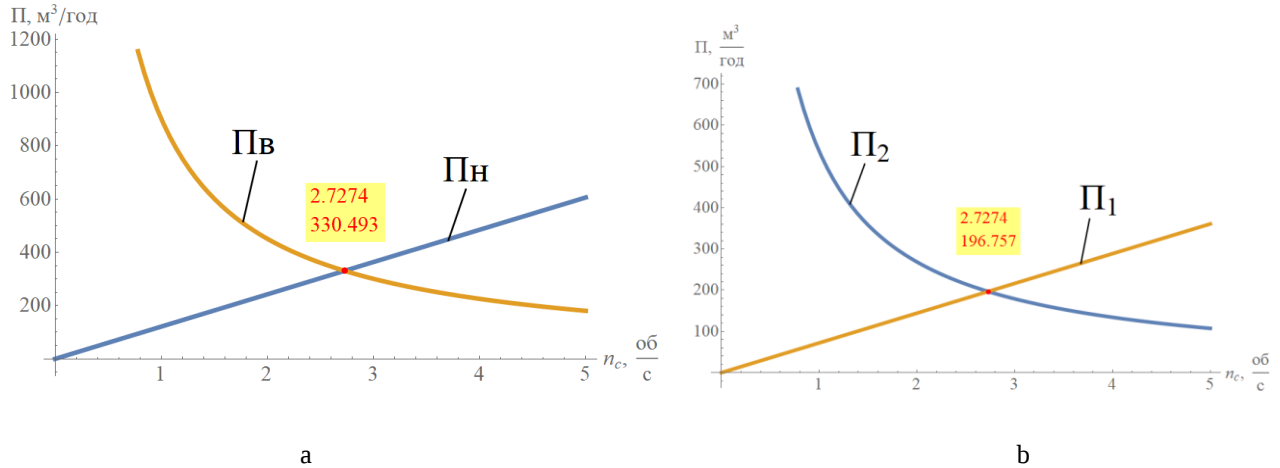


Fig. 1. Graph of the dependence of the eccentric shaft speed on the productivity of the jaw crusher:
a) based on the dependencies (3) and (4); b) based on the dependencies (2) and (6)

However, at significant frequencies of oscillation of the crushing jaw, it was found that the productivity becomes inversely proportional to the frequency of oscillation. Based on which, the dependence (16) is written as follows:

$$\Pi_B = 1606L(2L_{\min} + S) \left(\frac{1}{n_c} \right), \quad (4)$$

Thus, the dependencies (16) and (17) make it possible to establish the optimal range of oscillation frequency of the moving jaw of the jaw crusher. For example, let's take the Metso C120 jaw crusher with the following parameters – $S = 0.0245$ м, $L = 1.2$ м, $L_{\min} = 0.1505$ м, $i = 4,65$. Using dependencies (16) and (17) and the determined parameter values, we will construct the corresponding graph, fig.2.

In addition to the main parameters that are included in the dependencies (16) and (17) on the productivity of the jaw crusher, the following additional parameters have an impact: 1) the distribution of material particles over the volume of the crushing chamber (packing characteristics); 2) the physical properties of the rock (strong, brittle, viscous rocks, etc.); 3) the bulk density of the material; 4) the geometry of the particle surface and the surface of the crushing plate. Based on these parameters, the general expression for determining the productivity of the jaw crusher will have the following form:

$$\begin{aligned} \Pi_s &= 60SL(2L_{\min} + S) \left(\frac{i}{i-1} \right) 47 \sqrt{\left(\frac{i-1}{i} \right)} \frac{\rho f(x_1) f(x_2) f(x_3)}{S} =, \\ &= 2820 \sqrt{S \left(\frac{i-1}{i} \right)} L(2L_{\min} + S) \rho f(x_1) f(x_2) f(x_3) \end{aligned} \quad (5)$$

where ρ – density of a particle of material; $f(x_1)$ – function of distributing material particles throughout the volume of the crushing chamber; $f(x_2)$ – surface function of material particles; $f(x_3)$ – function of the surface geometry of the crushing plate.

In general, similar transformations based on direct and inverse proportionality between the frequency of oscillation of the crusher jaw and productivity can be performed for dependence (2). In this case, the inversely proportional form of formula (2) will be as follows:

$$\Pi_2 = \frac{4414.5Ld\mu}{n}. \quad (6)$$

Similarly to the graph in Fig. 1, we construct a graph of the dependence of productivity on the frequency of oscillations of the movable jaw of the crusher based on expressions (2) and (20). The determined parameters for the C120 crusher remain the same.

As can be seen from the graph of Fig. 3, the productivity value is closer to the productivity of the real C120 crusher compared to the graph of Fig. 2. However, the optimal speed in both graphs is the same.

Again, the difference in productivity lies in the presence in formula (2) of the material loosening coefficient and the parameter of the weighted average size of the material. It should also be noted that the angle of engagement was taken equal to 20 degrees. In general, it can be noted that the dependences (2) and (20) still give inflated productivity values compared to their real values.

Discussion. From the analysis and evaluation of various methods for determining the productivity considered in the work, it can be noted that in jaw crushers the process of destruction of large pieces of material occurs when a load is cyclically applied by a moving cone, after which the material undergoes destruction. This can be explained by the geometry of the crushing chamber, the kinematic features of the crusher, the physical properties of the material and the unevenness of the material stacking in the space of the crushing chamber. In turn, the angle of engagement in the lower zone of the crushing space and the curvilinear profile of the crushing plate have a smaller impact on the productivity, the change of which does not lead to a significant increase in the productivity of the crusher. The angular velocity of the eccentric shaft has a significant impact on the productivity of the crusher. However, the speed of the eccentric shaft is limited due to the design features of the crushing machines.

Conclusions. Most of the considered methods for determining the productivity of jaw crushers do not take into account the distribution of material in the crushing chamber, the geometry of the material and crushing plates, the physical characteristics of the material. The absence of these parameters in many dependencies is compensated by the introduction of appropriate correction factors, which cannot fully characterize the process of material destruction within a wide range of its change. When using the dependencies considered above to determine productivity, there is a difference from the real productivity of jaw crushers, which indicates the lack of an adequate methodology for determining the theoretical productivity of these crushing machines.

References:

1. . Nazarenko, I. I., & Mishchuk, Y. O. (2024). *Mekhanika mashyn i protsesiv podribnennia kam'ianykh materialiv: Monohrafiia* [Mechanics of machines and processes of crushing stone materials: Monograph]. Kyiv: Liudmyla Publishing House. ISBN 978-617-555-256-8.
2. . Korman, T., Bedeković, G., Kujundžić, T., & Kuhinek, D. (2015). Impact of physical and mechanical properties of rocks on energy consumption of jaw crusher. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 51(2), 461–475. <https://doi.org/10.5277/ppmp150208>.
3. . Numbi, B. P. (2015). Optimal energy management of crushing processes in the mining industry (Doctoral dissertation, University of Pretoria). University of Pretoria Research Repository. <https://repository.up.ac.za/handle/2263/50747>.
4. . Ciężkowski, P., Maciejewski, J., & Bąk, S. (2017). Analysis of energy consumption of crushing processes – Comparison of one-stage and two-stage processes. *Studia Geotechnica et Mechanica*, 39(2), Article 12. <https://doi.org/10.1515/sgem-2017-0012>.
5. . Mishchuk, Y. (2025). Structural review and assessment of technological and design parameters of crushing equipment for the construction industry. *Construction Engineering*, (41), 22–39. <https://doi.org/10.32347/tb.2024-41.0403>.
6. . Refahi A., Mohadesi J.A., Rezai B., (2009). Comparison between bond crushing energy and fracture energy of rocks in a jaw crusher using numerical simulation, *J. South. Afr. Inst. Min. Metall.*, 109, 709–717.
7. . Fladvad, M., & Onnela, T. (2020). Influence of jaw crusher parameters on the quality of primary crushed aggregates. *Minerals Engineering*, 151, 106338. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106338>.
8. . James R. Couper, W. Roy Penney, James R. Fair, Stanley M. Walas (2005) *Chemical Process Equipment. Selection and Design*. Second Edition. Gulf Professional Publishing is an imprint of Elsevier 30 Corporate Drive, Suite 400, Burlington, MA 01803, USA. ISBN: 0-7506-7510-1.
9. . Sokur, M., Biletskyi, V., Sokur, L., Bozhyk, D., & Sokur, I. (2016). Investigation of the process of crushing solid materials in the centrifugal disintegrators. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(7(81)), 34–40. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.71983>.
10. Tomislav Korman, Gordan Bedeković, Trpimir Kujundžić, Dalibor Kuhinek (2015) Impact of physical and mechanical properties of rocks on energy consumption of Jaw Crusher. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*. January 2015;51(2):461–475. <https://doi.org/10.5277/ppmp150208>.

РОЗШИРЕННЯ ТЕХНІЧНОГО І ТЕХНОЛОГІЧНОГО ЗАСТОСУВАННЯ ГІДРОІМПУЛЬСНОГО ПРИВОДА ТА ПРИСТРОЇВ НА ЙОГО ОСНОВІ, ОСНАЩЕНИХ ПРУЖНИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ ВИСОКОЇ ЖОРСТКОСТІ

Роман Обертюх, професор, к.т.н., доцент ¹ (ORCID: 0000-0003-2939-6582),

Леонід Поліщук професор, д.т.н., професор ¹ (ORCID: 0000-0002-5916-2413),

¹ Вінницький національний технічний університет, Хмельницьке шосе, 95, 21021, Україна

АНОТАЦІЯ. Проаналізовано застосування вібраційних технологій у різних сферах виробництва, а також технологічні машини з різними типами вібраційних приводів. Відзначено переваги гідроімпульсного приводу у забезпеченні великих зусиль, широкого діапазону регулювання параметрів вібрації на виконавчій ланці вібраційних та віброударних машин. Зосереджено увагу на розвитку нового напрямку гідроімпульсного приводу зі створення параметричних однокаскадних клапанів підвищеної пропускної здатності та представлено розроблені на їх основі конструктивні схеми пристроїв різного технологічного призначення. Описано принцип роботи таких пристроїв на прикладі малогабаритного вібратора-гідроциліндра.

Ключові слова: машини; вібраційні; віброударні; гідроімпульсний привід; параметричний однокаскадний клапан.

Вступ. В різних галузях промисловості та народного господарства широко використовуються вібраційні технології, наприклад, для вібропресування виробів з порошків, розкочування кілець підшипників, виготовлення ливарних форм і залізобетонних конструкцій тощо. Ці технології здійснюються за допомогою різноманітних технологічних машин і пристроїв з різними типами вібраційних приводів (механічним, пневматичним, гідравлічним, гідроімпульсним, електромагнітним, комбінованим тощо) [1].

Аналіз літературних джерел. Аналіз технологічних можливостей цих приводів показує, що порівняно з іншими приводами суттєві переваги має гідроімпульсний привод (ГІП) [1 – 3], який дозволяє забезпечити високі робочі зусилля (до 320 кН та більше) і широкий діапазон регулювання параметрів вібрації (частоти – 1...100 Гц, амплітуди – $(0,1...10)10^{-3}\text{м}$) на виконавчій ланці вібраційних (ВМ) і віброударних (ВУМ) технологічних машин. ГІП відносно простий і надійний в експлуатації. Керування режимом роботи вібраційної машини з ГІП реалізується за допомогою генератора імпульсів тиску (ГІТ) параметричного типу, який є основною складовою ланкою цього приводу [3]. Ідея ГІП та параметричного ГІТ запропоновані Ігорем МАТВЄЄВИМ [1 – 4], який створив наукову школу ГІП ВНТУ. ГІП відносно новий тип приводу, який інтенсивно розвивається, здебільшого працями науковців школи ГІП.

Мета роботи. Підвищення ефективності застосування гідроімпульсного приводу у вібраційних та віброударних машинах за рахунок розширення технологічних можливостей шляхом розробки та впровадження малогабаритних параметричних однокаскадних генераторів імпульсів тиску.

Матеріали і методи. Основними матеріалами для аналізу є науково-технічна та довідкова література про вітчизняні та зарубіжні зразки гідроімпульсного приводу. Основними методами, що використовуються в роботі, є застосування науково-обґрунтованої методики проєктування гідроімпульсних приводів, розроблених науковцями школи ГІП.

Виклад основного матеріалу. Новим напрямом розвитку ГІП є створення параметричних однокаскадних ГІТ підвищеної пропускної здатності [5] (рис. 1) з фасковою герметизацією на першому та другому його ступенях і гідроімпульсних пристроїв на базі суміщення їх запірних ланок (елементів) з пружними елементами високої жорсткості (ПЕВЖ) типу прорізних (ПП) і кільцевих (КП) пружин [4].

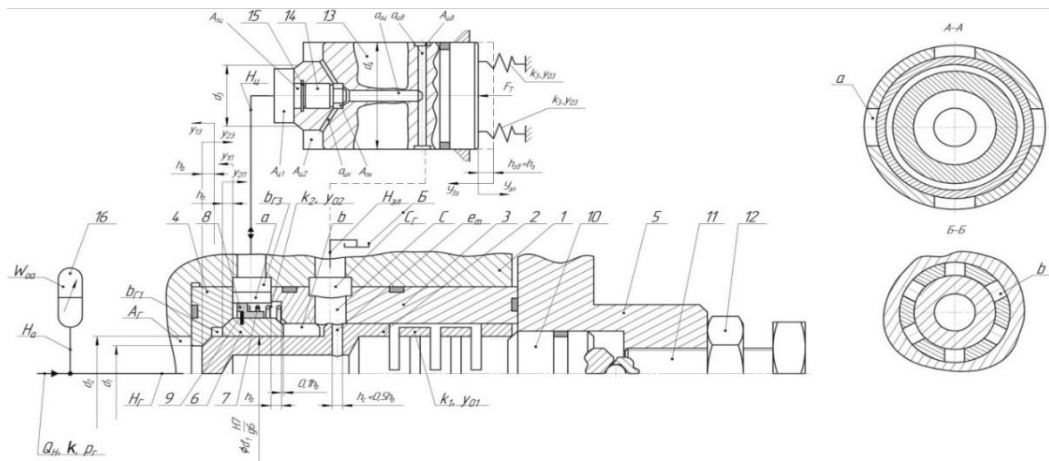


Рис.1. Конструктивна схема ГП, керована однокаскадним ГТТ підвищеної пропускної здатності

На основі цього суміщення розроблено малогабаритні високоефективні пристрої для віброрізання, рис. 2 (ВР – віброточіння, вібросвердління тощо) та поверхневого деформаційного зміцнення деталей (ПДЗД), рис. 3 [6, 7], а також малогабаритні гідроімпульсні вібратори – гідроциліндри (ГІВ – ГЦ) [8] (рис. 4). Розроблена науково-обґрунтована методика їх проектування [9,10].

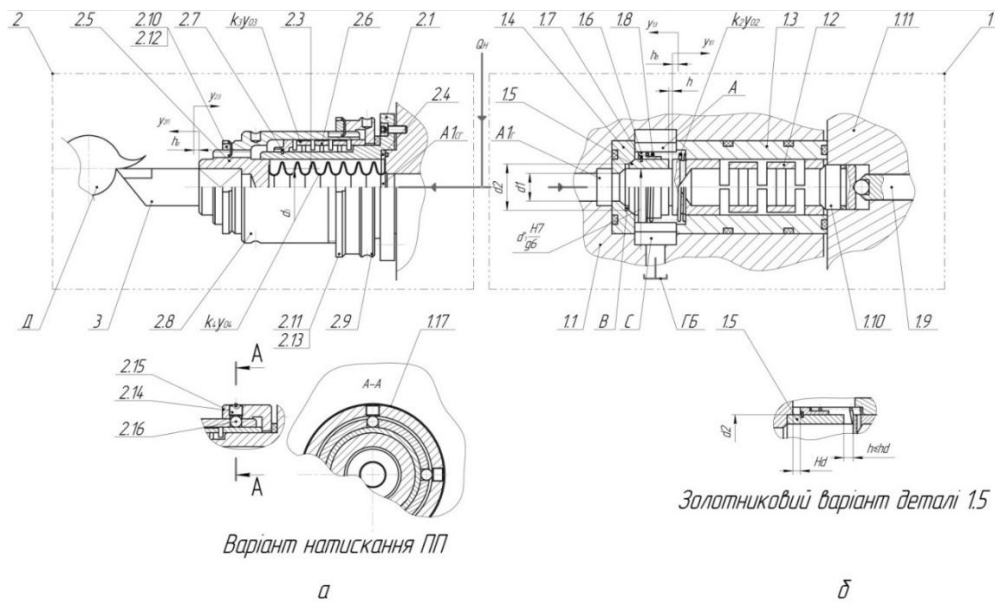


Рис. 2. Пристрій для віброточіння

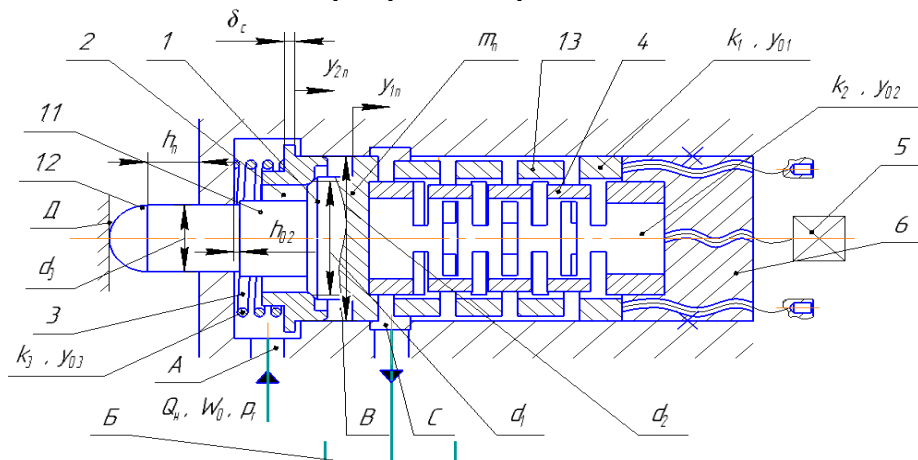


Рис. 3. Пристрій для ПДЗД з плаваючим сидлом першого ступеня герметизації ГТТ

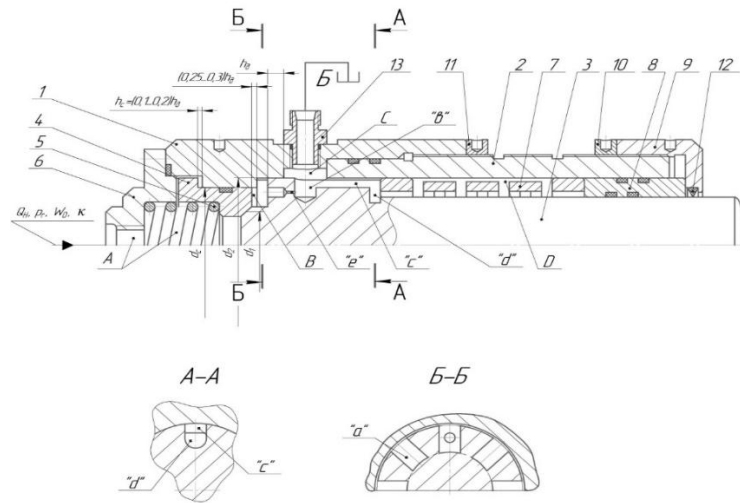


Рис. 4. ГІВ – ГЦ на базі ГПТ з плаваючим сідлом

ГІВ – ГЦ можуть використовуватись як виконавчі ланки – гідродвигуни технологічних вібраційних (ВМ) чи віброударних (ВУМ) машин, так і як самостійне вібраційне обладнання, наприклад, у будівельній галузі чи під час ресурсних випробовувань різних машинобудівних виробів.

Обговорення. Принцип роботи ГІВ – ГЦ, зображеного на рис. 4, та інших розглянутих пристроїв і ГІТ (див. рис. 1 – 3), ґрунтується на генеруванні потоком Q_n робочої рідини (енергоносія – подача гідронасоса гідронасосної станції ГПТ), що підводиться в напірну порожнину A вібратора, імпульсів тиску амплітудою $\Delta p = p_{1max} - p_{2min}$ (тут p_{1max} , та p_{2min} – відповідно, рівні тисків «відкриття» та «закриття» запірного елемента ГІТ з $A_1 = 0,25 \cdot \pi \cdot d_1^2 \approx 0,785 \cdot d_1^2$ (площа поперечного перерізу запірного елемента першого ступеня герметизації ГІТ) на $A_2 = 0,25 \cdot \pi \cdot d_2^2 \approx 0,785 \cdot d_2^2$ (другого ступеня герметизації ГІТ), як під час прямого ходу (з A_1 на A_2), так і зворотного (з A_2 на A_1) ходів плунжера 1 вібратора чи розподільних елементів ГІТ або пристроїв. Рівні тисків p_{1max} , та p_{2min} досягаються внаслідок власної стисливості енергоносія з ізотермічним модулем пружності κ енергоносія та регулюються в основному за рахунок зміни попередньої деформації ГПТ ГІВ – ГЦ чи інших ГПТ ГІТ або розглянутих гідроімпульсних пристроїв.

Частота імпульсів тиску в напірній порожнині A пристроїв, ГІТ та вібратора є рівною частоті вібрацій $\nu_T \equiv \nu [1 - 4]$ і її можна змінювати впливом на Δp (за рахунок регулювання p_{1max}) та Q_n , наприклад, відведенням частини цього потоку енергоносія через регулятор потоку в бак [1 – 3]. Зміна Δp в основному впливає на рівні амплітуди вібрацій та корисного зусилля на штокові, наприклад ГІВ – ГЦ.

Висновки. Суміщення запірних елементів з пружними елементами високої жорсткості типу прорізних і кільцевих пружин дозволяє створити високоефективні малогабаритні параметричні однокаскадні генератори імпульсів тиску, які розширюють технологічні можливості застосування гідроімпульсних приводів..

Список використаних джерел:

1. Iskovych-Lototskyi R. D., Obertiukh R. R., Sevostianov I. V. (2006) *Protsesy ta mashyny vibratsiinykh i vibroudarnykh tekhnolohii : monohrafiia* [Processes and machines of vibration and vibro-impact technologies: monograph] Vinnytsia : UNIVERSUM. [in Ukrainian].
2. Iskovych-Lototskyi R. D., Obertiukh R. R., Polishchuk O. V. (2008) *Vykorystannia hidroimpulsnoho pryvoda v obladnanni pererobnykh vyrobnystv : monohrafiia* [The use of a hydraulic impulse drive in processing equipment: monograph] Vinnytsia : VNTU. [in Ukrainian].
3. Iskovych-Lototskyi R. D., Obertiukh R. R., Arkhypchuk M. R. (2008) *Heneratory impulsiv tysku dlia keruvannia hidroimpulsnyy pryvodamy vibratsiinykh ta vibroudarnykh tekhnolohichnykh mashyn : monohrafiia* [Pressure pulse generators for controlling hydraulic pulse drives of vibration and vibro-impact technological machines: monograph] Vinnytsia : UNIVERSUM. [in Ukrainian].
4. Obertiukh, R.R., Slabkyi, A. V. (2015) *Prystroji dlia vibrotochinnia na bazi hidroimpulsnoho pryvoda : monohrafiia* [Devices for vibro-turning based on a hydro-impulse drive: monograph]. Vinnytsia : VNTU. [in Ukrainian].

5. Obertiukh R. R., Slabkyi A.V., Andrukhov S.R., Kudrash V.O.(2019) Parametrychni odnokaskadni heneratory impulsiv tysku pidvyshchenoi propusknoi zdatnosti[Parametric single-stage high-throughput pressure pulse generators]. *Visnyk mashynobuduvannia ta transportu - Bulletin of Mechanical Engineering and Transport*, №1, 40 – 48. [in Ukrainian].
6. Obertiukh R. R., Slabkyi A. A., Marushchak M. V. (2017) Vibroudarnyi prystrii z hidroimpulsnym pryvodom pidvyshchenoi shvydkodii ta efektyvnosti dlia deformatsiinoho zmitsnennia poverkhon detalei mashyn [Vibro-impact device with a hydraulic pulse drive of increased speed and efficiency for deformation hardening of machine parts surfaces]. *Visnyk mashynobuduvannia ta transportu - Bulletin of Mechanical Engineering and Transport*, № 1, 63 – 71. [in Ukrainian].
7. Obertiukh R. R., Slabkyi A. V. (2017) *Prystroi dlia vibratsiinoho rizannia ta deformatsiinoho zmitsnennia z pruzhnymy elementamy vysokoi zhorstkosti* [Devices for vibration cutting and deformation hardening with high-rigidity elastic elements] : Materialy (tezy) XVI Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii «VIBRATsII V TEKhNITsI TA TEKhNOLOHIaKh», Lystopad 2017 roku. Vinnytsia: VNTU. [in Ukrainian].
8. Obertiukh R. R., Slabkyi A.V., Polishchuk O. V., Hantsapurova O. S.(2022) Hidroimpulsni malohabarytni vibratory na bazi prORIZnykh pruzhyn [Hydro-impulse small-sized vibrators based on slotted springs]. *Visnyk mashynobuduvannia ta transportu - Bulletin of Mechanical Engineering and Transport*, №1 (15), 124 – 130. [in Ukrainian].
9. Obertyukh, R., Slabkyi, A, Polishchuk, L (2021) Method of project calculation of hydroimpulsive device for vibroturning with an incorporated cycle spring pressure pulse generator. *Mechatronic Systems 1: Applications in Transport, Logistics, Diagnostics, and Control*, 1-15.
10. Obertyukh, R., Slabkyi, A, Polishchuk, L (2022) Dynamic and mathematical models of the hydroimpulsive vibro-cutting device with a pressure pulse generator bult into the ring spring . *Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Srodowiska*, 12(3), 54–58

ВЕРИФІКАЦІЯ ПЕРЕМІЩЕННЯ ПРОСТОРОВО ОРІЄНТОВАНОГО НОЖА НА ВИПРОБУВАЛЬНОМУ СТЕНДІ

Богдан Федішин, асистент, аспірант¹(ORCID: 0000-0003-2420-7332),

Максим Балака, доцент, кандидат технічних наук, доцент¹(ORCID: 0000-0003-4142-9703),

¹Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних Сил, 31, 03037, Україна

АНОТАЦІЯ. Для проведення експериментальних досліджень процесу різання робочого середовища просторово орієнтованими ножами відвального обладнання було модернізовано динамометричний стенд реєстрації силового навантаження авторської конструкції. Це дозволило забезпечити проведення повноцінних експериментів з урахуванням усіх чинників взаємодії робочого органу з робочим середовищем під час процесу різання. Як робоче середовище запропоновано використовувати ґрунти III–V категорій. У результаті досліджень, проведених з використанням динамометричного стенда, аналітично визначено сили різання для просторово орієнтованого ножа при різних кутах його відхилення. Ці сили виконують роботу, пов'язану з руйнуванням ґрунту та подоланням його опору різанню. Проведено верифікацію переміщення просторово орієнтованого ножа відповідно до сформульованої робочої гіпотези.

Ключові слова: динамометричний стенд; різання ґрунтів; просторово орієнтований ніж; переміщення; експериментальні дослідження.

Вступ. Під час роботи землерийної техніки її робочий орган взаємодіє з ґрунтовим середовищем, здійснюючи руйнування і відокремлення від масиву. Основні характеристики процесу різання ґрунту визначаються рядом геометричних, кінематичних, силових та енергетичних параметрів, фізико-механічними властивостями ґрунту, умовами взаємодії та конструктивними особливостями робочого органу [1, 2]. Особливу роль у цьому процесі відіграють геометричні параметри – товщина, ширина та площа зрізу, а також кути орієнтації робочого органу в просторі [3]. У більшості випадків розрахунки ґрунтуються на припущенні, що такі параметри робочого органу не змінюються в процесі взаємодії з ґрунтом.

Однак зміна параметрів при просторово орієнтованій дії окремих елементів робочого органу досліджена недостатньо. Тому питання теоретичного обґрунтування та практичної реалізації процесів різання ґрунту просторово орієнтованим ножем відвального обладнання, а також розкриття фізичної сутності цього процесу, потребують подальшого вивчення.

Аналіз літературних джерел. У працях [4, 5] наведено описи моделей з умовами роботи, що дозволяє оцінити динаміку таких систем з урахуванням зв'язків між джерелом енергії, проміжними елементами, передавальним механізмом та робочим органом.

Мета роботи. Метою даної роботи є теоретичне обґрунтування процесу різання ґрунтів просторово орієнтованими ножами бульдозерного відвалу, удосконалення динамометричного стенду та верифікація переміщення ножа відповідно до сформульованої робочої гіпотези.

Матеріали і методи. Основу для аналізу становлять наукові публікації, в яких детально висвітлено робочу гіпотезу, згідно з якою рух просторово орієнтованого ножа здійснюється у поздовжньому напрямку – поступальний рух, перпендикулярний до траєкторії руху робочого органу (рис. 1). Це повинно забезпечити ефективне підрізання ґрунту завдяки зменшенню сил різання та полегшеному виведенню ґрунту із зони розробки [6]. У межах проведених досліджень було розроблено параметричну модель взаємодії просторово орієнтованого ножа з робочим середовищем [7]. Також змодельовано плани переміщення та виконано розрахунок сил різання ґрунту під час роботи таких ножів у складі відвального обладнання [8]. Окрім того, визначено коефіцієнти подібності [9], використання яких дало змогу створити фізичну модель просторово орієнтованого ножа, а також складено науково обґрунтовану методику проведення стендових експериментальних досліджень [10].

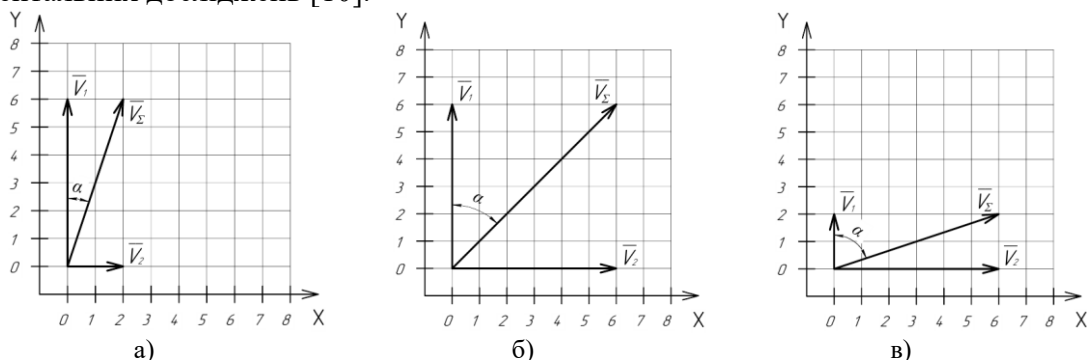


Рис. 1. Графічне відображення визначення вектора напрямку сили різання та кута α при співвідношеннях швидкостей: а) 3:1; б) 1:1; в) 1:3

Виклад основного матеріалу. Випробувальний стенд для динамометричних вимірювань складається зі станини з напрямними, по яких на роликах рухається тензометричний візок. До нього через тензометричні балки закріплено привід з просторово орієнтованим ножом (рис. 2). Візок має механізм регулювання глибини різання та переміщується горизонтально за допомогою гвинт-гайкової пари, клинопасової передачі ($u = 2,5$) і електродвигуна ($N = 2,5$ кВт, $n = 980$ об/хв) з пультом керування та кінцевими вимикачами. Привід ножа встановлено на візку і працює від двигуна ($N = 1,1$ кВт, $n = 3000$ об/хв) через систему передач ($u = 8$). Для перевірки переміщення ножа використано маркерну наклейку та дві макетні шкали (рис. 3).

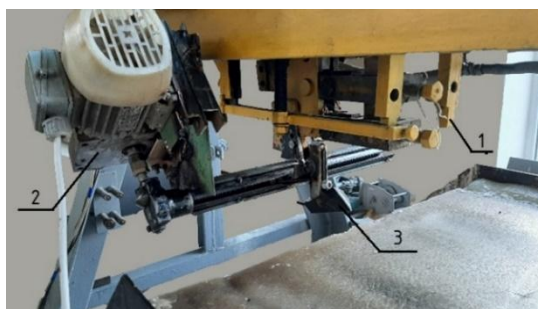


Рис. 2. Модель просторово орієнтованого ножа, закріплена у випробувальному стенді:
1 – динамометричний візок; 2 – привід просторово орієнтованого ножа; 3 – просторово орієнтований ніж

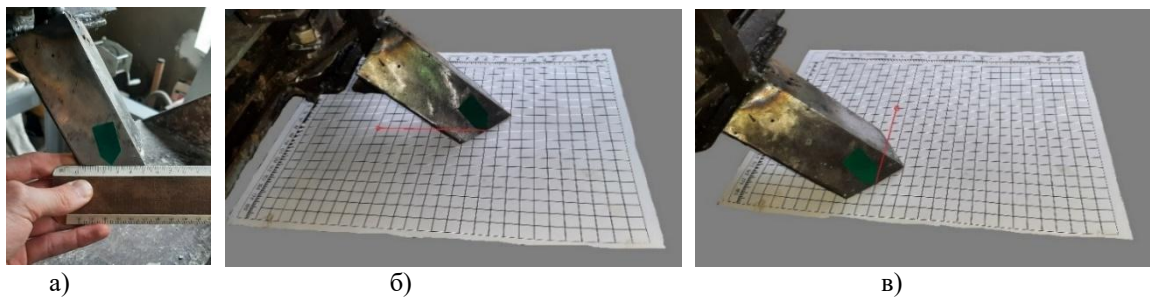


Рис. 3. Верифікація швидкості переміщення просторово орієнтованого ножа за допомогою макетної шкали: а) наклеювання маркера по центру ріжучої кромки; б) верифікація швидкості подачі ножа; в) верифікація швидкості поперечного переміщення ножа

Швидкість подачі просторово орієнтованого ножа забезпечується через електродвигун із частотним перетворювачем «Frescon» FR150A, а поперечне переміщення – за допомогою іншого приводу з перетворювачем «Suswe» T13-750W-12-H. Зміна частоти струму дозволяє регулювати швидкість руху ножа відповідно до сформульованої робочої гіпотези.

Для перевірки кута α переміщення просторово орієнтованого ножа використовується макетна шкала з кутовими поділками (крок 5°). Ніж встановлюється у нульове положення (рис. 4, а), після чого запускається за різних співвідношень швидкостей (рис. 4, б–г).

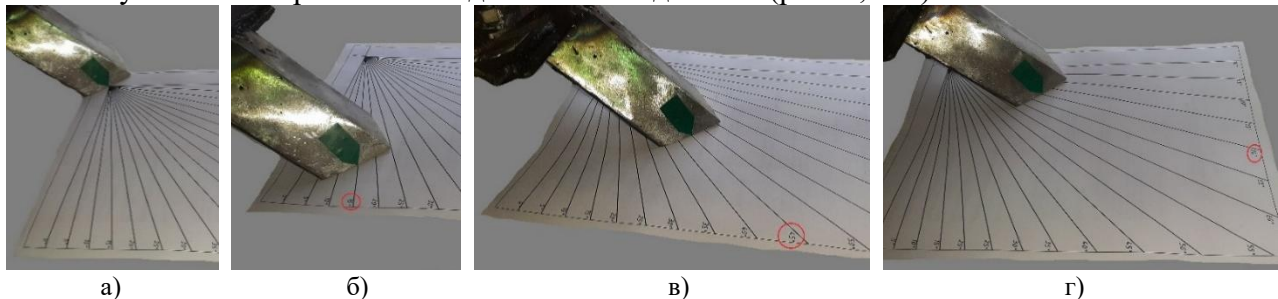


Рис. 4. Верифікація кутового переміщення просторово орієнтованого ножа за допомогою макетної шкали (з кутовими поділками): а) встановлення ножа в нульове положення; б) переміщення із співвідношенням швидкостей, що забезпечує $\alpha = 15^\circ$; в) переміщення при $\alpha = 45^\circ$; г) переміщення при $\alpha = 70^\circ$

Обговорення. Як видно з рисунків, використання частотних перетворювачів дає змогу точно контролювати швидкість подачі та переміщення просторово орієнтованого ножа відвалу, а також легко налаштовувати співвідношення між цими швидкостями. Застосування макетних шкал дозволяє чітко відслідковувати траєкторію переміщення ножа.

Висновки. Проведене доопрацювання динамометричного стенду для реєстрації силового навантаження авторської конструкції, призначеного для визначення сил різання просторово орієнтованим ножом відвального обладнання, а також подальша верифікація параметрів подачі та переміщення ножа, підтвердили можливість реалізації складної траєкторії руху та контролю співвідношень швидкостей. Все це створює умови для проведення повноцінних експериментальних досліджень з урахуванням комплексу чинників взаємодії робочого органу з ґрунтами III, IV та V категорій в процесі їх різання.

Список використаних джерел:

1. Vietrov, Yu. O. & Vlasov, V. V. (1995). Mashyny dlia zemlianykh robot. Pryklady rozrakhunku [Machines for earthworks. Calculation examples]. Kyiv: ISDO, KNUBA. 304 [in Ukrainian].
2. Baladynskiy, V. L., Livynskiy, O. M., Khmara, L. A., Fomin, A. V. & Harkavenko, O. M. (2001). Budivelna tekhnika [Construction machinery]. Kyiv: Lybid, 367 [in Ukrainian].
3. Smirnov, V. M. (2009). Osnovy teorii rizannia gruntiv prostорово orietovanymy nozhamy zemleryinyh mashyn [Theory basics of soil cutting with spatially oriented knives of earthmoving machines]. Kyiv: MP Lesya. 260 [in Ukrainian].
4. Pochka, K., Prystailo, M., Delembovskyi, M., Balaka, M., Maksymiuk, Y. & Polishchuk, A. (2025). Features of the Dynamic Interaction Between the Elastically Deformed Working Body of a Ripper-Pick and the Soil. In: Prentkovskis, O., Yatskiv (Jackiva), I., Skačkauskas, P., Karpenko, M., Stosiak, M. (eds) TRANSBALTICA XV: Transportation Science and

Technology. TRANSBALTICA 2024. Lecture Notes in Intelligent Transportation and Infrastructure. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-85390-6_52.

5. Loveikin, V. S., Pochka K. I., Prystailo, M. O., Balaka, M. M. & Pochka, O. B. (2021). Dynamic balancing of roller forming unit drive. Strength of Materials and Theory of Structures, Issue 107, P. 140-158. DOI: 10.32347/2410-2547.2021.107.140-158.
6. Rashkivskiy, V. & Fedyshyn, B. (2023). Development of the information model of the soil cutting process spatially oriented knife of dynamic action. Girnychi, budivelni, dorozhni ta melioratyvni mashyny, (102), 24–30. <https://doi.org/10.32347/gbdmm.2023.102.0301>.
7. Rashkivskiy, V. P. & Fedyshyn, B. M. (2023). Development of a parametric model of the spatially oriented knife on the bulldozer blade. Strength of Materials and Theory of Structures, Issue 111, P. 263–275. DOI: 10.32347/2410-2547.2023.111.263-275.
8. Rashkivskiy, V. P. & Fedyshyn, B. M. (2023). Modelling of soil destruction process by bulldozer using a spatially oriented working unit. Transfer of innovative technologies, 6(1), 58–70. <https://doi.org/10.32347/tit.2023.61.0202>.
9. Rashkivskiy, V. P., Prystailo, M. O., Fedyshyn, B. M. & Besida, A. S. (2025). Development of a physical model and determination of similarity coefficients of a spatially oriented knife of a bulldozer blade. Visnyk of Kherson National Technical University, 1(1(92)), 198–203. <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.1.1.25>.
10. Rashkivskiy, V., Prystailo, M., Fedyshyn, B. & Balaka, M. (2025). Methods of conducting a bench-scale experimental study with a spatially oriented knife of a bulldozer blade. International Science Journal of Engineering & Agriculture, 4(1), 79–92. <https://doi.org/10.46299/j.isjea.20250401.07>.

ОЦІНКА СТАНУ ЛІТІЙ-ІОННИХ АКУМУЛЯТОРІВ

Сергій Буряк, доц., к.т.н., докторант кафедри автоматики та телекомунікацій¹ (ORCID: 0000-0002-8251-785X),
Оксана Гололобова, доц., к.т.н., асистент кафедри автоматики та телекомунікацій¹ (ORCID: 0000-0003-1857-8196),

¹ Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, м. Дніпро, 49010, Україна

АНОТАЦІЯ. Літій-іонні акумулятори виділяються серед інших джерел чистої енергії завдяки своїй високій щільності енергії та малим розмірам. Зі зростанням сфери застосування та масштабів літій-іонних акумуляторів, точний моніторинг їх стану в режимі реального часу відіграє важливу роль у забезпеченні стабільної та безперебійної роботи системи накопичення енергії. Через взаємодію різних реакцій в процесі старіння літій-іонних акумуляторів, зниження ємності не є закономірним. Традиційний метод моніторингу в основному базується на напрузі та струмі, які не можуть відображати внутрішні процеси, тому точність таких досліджень значно знижується. Останнім часом, з розвитком електрохімічної імпедансної спектроскопії, стало можливим швидко та точно оцінити стан. Дана методика вимірювань може визначати імпеданс акумулятора в широкому діапазоні частот, а тому вона може відображати внутрішній стан старіння літій-іонних акумуляторів. Дану роботу присвячено узагальнено новітньої технології вимірювання імпедансної спектроскопії та для визначення стану літій-іонних акумуляторів, а також її переваги, недоліки та перспективи.

Ключові слова: літій-іонні акумулятори; оцінка стану; електрохімічна імпедансна спектроскопія; аналіз ємності акумулятора; метод вимірювання ємності акумулятора.

Вступ. Літій-іонні акумулятори завжди були кращими екологічно чистими акумуляторами. Вони широко використовуються в багатьох галузях останніми роками завдяки постійному вдосконаленню технології виробництва та постійному зниженню витрат. Вони широко використовуються в системах накопичення енергії, таких як гідроенергетика, пожежна енергетика, вітрові та сонячні електростанції, а також в електроінструментах, військовій техніці, аерокосмічній та інших галузях [1]. Наразі літій-іонні акумулятори поступово розширюються на такі галузі, як електричні велосипеди та електромобілі [2].

Аналіз існуючих робіт та постановка задач дослідження. В останні роки головною темою досліджень є електродні матеріали літій-іонних акумуляторів [3]. Однак у сфері нової енергетики, такої як електромобілі, для задоволення вимог до потужності та довговічності електромобілів вони зазвичай використовуються у формі акумуляторних блоків [4]. Дуже важливо контролювати стан літій-іонних акумуляторів у режимі реального часу [5]. Зі збільшенням кількості циклів літій-іонних акумуляторів імпеданс елемента також збільшуватиметься різною мірою. Електрохімічна імпедансна спектроскопія (EIS) широко використовується в діагностиці стану (SOH) літій-іонних акумуляторів.

Існують і інші методи визначення SOH літій-іонних акумуляторів. Складність прогнозування SOH на основі еквівалентної схеми полягає у створенні еквівалентної схеми моделі. Точність підбору моделі безпосередньо впливатиме на точність оцінки результатів. Її побудова повинна враховувати обсяг та швидкість обчислень. Крім того, моделі також відрізняються через різні робочі стани. Ключем до подолання цих труднощів є використання методу машинного навчання для прогнозування еквівалентної схеми в режимі реального часу та забезпечення точності налаштування моделі постійно. Метод, заснований на машинному навчанні, для оцінки SOH також є складним, оскільки фізичний сенс вилучення ознак незрозумілий. Це значно обмежує стійкість та гнучкість моделі. Крім того, сильна залежність від накопичених даних призводить до високої часової складності моделі. Модель нейронної мережі має низьку стійкість за різних робочих умов, що робить необхідним перенавчання моделі. Це значною мірою обмежує її застосування на практиці.

Мета та завдання дослідження. Дослідження можливостей EIS в діагностиці стану (SOH) літій-іонних акумуляторів

Викладення основного матеріалу. EIS – це метод аналізу динаміки внутрішніх змін процесів електрода, подвійних шарів та дифузії шляхом вимірювання зміни імпедансу з частотою синусоїдальної хвилі [6]. Його можна використовувати для вивчення механізму електродних матеріалів, твердого електроліту, провідного полімеру та захисту від корозії. Порівняно з традиційним методом, який спирається на визначення напруги, струму, температури та інших даних для оцінки ступеня старіння акумулятора, метод, заснований на електрохімічній імпедансній спектроскопії, виявився більш точним. Конкретний метод вимірювання полягає в застосуванні хвилі змінного струму малої амплітуди з різними частотами до електрохімічної системи та вимірюванні співвідношення потенціалу змінного струму та сигналу струму (співвідношення – це імпеданс системи) з частотою синусоїдальної хвилі ω або фазового кута імпедансу (Φ) зі зміною ω [7]. Оскільки система збурюється малою амплітудою потенціалу синусоїдального сигналу, анодний та катодний процеси (а саме процеси окислення та відновлення) виникають по черзі на електроді, і ці два процеси мають протилежні ефекти в процесі збору електрохімічної імпедансної спектроскопії. Отже, навіть якщо сигнал збурення діє на електрод протягом тривалого часу, це не призведе до накопичення розвитку поляризації та накопичення зміни стану поверхні електрода. Таким чином, даний метод є методом «квазістаціонарного стану». Оскільки між потенціалом і струмом існує лінійна залежність, електрод знаходиться в квазістаціонарному стані під час процесу вимірювання, що спрощує математичну обробку результатів вимірювання. Таким чином, це метод вимірювання в частотній області, який може вимірювати широкий діапазон частот, тому можна отримати більше динамічної інформації та інформації про структуру інтерфейсу електрода, ніж за допомогою традиційних електрохімічних методів.

EIS – це неруйнівний інструмент визначення стану літій-іонних акумуляторів. Під час випробування застосовується широкий діапазон частот для відображення інформації про спектр імпедансу (дійсна частина, уявна частина, фаза) акумулятора за різних температур і станів заряду. Використання даного методу може повністю відобразити зміни в катоді, аноді, електроліті та шарі твердого електроліту в процесі старіння акумулятора. Порівняно з традиційним використанням системи управління акумуляторами (BMS) та технології неруйнівного контролю, він має переваги високої швидкості виявлення та об'єму інформації.

Наразі існує безліч конкретних визначень стану акумуляторів. Найпоширенішим визначенням є співвідношення ємності, що вивільняється з певною швидкістю розряду, до напруги відсікання при повному заряді та відповідної номінальної ємності, що просто розуміється як гранична ємність літій-іонного акумулятора.

$$SOH = \frac{C_{now} - C_{eol}}{C_{new} - C_{eol}} \cdot 100\% \quad (1)$$

де C_{now} – це поточна ємність використаного акумулятора, C_{eol} – це ємність після закінчення терміну служби (зазвичай 80% від C_{now}) типового акумулятора, C_{new} – це ємність нового акумулятора.

Існує певний зв'язок між EIS та SOH акумулятора. Чим нижчий рівень SOH, тим більший внутрішній опір акумулятора. Дана спектроскопія отримується за допомогою електрохімічної робочої станції, а потім стан розраховується відповідно до зв'язку між показником роботоспроможності та внутрішнім опором акумулятора. Наразі широко досліджується прогнозування SOH акумулятора за допомогою EIS, яке в основному поділяється на дві категорії: на основі методу моделі еквівалентної схеми та метод, керований даними.

Традиційні методи вимірювання EIS зазвичай застосовують синусоїдальне збурення акумулятора з певною зміною амплітуди та частоти. Імпеданс у частотній області розраховується за допомогою збурення та його відгуку. Залежно від типу перешкоди, вимірювання може виконуватися в режимі постійного струму або постійного потенціалу. Методи вимірювання в основному поділяються на збудження напругою та збудження струмом. Збудження напругою вимагає, щоб акумулятор підтримував постійний струм під час вимірювання. Аналогічно, збудження струмом вимагає, щоб напруга акумулятора залишалася постійною. Однак збудження напругою не сприяє онлайн-вимірюванню спектру імпедансу, тому в практичних застосуваннях зазвичай використовується збудження струмом. Однак традиційний метод вимірювання EIS має широкий діапазон частот. Процес тестування займає багато часу. Тому останні досягнення в дослідженнях загалом зосереджені на подоланні цієї проблеми.

Перетворення Фур'є, перетворення Лапласа та інші методи часової області можуть значно скоротити час вимірювання під час отримання результатів EIS, метод вимірювання якої, заснований на швидкому перетворенні Фур'є, запропонованого Цаппеном та ін. [8]. Він може отримувати дані EIS у діапазоні від 1 Гц до 1 кГц протягом 1 с. На відміну від звичайних одночастотних сигналів, кілька частот можуть бути збуджені одночасно, використовуючи кілька накладених синусоїд різних частот. У часовій області сигнал, що складається з n частотних компонентів, має вигляд:

$$s(t) = \sum_{k=1}^N a_k \cdot \sin(2\pi f_k t + \varphi_k) \quad (2)$$

де амплітуди кожного окремого компонента a_k – f_k та φ_k представляють частоту та фазу відповідно. Загальна кількість частотних точок дорівнює N . Було перевірено, що цей метод може отримати спектр єдиного імпедансу в діапазоні від 1 Гц до 1 кГц зі швидкістю до 60 разів більшою під час безперервного вимірювання.

Висновки. З розвитком технології збору даних EIS, моніторинг SOH літій-іонних акумуляторів стає все швидшим і точнішим. Сучасна технологія тестування EIS стикається з такими проблемами, як складне випробувальне обладнання, тривалий час тестування та неможливість вимірювання онлайн. В подальшому дослідження будуть зосереджені на розробці моделей, покращенні їх стійкості та гнучкості та скороченні обчислень.

Список використаних джерел:

1. Peng, F., Xie, X., Wu, K., Zhao, Y., & Ren, L. (2023). Online hierarchical energy management strategy for fuel cell based heavy-duty hybrid power systems aiming at collaborative performance enhancement. *Energy Convers. Manag.* 2023, 276, 11650. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116501>.
2. Cui, Z., Wang, L., Li, Q., & Wang, K. (2021). A comprehensive review on the state of charge estimation for lithium-ion battery based on neural network. *Int. J. Energy Res.*, 46, 5423–5440. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.105567>.
3. Zhang, M., Wang, W., Xia, G., Wang, L., & Wang, K. (2023). Self-Powered Electronic Skin for Remote Human–Machine Synchronization. *ACS Appl. Electron. Mater.* 5, 498–508. <https://doi.org/10.1021/acsaelm.2c01476>.
4. Guo, Y., Yu, P., Zhu, C., Zhao, K., Wang, L., & Wang, K. (2022). A state-of-health estimation method considering capacity recovery of lithium batteries. *Int. J. Energy Res.* 46, 23730–23745. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.109010>.
5. Cui, Z., Kang, L., Li, L., Wang, L., & Wang, K. (2022). A combined state-of-charge estimation method for lithium-ion battery using an improved BGRU network and UKF. *Energy*, 259, 124933. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124933>.
6. Xiong, R., Tian, J., Mu, H., Wang, C. (2017). A systematic model-based degradation behavior recognition and health monitoring method for lithium-ion batteries. *Appl. Energy*, 207, 372–383. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.05.124>.
7. Pulido, Y. F., Blanco, C., Ansean, D., Garcia, V.M., Ferrero, F., & Villedor, M. (2017). Determination of suitable parameters for battery analysis by Electrochemical Impedance Spectroscopy. *Measurement*, 106, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.04.022>.

8. Mousavi-Kamazani, M., Zinatloo-Ajabshir, S., & Ghodrati, M. (2020). One-step sonochemical synthesis of $\text{Zn}(\text{OH})_2/\text{ZnV}_3\text{O}_8$ nanostructures as a potent material in electrochemical hydrogen storage. *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, 31, 17332–17338. <https://doi.org/10.1007/s10854-020-04289-4>.

РЕЛАКСАЦІЙНІ ЯВИЩА ПРИ УЩІЛЬНЕННІ АРБОЛІТОВИХ ТА ПОЛІСТИРОЛБЕТОННИХ СУМІШЕЙ

Микола Нестеренко, доцент, к.т.н., доцент¹ (ORCID: 0000-0002-4073-1233),

Василь Ведмідь, аспірант¹ (ORCID: 0000-0003-1514-1212),

Тетяна Нестеренко, доцент, к.т.н., доцент¹ (ORCID: 0000-0002-2387-8575),

Максим Пирлик, аспірант¹ (ORCID: 0009-0006-1343-9516),

¹ Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», проспект Віталія Грицаєнка 24, 36011, Україна

АНОТАЦІЯ. Розглянуто особливості динамічного ущільнення легких бетонів, зокрема полістиролбетонних та арболітових сумішей, які належать до класу в'язкопружних пористих матеріалів. Проаналізовано їхню структурну будову, фізико-механічні властивості та релаксаційну поведінку під дією вібраційного навантаження. Обґрунтовано доцільність використання математичних моделей Кельвіна–Фойгта та Максвелла для опису напружено-деформованого стану відповідно до типу заповнювача. Наведено аналітичні вирази для визначення амплітуди, резонансної частоти, фазового зсуву та декременту затухання, що дозволяє моделювати роботу системи «вібраюча платформа – бетонна суміш» як масово-пружну систему з демпфуванням. Встановлено, що ефективність ущільнення залежить від узгодження частоти вібрацій з релаксаційними властивостями матеріалу та врахуванням внутрішніх втрат, пов'язаних із пружністю та вологістю заповнювачів. Запропоновано підходи до оптимізації режимів ущільнення з урахуванням структурних та часових параметрів релаксації, що забезпечує підвищення щільності й однорідності готових виробів.

Ключові слова: полістиролбетон; арболіт; вібраційне ущільнення; в'язкопружність; релаксація; модель Кельвіна–Фойгта; модель Максвелла; легкі бетони; демпфування; резонансна частота; динамічне навантаження; масово-пружна система.

Вступ. Легкі бетонні суміші, зокрема полістиролбетон і арболіт, широко використовуються у сучасному будівництві завдяки низькій щільності та високим теплоізоляційним властивостям. Однак їх ущільнення у процесі формування виробів ускладнене через в'язкопружну природу та пористу структуру матеріалу. Тому актуальним є дослідження динамічної поведінки таких сумішей під дією вібраційного навантаження з метою оптимізації технологічних режимів ущільнення.

Аналіз літературних джерел. У наукових дослідженнях [1] значну увагу приділено процесам ущільнення легких бетонів, зокрема полістиролбетону та арболіту. Підкреслюється важливість врахування їх структурних особливостей при динамічному навантаженні, оскільки традиційні методи не гарантують однорідності матеріалу. Дослідження доводять, що мікроструктура таких бетонів змінюється залежно від параметрів вібрації, що визначає якість кінцевого продукту. Окрема увага приділяється впливу резонансних режимів та внутрішнього демпфування на ефективність ущільнення, а також удосконаленню вібраційного обладнання [2, 3].

Мета роботи. Метою дослідження є визначення особливостей динамічної поведінки полістиролбетонних та арболітових сумішей під час вібраційного ущільнення, а також кількісна оцінка впливу релаксаційних властивостей на ефективність ущільнення.

Виклад основного матеріалу.

Полістиролбетонні та арболітові суміші належать до класу в'язкопружних пористих середовищ, що характеризуються складною механічною поведінкою під час динамічного ущільнення. Обидва типи сумішей мають багатокомпонентну структуру: полістиролбетон складається з гранул пінополістиролу, цементно-піщаної матриці та системи повітряних пор, тоді як арболіт містить органічні заповнювачі, зокрема деревну стружку, яка формує пористу волокнисту структуру.

Об'єднуючим фактором для цих матеріалів є прояв релаксаційних властивостей — здатності до поступового зниження напружень після припинення навантаження, що зумовлено як внутрішніми тертями, так і пружністю заповнювачів. У випадку полістиролбетону така поведінка добре

описується диференціальними рівняннями теорії в'язкопружності, оскільки комбінація жорсткої цементної фази та м'якого пінополістиролу створює середовище з амплітудно-залежною жорсткістю. Арболітові суміші, зі свого боку, проявляють виражену здатність до деформацій і затримку відновлення форми через гігроскопічність і пружність органічного заповнювача, що впливає на формування міжчастинкових контактів.

Для моделювання релаксаційних процесів в арболітових сумішах часто використовується модель Кельвіна–Фойгта. Ця модель представляє матеріал як комбінацію пружного елемента (пружина) та в'язкого елемента (демпфер), з'єднаних паралельно. Рівняння моделі має вигляд:

$$\sigma(t) = E\varepsilon(t) + \eta \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \quad (1)$$

де: $\sigma(t)$ — напруження, $\varepsilon(t)$ — деформація, E — модуль пружності, η — коефіцієнт в'язкості, $d\varepsilon(t)/dt$ — швидкість деформації.

Ця модель дозволяє описати повільне зменшення напружень у часі після припинення навантаження, що є характерним для арболітових сумішей.

При моделюванні процесу ущільнення полістиролбетонної суміші доцільно також застосовувати модель Кельвіна–Фойгта, яка враховує як миттєву пружну реакцію, так і затриману в'язку відповідь. Дослідження показують, що час релаксації для таких сумішей може становити від 0,02 до 0,20 с, залежно від складу та умов ущільнення.

У випадку гармонічного навантаження від вібраційної установки, де зовнішнє навантаження має вигляд:

$$\sigma(t) = \sigma_0 \cdot \sin(\omega t) \quad (2)$$

суміш реагує з фазовим зсувом, а деформація описується рівнянням:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \cdot \sin(\omega t + \phi) \quad (3)$$

де ϕ — фазовий зсув, залежний від співвідношення η/E , ω — частота зовнішнього навантаження.

Для багат шарового середовища (де ущільнювана маса знаходиться у формі), система «вібруюча платформа - полістиролбетон» може бути змодельована як масово-пружна система з демпфуванням:

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = F_0 \cdot \sin(\omega t) \quad (4)$$

де: m — маса ущільнюваного шару, c — демпфуючий коефіцієнт (визначає внутрішні втрати в бетоні), k — жорсткість системи (ефективна жорсткість суміші), F_0 — амплітуда зовнішньої сили, $x(t)$ — переміщення (деформація) суміші.

Частота, при якій відбувається резонансне ущільнення, визначається як:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (5)$$

Ефективне ущільнення досягається, коли частота збудження ω близька до власної частоти системи ω_0 , але при цьому необхідно контролювати величину демпфування, щоб не перевищити критичне затухання. Для цього визначається декремент затухання:

$$\delta = \frac{c}{2\sqrt{km}} \quad (6)$$

Зі зростанням вмісту пінополістиролу коефіцієнт демпфування зростає через більшу кількість контактних втрат та пружність заповнювача, що вимагає коригування частоти вібраційного впливу.

Для дослідження релаксації після припинення вібрацій можна використовувати рівняння експоненціального спаду деформації:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \cdot e^{-t/\tau} \quad (7)$$

де $\tau = \eta/E$ — релаксаційний час.

Таким чином, ефективне ущільнення полістиролбетонної суміші передбачає забезпечення частоти вібрацій, що не перевищує релаксаційну здатність матеріалу, а також врахування

демпфувальних властивостей та зниження ймовірності структурного руйнування.

Для опису напружено-деформованого стану арболітової суміші в процесі ущільнення доцільно використовувати модель Максвелла, яка добре описує матеріали з домінуванням в'язких релаксаційних властивостей у початкові моменти навантаження. У цій моделі пружна складова (пружина з модулем E) та в'язка (демпфер з в'язкістю η) з'єднані послідовно:

$$\frac{d\varepsilon(t)}{dt} = \frac{1}{E_1} \cdot \frac{d\sigma(t)}{dt} + \frac{\sigma(t)}{\eta} \quad (8)$$

Після припинення зовнішнього впливу, наприклад, вібрації чи тиску, спостерігається релаксація напружень, яку описує експоненціальне затухання:

$$\sigma(t) = \sigma_0 \cdot e^{-t/\tau} \quad (9)$$

Час релаксації τ залежить від вмісту води, типу заповнювача та попередньої механічної обробки суміші. Час релаксації у вологому стані може перевищувати 0.5 с, що унеможливорює використання надвисоких частот ущільнення без ризику порушення міжчастинкових зв'язків.

Також, при довготривалому ущільненні суміші з високим вмістом деревини можна спостерігати пластичне накопичення деформації. У цьому випадку використовується узагальнена модель Больцмана–Фогеля, яка враховує розподіл релаксаційних часів:

$$\sigma(t) = \int_0^t G(t-\xi) \cdot \frac{d\varepsilon(\xi)}{d\xi} d\xi \quad (10)$$

$G(t)$ – ядро релаксації, яке залежить від вологості та часу витримки.

При вібраційному ущільненні в реальних умовах процес можна описати за допомогою масово-пружної системи з демпфуванням, як у полістиролбетоні:

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = F(t) \quad (11)$$

але коефіцієнт c буде суттєво більшим унаслідок внутрішнього тертя та капілярних втрат у пористому деревному заповнювачі. Визначення цих параметрів можливе на основі експериментальної кривої релаксації в стандартних умовах ущільнення.

Висновки. Полістиролбетонні та арболітові суміші належать до в'язкопружних пористих середовищ зі складною механічною поведінкою під час динамічного ущільнення, що зумовлює необхідність індивідуального підходу до налаштування вібраційного обладнання. Полістиролбетон, завдяки поєднанню жорсткої цементної матриці та пружного пінополістиролу, демонструє амплітудно-залежну жорсткість і короткий час релаксації, що дозволяє ефективно застосовувати високочастотне ущільнення за умови, що частота не перевищує релаксаційний потенціал матеріалу. Арболітові суміші, навпаки, характеризуються значною здатністю до деформацій, високим коефіцієнтом демпфування та тривалішими релаксаційними процесами, пов'язаними з гігроскопічністю і пружністю деревного заповнювача. Для опису їхньої поведінки доцільно використовувати модель Максвелла або узагальнену модель Больцмана–Фогеля, які враховують накопичення деформацій та розподіл релаксаційних часів.

У процесі вібраційного ущільнення ефективність досягається за умови узгодження частоти збудження з власною частотою масово-пружної системи «форма – суміш» та контролю величини демпфування, з метою уникнення структурного руйнування або нерівномірного ущільнення. Зростання вмісту пінополістиролу чи деревини потребує коригування режиму ущільнення, оскільки посилюються внутрішні втрати енергії. Таким чином, забезпечення оптимальних параметрів ущільнення для кожного типу легкобетонної суміші потребує поєднання експериментального визначення релаксаційних характеристик із точним налаштуванням частоти та тривалості вібраційного впливу.

Список використаних джерел:

1. Nesterenko M.M. (2013) Doslidzhennia rezhymiv ushchilnennia lehkobetonnykh sumishei na udarno-vibratsiinii ustanovtsi metodom matematychnoho planuvannia eksperymentu [Research of compaction modes of lightweight concrete mixtures on a shock-vibration rig using the method of mathematical experimental planning]. *Tekhnika budivnytstva - Construction engineering*, №31, 19–24. [in Ukrainian].

2. Nazarenko, I. I., Diachenko, O.S. (2019) Eksperymentalni doslidzhennia robochoho protsesu vibratsiinoi ustanovky dlia ushchilnennia betonnykh sumishei zi zminnym rezhymom roboty [Experimental studies of the working process of a vibrating installation for compacting concrete mixtures with a variable operating mode]. *Hirnychi, budivelni, dorozhni ta melioratyvni mashyny - Mining, Construction, Road and Melioration Machines*, № 92, 24–31. [in Ukrainian]. <http://gbdmm.knuba.edu.ua/article/view/182061>
3. Maslov O., Savielov D., Salenko Y., Javadova M. (2022) Theoretical study of the dynamic system «Vibration Platform – Polymer Concrete» stress–strain state. *Proceedings of the 3rd International Conference on Building Innovations (ICBI 2020) : Lecture Notes in Civil Engineering*, Vol. 181, 191–201. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-85043-2_19

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ КОМБІНОВАНОГО ВІБРОАБРАЗИВНОГО ПРОЦЕСУ

Дмитро Бугров, аспірант ¹ (ORCID: 0009-0000-4571-5147),

Богдан Коробко, професор, д.т.н., професор ¹ (ORCID: 0000-0002-9086-3904),

Тетяна Бугрова, доцент, к.т.н., доцент ¹ (ORCID: 0000-0003-2690-4131),

¹ Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», проспект Віталія Грицаєнка 24, 36011, Україна

АНОТАЦІЯ. Наведено отримані експериментальні дані та виконано їх аналіз з метою встановлення енергоефективності комбінованого віброабразивного процесу, що реалізується шляхом одночасної дії вібраційного збурення та обертального руху активного робочого органу. Основну увагу зосереджено на визначенні частки спожитої енергії, яка безпосередньо витрачається на знімання матеріалу з поверхні деталей, та оцінці впливу основних параметрів — амплітуди вібрації, частоти обертання робочої камери та маси середовища на енергетичну ефективність процесу. Проведено заміри потужності споживання як приводу вібростолу так і приводу роторної робочої камери при зміні режимів їх роботи. Отримані результати можуть бути використані для оптимізації конструкції аналогічного обладнання та визначення їх оптимальних режимів роботи.

Ключові слова: віброабразивна обробка; комбінований спосіб; вібропривод; роторна робоча камера; показник енергоефективності; знімання матеріалу

Вступ. Сучасні технології обробки поверхонь вимагають не лише високої якості кінцевого результату, а й ефективного використання енергетичних ресурсів. У контексті загального тренду на енергоощадне виробництво особливої актуальності набуває аналіз енергоефективності технологічних процесів, зокрема віброабразивної обробки, яка широко використовується для фінішного полірування, заокруглення кромek, зняття задилок тощо.

Традиційні віброустановки, незважаючи на свою універсальність, характеризуються незначною ефективністю використання загальної енергії системи для виконання корисної роботи. Це зумовлює необхідність пошуку нових технологічних рішень, які дозволили б покращити використання енергії в зоні обробки.

Аналіз літературних джерел. У роботах [1] зазначено, що механізм знімання матеріалу під час віброобробки зумовлений багаторазовими ударами, ковзанням та тертям частинок абразиву по поверхні деталі, однак лише незначна частка енергії приводів безпосередньо бере участь у формуванні контактної взаємодії.

Окрім дослідження фокусуються на вивченні енергетики віброобробки з позицій математичного моделювання. Зокрема, роботи [2] заклали основи дискретного елементного моделювання (DEM), що дозволяє детально описати мікрovзаємодію частинок. Подальший розвиток отримали моделі з урахуванням ефективної контактної сили, що визначається як результат пружного деформування та тертя при динамічному зіткненні тіл [3].

Водночас у проаналізованих джерелах практично відсутній системний підхід до оцінки енергоефективності такого комбінованого процесу, зокрема у вигляді кількісного аналізу енергоспоживання окремих приводів та їх зв'язку з вихідними параметрами обробки. Більшість моделей зосереджуються на кінематичних і контактних характеристиках без урахування фактичного споживання потужності приводами віброплатформи та обертової камери.

Мета роботи. Метою даного дослідження є оцінка та кількісний аналіз енергоефективності комбінованого віброабразивного процесу, який реалізується шляхом поєднання вібраційного

збурення та обертального руху активного робочого органу для встановлення закономірностей зміни енергоспоживання вібропривода та привода роторної робочої камери в залежності від режимів роботи.

Виклад основного матеріалу. У роботі досліджується комбінований віброабразивний процес, у якому реалізується одночасна дія вібраційного збурення та обертального руху робочої камери. Завдяки додатковій дії відцентрових сил створюються сприятливі умови для покращення циркуляції абразивних тіл, підвищення щільності контактної взаємодії та інтенсифікації процесу.

Експериментальні дослідження проводились на спеціально розробленій віброустановці зображеній на рис. 1 в лабораторії КБ «Вібротехніка» кафедри галузевого машинобудування Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка». Сплановано та реалізовано трифакторний експеримент другого порядку побудований на основі центрально-композиційного плану з метою встановлення залежності питомої швидкості знімання матеріалу від режимів роботи обладнання.

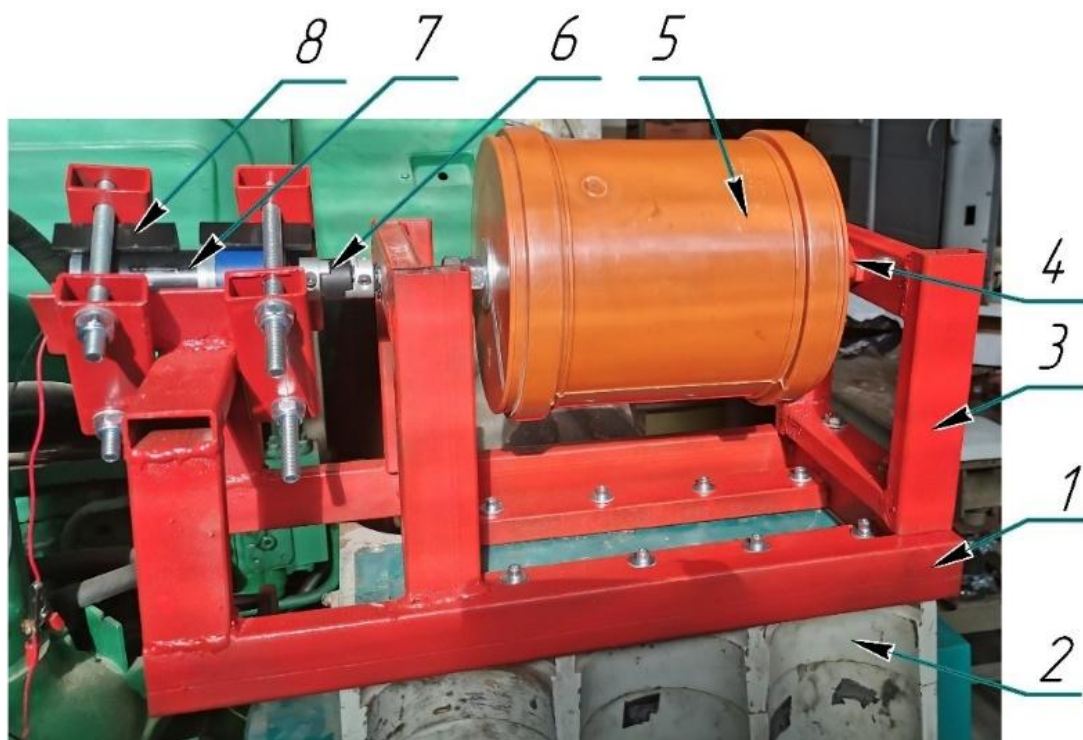


Рис.1. Загальний вид виготовленої дослідної віброустановки:

1 – рама; 2 – віброплатформа верстату ВІО-8; 3 – знімна стійка рами; 4 – підшипник; 5 – робоча камера (обертовий барабан); 6 – муфта; 7 – електродвигун барабана; 8 – елементи кріплення електродвигуна.

З метою комплексної оцінки ефективності запропонованого комбінованого методу віброабразивної обробки було додатково проведено заміри споживаної окремо для вібробуджувача P_1 та двигуна, що забезпечує обертання робочої камери P_2 .

Запропонований показник енергоефективності η_e , що характеризує, наскільки ефективно обладнання використовує загальну потужність:

$$\eta_e = \frac{V_p}{P_\Sigma}, \left[\frac{\text{мг}}{\text{кг} \cdot \text{год} \cdot \text{Вт}} \right], \quad (1)$$

$$P_\Sigma = P_1 + P_2, \quad (2)$$

Залежність швидкості знімання матеріалу визначалась експериментально від трьох незалежних факторів - амплітуди вібрацій A , частота обертання камери W , маса середовища M :

$$V_p = f(A, W, M) \quad (3)$$

Тоді показник енергоефективності можна розглядати як частинну похідну продуктивності від енергії, тобто:

$$\Delta\eta_e = \frac{f(A_2, W_2, M_2) - f(A_1, W_1, M_1)}{[P_1(A_2, M_2) + P_2(W_2, M_2)] - [P_1(A_1, M_1) + P_2(W_1, M_1)]} \quad (4)$$

В межах коли відбувається лише зміна W при фіксованих A і M це рівняння спрощується до:

$$\Delta\eta_e = \frac{V_{P_{W2}} - V_{P_{W1}}}{P_{W2} - P_{W1}} \quad (5)$$

Таблиця 1.

		Значення споживаної потужності приводами установки					
		Частота обертання камери, об/хв					
Амплітуда коливань, мм	Маса компонентів, кг	36		70		104	
		P ₁ , Вт	P ₂ , Вт	P ₁ , Вт	P ₂ , Вт	P ₁ , Вт	P ₂ , Вт
1	3,2	765	3,2	766	7,8	765	22,5
	4,8	774	5,1	778	11,5	779	38,7
	6,4	782	8,6	782	15,3	785	52,3
2	3,2	780	3,2	778	7,2	782	21,1
	4,8	791	5,0	790	10,5	791	38,2
	6,4	803	7,9	803	14,1	804	51,0
3	3,2	837	3,0	839	6,9	838	20,8
	4,8	846	4,3	841	10,3	840	36,3
	6,4	872	7,0	877	12,1	877	49,2

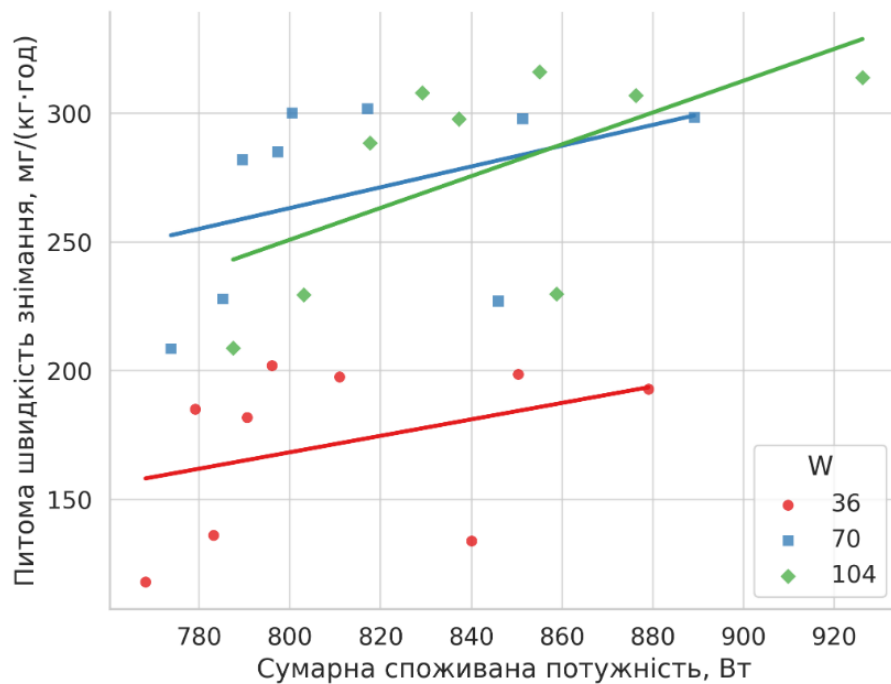


Рис.2. Графік залежності швидкості знімання від потужності при певних частотах обертання робочої камери

Встановлено, що при збільшенні частоти обертання камери зростає також і показник η_e від 0,21 до 0,34 мг/(кг·год·Вт), що свідчить про поліпшення умов контактої взаємодії частинок при обертанні камери. Потужність обертального приводу P_2 істотно зростає з переходом до вищих швидкостей: від 5,3 Вт до 36,7 Вт. При цьому показник η_e знижується в чотири рази — з 35,62 до 8,16 мг/(кг·год·Вт). Це означає, що енергія, витрачена на обертання камери, стає менш продуктивною при збільшенні частоти обертання, і кожен додатковий ват забезпечує все менший приріст продуктивності знімання.

Проведений аналіз по побудованому на рис. 2 графіку встановив, що перехід від мінімальної

(36 об/хв) до середньої частоти обертання камери (70 об/хв) є найбільш енергоефективним. Незначне збільшення потужності (≈ 6 Вт) сприяє суттєвому зростанню швидкості знімання (на 98,17 мг/(кг·год)), що свідчить про ефективніше використання енергії, яка йде безпосередньо на знімання матеріалу. Водночас подальше підвищення частоти обертання камери (від 70 до 104 об/хв) не супроводжується пропорційним зростанням продуктивності. Зафіксовано низьку енергоефективність такого переходу, оскільки суттєве збільшення споживаної потужності (≈ 27 Вт) забезпечує приріст питомої швидкості знімання лише на 7,83 мг/(кг·год). Це свідчить про нераціональне використання енергії у високошвидкісному режимі. Встановлено, що оптимальним є режим комбінованої віброабразивної обробки з амплітудою коливань близько 2 мм, середньою масою завантаження 4,8–5,6 кг та частотою обертання камери в межах 70–90 об/хв. Саме цей діапазон режимів дозволяє досягти оптимального балансу між питомою швидкістю знімання матеріалу та споживаною потужністю обладнання.

У розглянутій установці застосування режимів з частотою обертання роторної камери понад 100 об/хв є економічно недоцільним, оскільки значний приріст споживаної потужності не забезпечує пропорційного приросту швидкості знімання матеріалу.

Висновки. У даній роботі проведено аналіз залежності швидкості знімання матеріалу від енерговитрат обладнання для комбінованого віброабразивного процесу.

Отримані експериментальні дані показали, що потужність вібропривода P_1 зростає переважно зі збільшенням амплітуди коливань, тоді як потужність привода обертання камери P_2 найбільше залежить від частоти обертання. Введений показник енергоефективності η_e , що визначається як відношення швидкості знімання матеріалу до сумарної потужності приводів. Він може бути використаний як критерій для оптимізації режимів роботи, а також для обґрунтування технологічної доцільності впровадження додаткових джерел енергії або зміни параметрів обробки.

Встановлено, що максимальні значення η_e спостерігаються при поєднанні параметрів середніх значеннях амплітуди та частоти обертання. Таке непропорційне зростання ефективності від спожитої енергії свідчить про складну взаємодію динамічних факторів з циркуляцією середовища у робочій камері.

Список використаних джерел:

1. Domblesky, J. P., Evans, C. J., & Evans, J. W. (2006). A process model for surface material removal in vibratory bowls. In *SUR/FIN Proceedings* (pp. 81–84). National Association for Surface Finishing.
2. Buhrov D. Yu. (2024). *Analiz doslidzhen ta suchasnykh metodiv modeliuvannia protsesiv vibroabrazivnoi obrobky detalei* [Analysis of research and modern methods of modeling processes of vibroabrasive machining of parts]. *Visnyk KrNU imeni Mykhaila Ostrohradskoho - Bulletin of Mykhailo Ostrohradskyi KrNU*, 5/2024, (148), 78–82. <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2024.5.11>
3. Hashimoto, F., Johnson, S. P., & Chaudhari, R. G. (2016). Modeling of material removal mechanism in vibratory finishing process. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 65(1), 325–328. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.04.011>

ПОРІВНЯЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВИЗНАЧЕННЯ ПОТУЖНОСТІ ОДНОПОРШНЕВОГО РОЗЧИНОНАСОСА З КОМБІНОВАНИМ КОМПЕНСАТОРОМ ЗБІЛЬШЕНОГО ОБ'ЄМУ З РІЗНИМИ ТИПАМИ ПРИВОДІВ

Микола Шаповал, доцент, к.т.н., доцент ¹ (ORCID: 0000-0002-6943-7687),

Вадим Михайлик, аспірант ¹ (ORCID: 0009-0003-2435-8592),

¹ Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», проспект Віталія Грицаєнка 24, 36011, Україна

АНОТАЦІЯ. Проведено аналіз роботи поршневих насосів на предмет зменшення енерговитрат. Розглянуто особливості енергетичних витрат розчинонасосом з різними типами приводів. Теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено доцільність застосування у конструкції розчинонасоса гідравлічного приводу. Встановлено, які фактори впливають на енергетичні витрати розчинонасоса. Доведено, що на характер зміни тиску, що залежить від місцевих опорів як в гідравлічній частині розчинонасоса, так і трубопроводах, прямо пропорційно впливає на енерговитрати розчинонасосом, які визначаються відповідно залежності на основі рівняння Бернуллі. Математично обґрунтовано енергетичні витрати за цикл роботи розчинонасоса, які прямо пропорційно залежать від закону руху робочого органа розчинонасоса. Експериментально встановлено, що на енергетичні витрати впливають такі фактори, як рухомість розчину, що перекачується, тиск подачі розчину, ступінь пульсацій тиску подачі розчину. Теоретично та експериментально доведено доцільність застосування гідравлічного приводу по відношенню до електромеханічного завдяки зменшенню енерговитрат.

Ключові слова: розчинонасос; енерговитрати; гідравлічний привод; рухомість розчину; рівняння Бернуллі; закон руху робочого органа

Вступ. Механізація опоряджувальних робіт, у сучасному будівництві вимагає підвищення продуктивності та дає можливість значно збільшити змінне напруження на одного штукатура без втрати якості. Застосування розчинонасосів у галузях народного господарства усе розширюються. Значимий ефект та якість застосування розчинонасосів виникають під час подачі та укладання цементно-піщаних розчинів, а також під час виконання наливних стяжок підлог, компресорного чи безкомпресорного нанесення на оздоблювальні поверхні, заповнення під тиском зниженої рухомості розчинами стиків та швів залізобетонних конструкцій, для подачі розчинів при великому фронті робіт.

Аналіз літературних джерел. Головною особливістю розчинонасосів, зручних для механізації штукатурних робіт [1, 2], є можливість швидкої зміни його продуктивності за сигналом штукатура. У приміщеннях зі складним плануванням, як на відкритих поверхнях, так і в стиснутих умовах, неможливо проводити оштукатурювання з однаковою швидкістю, тому особливо доцільною є наявність плавного регулювання подачі.

Оскільки всередині насоса є пристрій для плавної зміни його продуктивності, потужність його приводу можна зменшити. Це пояснюється тим, що його можна застосовувати під час транспортування більш густих розчинів або при подачі розчинів на значну висоту, коли необхідно забезпечити особливо високий тиск, при цьому продуктивність насоса буде знижена. Оперативне регулювання продуктивності насосів [1, 2, 3] є важливою умовою впровадження комплексних технологій механізації та автоматизації малоопераційного оштукатурювання поверхонь.

Мета роботи. Метою дослідження є визначення та порівняльний аналіз енерговитрат однопоршневих розчинонасосів з різними типами приводу та комбінованого компенсатора нової практичної конструкції для забезпечення зростання ефективності їх роботи за рахунок зниження ступеня пульсацій тиску подачі по трубопроводу, підвищенні продуктивності і об'ємного ККД.

Матеріали і методи. Основними матеріалами для аналізу є науково-технічна та довідкова література про вітчизняні та зарубіжні зразки сучасних розчинонасосів. Основними методами, що використовуються в роботі є використання розрахунків на основі математичного аналізу та аналітичної механіки. Для виконання розрахунків та побудови графіків використовується програмне забезпечення Mathcad, Microsoft Excel.

Виклад основного матеріалу. Експериментальні трьохфакторні дослідження (табл.1) зі споживання потужності на протязі циклу роботи розчинонасоса з комбінованим компенсатором збільшеного об'єму (рис.1) та гідроприводного розчинонасоса з комбінованим компенсаторами

збільшеного об'єму (рис. 2) проводилися з використанням спеціального вимірювального електрообладнання при перекачуванні розчинів різної рухомості.

Аналіз графічних результатів свідчить про те, що витрата потужності на протязі циклу роботи розчинонасосів прямо пропорційна тиску розчину і зворотно пропорційна ККД. За порівнянням як експериментальних, так і теоретичних залежностей (рис. 3) суттєвий вплив на витрату потужності до максимальних значень здійснюють пульсації тиску розчину. Зменшення витрат потужності спостерігається у гідроприводного розчинонасоса з комбінованим компенсатором збільшеного об'єму (рис. 3) і сягає біля 21%. Це пояснюється зниженням пульсацій тиску розчину за рахунок руху поршня розчинонасоса з постійною швидкістю в такті нагнітання та ефективного спрацювання комбінованого компенсатора збільшеного об'єму.

Аналогічним чином для дослідження впливу раніше вказаних факторів на витрати потужності розчинонасоса з різними приводами знайдено рівняння регресії відповідно якому побудовані графічні залежності (рис. 4).

Для розчинонасоса з комбінованим компенсатором пульсації тиску одержано рівняння регресії в кодовому вигляді, згідно з яким побудовано графічні залежності (рис. 4, а, б, в, г)

$$Y_3 = 3,321 + 0,102 \cdot X_1 - 0,021 \cdot X_3 + 0,023 \cdot X_4 - 0,026 \cdot X_2^2 + 0,311 \cdot X_3^2 + 0,338 \cdot X_4^2 + 0,046 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0,054 \cdot X_2 \cdot X_4 + 0,07 \cdot X_3 \cdot X_4 \quad (1)$$

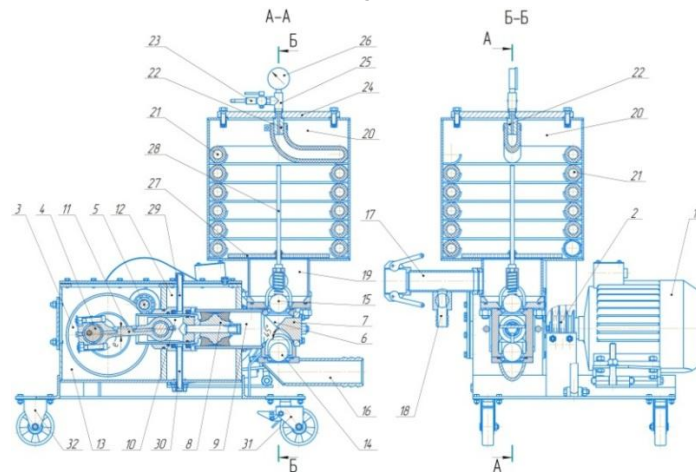


Рис.1. Однопоршневий розчинонасос з комбінованим компенсатором збільшеного об'єму:

1 – електродвигун; 2 – клинопасова передача; 3 – зубчасте колесо; 4 – кривошипний вал; 5 – вал-шестерня; 6 – всмоктувальна камера; 7 – спеціальна циліндрична вставка; 8 – поршень; 9 – робочий циліндр; 10 – повзун; 11 – шатун; 12 – камера; 13 – корпус редуктора; 14, 15 – всмоктувальний та нагнітальний підпружинений кульові клапани; 16, 17 – всмоктувальний і нагнітальний патрубки; 18 – кран зниження тиску; 19 – нагнітальна камера; 20 – циліндрична камера; 21 – замкнена камера; 22 – штуцер вузла підкачки повітря; 23 – ніпель; 24 – кришка; 25 – кран; 26 – манометр; 27 – поплавков-обмежувач; 28 – направляючий стрижень; 29, 30 – каналні патрубки; 31, 32 – пара коліс.

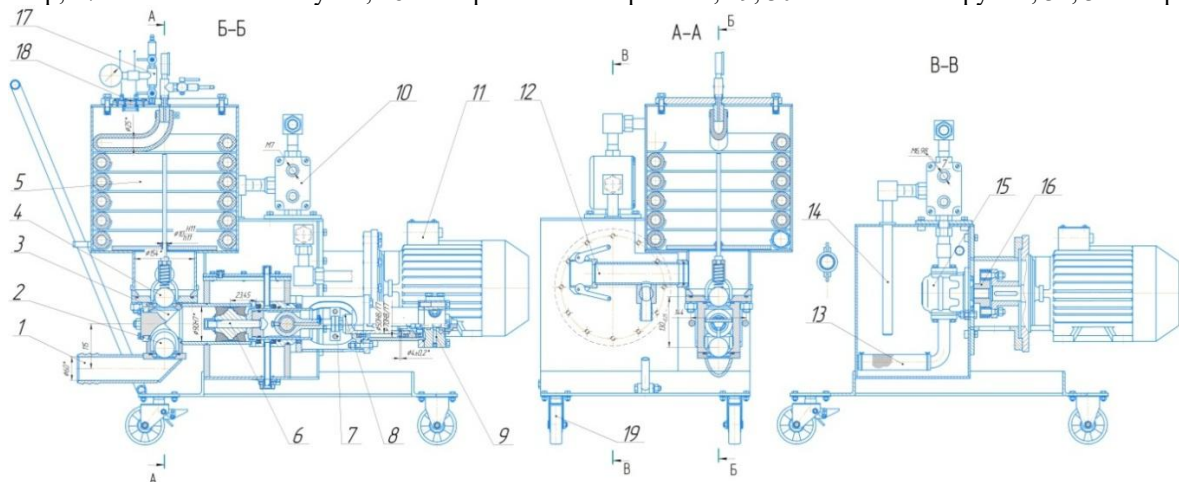


Рис. 2. Конструктивна схема однопоршневого гідроприводного розчинонасоса з комбінованим компенсатором збільшеного об'єму:

1, 12 – усмоктувальний та нагнітальний патрубков; 2, 4 – всмоктувальний та нагнітальний підпружинений кульові клапани; 3

– усмоктувальна камера; 5 – комбінований компенсатор; 6 – поршень з направляючим плунжером; 7 – хомут гідравлічний привідний циліндр з розподільником; 8 – гідроциліндр з поршнем і штоком; 9 – золотниковий розподільник; 10 – регулятор подачі гідравлічної рідини; 11 – електродвигун; 13 – фільтр мастильної рідини; 14 – патрубок скидання гідравлічної рідини; 15 – шестерневий гідравлічний насос; 16 – муфта втулково-пальцева; 17 – редуктор підкачки повітря; 18 – скляне віконце з підсвічуванням

Таблиця 1

Параметри, які впливають на ефективність роботи розчинонасосу та їх інтервали варіювання

№	Найменування	Позначення	Розмірність	Верхній рівень (+)	Нульовий рівень (0)	Дробний рівень (-0,5)	Нижній рівень (-)	Інтервал варіювання
X ₁	Рухомість розчину	П	см	10	9	8,5	8	1
X ₂	Середній тиск подачі розчину	P	МПа	2,5	1,5	–	0,5	1
X ₃	Об'єм повітря у компенсаторі приведений до атмосферних умов	V _{комп}	дм ³	41	47	–	65	75

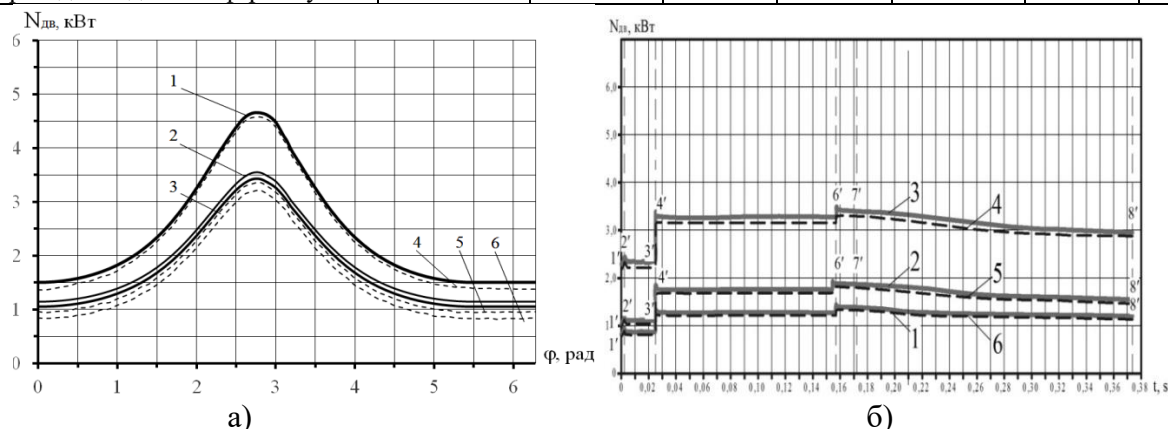


Рис. 3. Графічні теоретичні та експериментальні залежності потужності, що споживається на протязі циклу роботи розчинонасоса при різних рухомостях будівельного розчину:

- а – розчинонасоса з комбінованим компенсатором збільшеного об'єму; б – гідроприводного розчинонасоса з комбінованим компенсатором збільшеного об'єму
 – теоретичні 1 – при П8; 2 – при П10; 3 – при П12;
 – експериментальні 4 – при П8; 5 – при П10; 6 – при П12

Після заміни значень факторів в кодовому вигляді на дійсні рівняння регресії відображає зв'язок між потужністю $P_{\text{ов}}$ розчинонасоса та вихідними факторами, вплив яких досліджується

$$\begin{aligned}
 Y_3 = & 3,321 + 0,102 \cdot \left(\frac{P-10}{2} \right) - 0,021 \cdot \left(\frac{V_{\text{комп}}-47}{17} \right) + 0,023 \cdot \left(\frac{\beta-45}{15} \right) - 0,026 \cdot \left(\frac{p-1,5}{1} \right)^2 + \\
 & + 0,311 \cdot \left(\frac{V_{\text{комп}}-47}{17} \right)^2 + 0,338 \cdot \left(\frac{\beta-45}{15} \right)^2 + 0,046 \cdot \left(\frac{p-1,5}{1} \right) \cdot \left(\frac{V_{\text{комп}}-47}{17} \right) + \\
 & 0,054 \cdot \left(\frac{p-1,5}{1} \right) \cdot \left(\frac{\beta-45}{15} \right) + 0,07 \cdot \left(\frac{V_{\text{комп}}-47}{17} \right) \cdot \left(\frac{\beta-45}{15} \right)
 \end{aligned} \quad (2)$$

Для гідроприводного розчинонасоса з комбінованим компенсатором збільшеного об'єму одержано рівняння регресії в кодовому вигляді, відповідно якому побудовані графічні залежності, а на (рис. 4, д, е, є, ж) приведені графічні залежності від факторів, що досліджуються

$$\begin{aligned}
 Y_4 = & 3,572 + 0,091 \cdot X_1 + 0,188 \cdot X_1^2 + 0,327 \cdot X_2^2 + 0,322 \cdot X_3^2 + 0,261 \cdot X_4^2 + \\
 & + 0,013 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,038 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0,039 \cdot X_2 \cdot X_4 + 0,054 \cdot X_3 \cdot X_4
 \end{aligned} \quad (3)$$

Натуральними значеннями факторів рівняння (3) має вигляд

$$\begin{aligned}
Y_4 = & 3,572 + 0,091 \cdot \left(\frac{\Pi - 10}{2} \right) + 0,188 \cdot \left(\frac{\Pi - 10}{2} \right)^2 + 0,327 \cdot \left(\frac{p - 1,5}{1} \right)^2 + \\
& + 0,322 \cdot \left(\frac{V_{\text{комп}} - 47}{17} \right)^2 + 0,261 \cdot \left(\frac{\beta - 45}{15} \right)^2 + 0,013 \cdot \left(\frac{\Pi - 10}{2} \right) \cdot \left(\frac{p - 1,5}{1} \right) + \\
& + 0,038 \cdot \left(\frac{p - 1,5}{1} \right) \cdot \left(\frac{V_{\text{комп}} - 47}{17} \right) + 0,039 \cdot \left(\frac{p - 1,5}{1} \right) \cdot \left(\frac{\beta - 45}{15} \right) + 0,054 \cdot \left(\frac{V_{\text{комп}} - 47}{17} \right) \cdot \left(\frac{\beta - 45}{15} \right)
\end{aligned} \quad (4)$$

Результати експериментальних досліджень (рис. 4, а, д) показують, що зменшення витрат потужності спостерігається при зростанні рухомості розчину, за рахунок зменшення опору просування по трубопроводу та зменшенню зворотних витоків через клапана. Графічні залежності експериментальних досліджень (рис. 4, б, е) показують, що витрати потужності прямо пропорційні зростанню тиску розчину, особливо спостерігається зростання витрати потужності при підвищенні тиску в діапазоні 1,5 – 2,5 МПа. Збільшення приведенного об'єму повітря компенсатора (рис. 4, в, є), який впливає на зменшення ступеня пульсацій тиску розчину в свою чергу зменшує витрати потужності. Результати експериментальних досліджень (рис. 4, г, ж) вказують на те, що зведення до мінімуму витрат потужності відбувається при куті нахилу 45° спеціальної вставки у всмоктувальній камері яка зменшує зворотні витоки через всмоктувальний клапан, і ти самим зменшує ступінь пульсацій тиску.

Зменшення витрат потужності на близько 1,2 кВт у гідроприводного розчинонасоса з комбінованим компенсатором збільшеного об'єму пов'язано з меншим рівнем ступеня пульсацій тиску подачі.

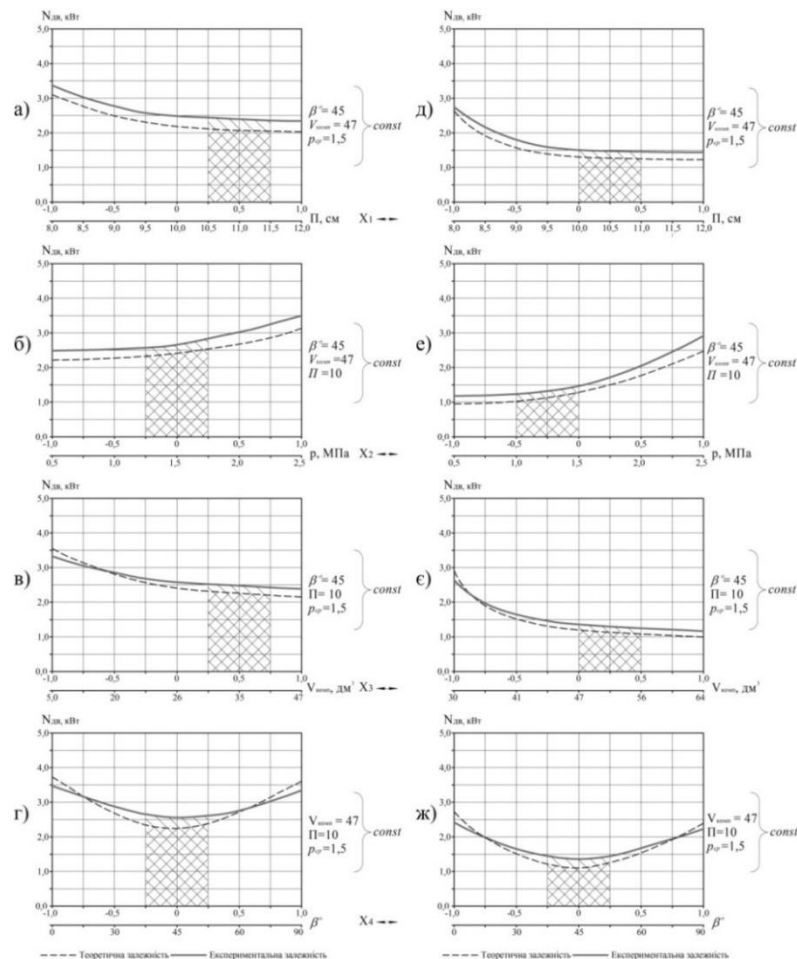


Рис. 4. Графічні залежності потужності:

а), б), в), г) з комбінованим компенсатором збільшеного об'єму; д), е), є), ж) гідроприводний з комбінованим компенсатором збільшеного об'єму; а), д) від рухомості X_1 розчину; б), е) від та середнього тиску розчину X_2 ; в), є) від приведенного об'єму компенсатора; г), ж) від кута нахилу спеціальної вставки X_3 , що розташована у всмоктувальній камері

Обговорення. Аналіз експериментальних та розрахункових результатів досліджень (рис. 3.10) свідчить про те, що показник потужності для усіх випадків у гідроприводного розчинонасоса з комбінованим компенсатором збільшеного об'єму менший в порівнянні з розчинонасосом, який оснащено електромеханічним приводом комбінованим з комбінованим компенсатором збільшеного об'єму. Діапазони раціональних технологічних параметрів (рис. 3.10) наступні $X_1 = 10...11$ см; $X_2 = 1,0...1,5$ МПа; $X_3 = 47...56$ дм³; $X_4 = 37,5...52,5^\circ$.

Висновки. Таким чином, можливо констатувати, що гідроприводний розчинонасос удосконаленої конструкції з комбінованим компенсатором збільшеного об'єму при аналогічних умовах роботи розчинонасосів має наступний ряд переваг перед розчинонасосом, який оснащено електромеханічним приводом комбінованим з комбінованим компенсатором збільшеного об'єму: зменшився ступінь пульсації тиску розчину на 15%; збільшилася продуктивність на 23%; знизилися витрати потужності на 21%.

Розбіжність результатів проведених експериментальних і теоретичних досліджень визначення потужності складає 5 – 10%.

Список використаних джерел:

1. Onyshchenko, O. H., Drachenko, B. F., Holovkin, O. V. (1998) *Mekhanizatsiia oporiadzhuvannykh robot u budivnytstvi : navchalnyi posibnyk [Mechanization of finishing works in construction: a textbook]*. Kyiv: Urozhai. [in Ukrainian].
2. Korobko B.O. (2016) *Osnovy stvorennia enerhoefektyvnykh tekhnologichnykh komplektiv obladnannia dlia shtukaturnykh robot: dysertatsiia d-ra tekhn. nauk [Fundamentals of creating energy-efficient technological sets of equipment for plastering works: dissertation of Dr. Tech. Sciences J. Kharkiv. [in Ukrainian]*.
3. Korobko, B., Khomenko, I., Shapoval, M., Virchenko, V. (2022) Solution Pressure Pulsations into the Pipeline Size Determination in Dependence on Constructive Parameters of Valve Units of Mortar Pump. *Lecture Notes in Civil Engineering* this link is disabled, 181, 225–243. <http://reposit.nupp.edu.ua/handle/PoltNTU/9321>

ВІБРОДІАГНОСТИКА МАШИН ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

Сергій Орищенко, доцент, к.т.н., доцент ¹ (ORCID: [0000-0002-5359-5285](https://orcid.org/0000-0002-5359-5285)),

¹ Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних сил 31, 03037, Україна

АНОТАЦІЯ. Розглянуто принципи та методи вібродіагностики машин технологічного призначення. Проаналізовано основні джерела вібрацій, типи вібраційних сигналів та сучасні технічні засоби для їх збору й обробки. Наведено практичні аспекти застосування вібродіагностики для оцінки технічного стану обладнання та обґрунтовано її роль у системі обслуговування за технічним станом.

Ключові слова: вібродіагностика; технічне обслуговування; машинобудування; спектральний аналіз; технологічне обладнання; вібрація.

Вступ. Машини технологічного призначення є основою виробничих процесів у промисловості. Їхня безперебійна робота напругу впливає на продуктивність, якість продукції та економічну ефективність виробництва. В умовах інтенсифікації навантажень і зростаючого зносу обладнання зростає актуальність діагностики технічного стану. Серед сучасних методів технічного діагностування особливе місце займає вібродіагностика — метод аналізу коливань машин, який дозволяє своєчасно виявляти дефекти та запобігати аваріям.

Аналіз літературних джерел. Проблематика вібродіагностики машин технологічного призначення активно розглядається в сучасній науково-технічній літературі. Вивчення джерел дозволяє зробити висновок про високий рівень актуальності теми як у контексті теоретичних досліджень, так і в прикладному аспекті. Таким чином, аналіз літературних джерел [1,2,3] свідчить про існування усталеної наукової бази, а також про постійну модернізацію методів та засобів вібродіагностики. Сучасні тенденції розвитку галузі спрямовані на автоматизацію процесів діагностики, підвищення точності і достовірності результатів, а також інтеграцію в систему цифрового управління технічним обслуговуванням обладнання. У фундаментальних працях,

зокрема у підручнику [4], докладно описано принципи побудови систем діагностики, особливості вібраційного контролю та методи виявлення типових несправностей. Значну увагу автор приділяє вібраційним параметрам та класифікації дефектів відповідно до характеру вібраційного сигналу. У роботі [5,6] надається детальний огляд методів спектрального аналізу та описуються практичні приклади застосування вібраційного моніторингу в промисловості. Автор обґрунтовує ефективність аналізу обвідної для діагностики підшипників і демонструє впровадження систем у великих виробництвах. Міжнародні стандарти, зокрема ISO 10816-1 [7], є базою для інтерпретації результатів вібродіагностики. Стандарт визначає граничні рівні вібрацій залежно від типу машини, потужності та конструктивних особливостей. Це дозволяє уніфікувати підхід до оцінки технічного стану машин на міжнародному рівні. Сучасні дослідження, такі як праці [8; 9], акцентують увагу на інтеграції вібродіагностики з іншими методами технічної діагностики (термографія, ультразвук, електроаналіз) у рамках цифрових платформ моніторингу. Зокрема, розглядаються аспекти обробки вібраційних сигналів за допомогою штучного інтелекту та нейронних мереж. Також у вітчизняних і зарубіжних публікаціях [10] обговорюється проблема адаптації вібродіагностики до умов важкодоступного обладнання, нестабільних режимів роботи та варіативних навантажень.

Мета роботи. Метою даної роботи є дослідження методів вібродіагностики технологічного обладнання з метою своєчасного виявлення технічних несправностей, підвищення надійності та ефективності експлуатації машин, а також обґрунтування доцільності впровадження систем моніторингу технічного стану в умовах сучасного виробництва.

Матеріали і методи. У межах дослідження використовувались розрахункові дані, отримані під час моделювання діагностики машин технологічного призначення. Основні **методи дослідження** включали **спектральний аналіз** (швидке перетворення Фур'є) - для розкладання сигналу в частотну область та ідентифікації характерних частот дефектів. **Аналіз віброшвидкості** — для загальної оцінки рівня вібрації відповідно до норм **ISO 10816-3**. **Аналіз** застосовувався для виявлення дефектів у підшипниках кочення, зокрема точкового зносу або тіл кочення. **Моделювання** дозволяло відстежувати зміну параметрів вібрацій у часі для прогнозування технічного стану вузлів.

Виклад основного матеріалу. Вібродіагностика є одним із найбільш ефективних методів контролю технічного стану машин технологічного призначення. На відміну від традиційного планово-попереджувального обслуговування, вона дозволяє здійснювати технічний контроль у режимі реального часу та виявляти дефекти на ранніх стадіях їх розвитку. У процесі дослідження було проведено вібродіагностичний контроль машини, що працює в умовах змінного навантаження. Основну увагу приділено діагностиці підшипникових вузлів, стану з'єднань, а також можливому розцентруванню та дисбалансу обертових елементів.

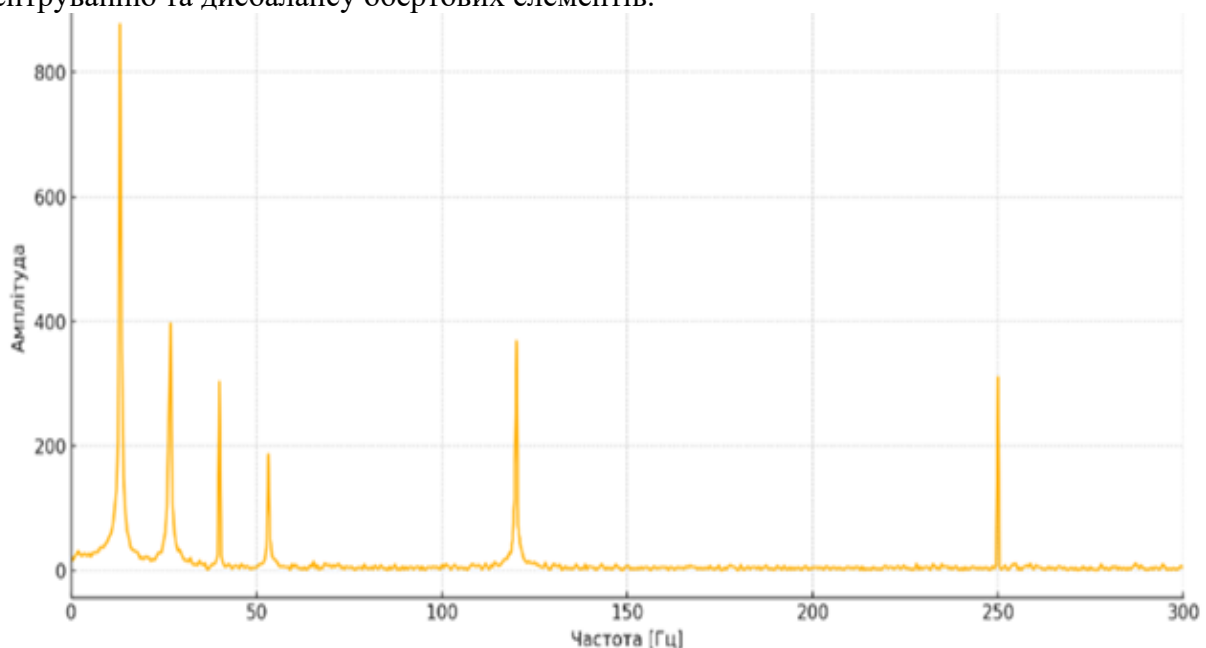


Рис 1. Спектр вібрацій підшипника, 800 об/хв

На рис.1. наведено спектр вібрацій підшипника при 800 об/хв (13.33 Гц) у горизонтальному напрямку. Видно основну частоту (13.33 Гц), її гармоніки (26.66, 40, 53.33 Гц), а також високочастотні піки (120 і 250 Гц), які можуть вказувати на потенційні дефекти підшипника. При нижчих обертах гармоніки стають щільнішими, а високочастотні компоненти частіше виділяються на фоні основного сигналу. Щоб побудувати спектр вібрацій підшипника у горизонтальному напрямку при 1500 об/хв (що відповідає 25 Гц), потрібно врахувати основну гармоніку: частота обертання, гармоніки другого і третього порядку, можливі частоти, характерні для дефектів підшипників. Ці частоти залежать від параметрів підшипника (кількість тіл кочення, кута контакту, діаметр тощо).

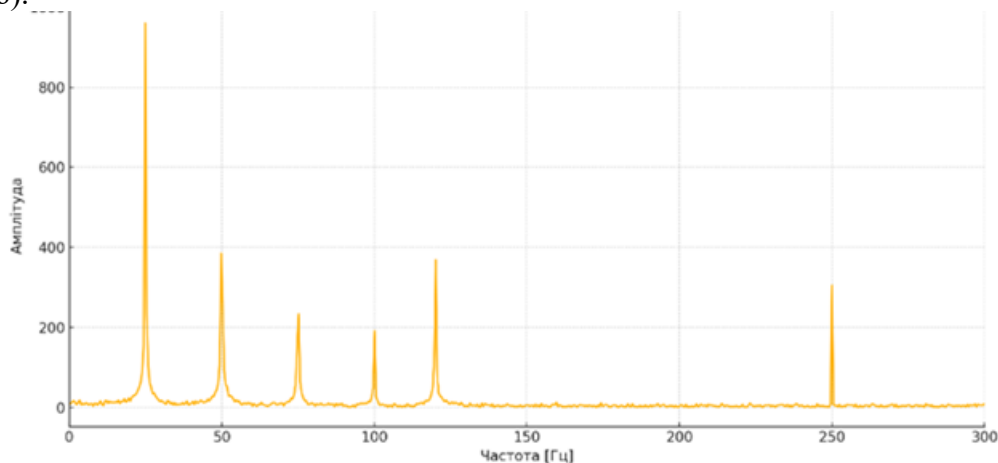


Рис 2. Спектр вібрацій підшипника, 1500 об/хв

На рис.2. наведено спектр вібрацій підшипника при 1500 об/хв у горизонтальному напрямку. Видно основну частоту 25 Гц, її гармоніки (50, 75, 100 Гц), а також високочастотні піки (120 і 250 Гц), які можуть свідчити про дефекти підшипника (наприклад, пошкодження доріжки кочення або тіла кочення).

Під час діагностики основну оцінку технічного стану здійснюється за показником віброшвидкості в діапазоні 10–1000 Гц, що відповідає вимогам стандарту ISO 10816-3 для машин з потужністю до 300 кВт. Рівень вібрації порівнювався з гранично допустимими значеннями для конкретного класу машин. Значення віброшвидкості, які перевищували норму, були зафіксовані із зношеними підшипниками та валах з легким дисбалансом. Це підтверджувалося як візуальними спостереженнями, так і спектральним аналізом.

За допомогою перетворення Фур'є було ідентифіковано характерні частоти дефектів, частоти обертання вала; частоти, що відповідають дефектам у підшипниках; гармонійні частоти, зумовлені дисбалансом.

Наявність піків на частотах, характерних для зовнішнього кільця підшипника, свідчила про локальні дефекти. Застосування фільтра дозволило виявити удари та коливання, які не фіксуються традиційним способом. Це особливо ефективно для виявлення початкових стадій зносу тіл кочення підшипників. Спостереження за динамікою зміни вібраційного сигналу впродовж певного часу дало можливість побудувати прогноз деградації стану обладнання. Поступове зростання амплітуди коливань підтвердило необхідність заміни одного з підшипників.

Обговорення. Таким чином, проведений аналіз показав, що вібродіагностика дозволяє точно локалізувати несправність; найбільш інформативним є комплексний підхід: поєднання віброшвидкості та спектрального аналізу; своєчасне втручання на основі діагностики дозволяє знизити ризик аварійних зупинок і продовжити ресурс машин.

Висновки. Проведене вібродіагностичне теоретичне обстеження машини, що працює в умовах змінного навантаження, підтвердило ефективність використання спектрального аналізу для виявлення дефектів на ранніх стадіях. Аналіз спектрів вібрацій при різних частотах обертання (800 об/хв і 1500 об/хв) дозволив ідентифікувати характерні гармоніки та високочастотні піки, що вказують на наявність потенційних дефектів у підшипникових вузлах. Наявність піків на високих

частотах (120 і 250 Гц), а також гармонік основної частоти обертання свідчить про знос елементів підшипника, можливий дисбаланс. Вимірювання віброшвидкості відповідно до стандарту ISO 10816-3 дозволило класифікувати технічний стан машини, а перевищення гранично допустимих значень — своєчасно виявити критичні вузли. Застосування перетворення Фур'є та фільтрації сигналу забезпечило високу чутливість діагностики до локальних дефектів, які важко виявити традиційними методами. Динамічний аналіз зміни параметрів вібраційного сигналу в часі дав змогу прогнозувати подальше зношування підшипника та обґрунтувати доцільність його заміни з метою недопущення аварійної зупинки обладнання. **Загалом**, результати дослідження підтверджують, що вібродіагностика є надійним інструментом моніторингу технічного стану машин і дозволяє своєчасно виявляти дефекти, оптимізуючи технічне обслуговування та підвищуючи надійність експлуатації обладнання.

Список використаних джерел:

1. Bilyk, V. S. (2015). *Tekhnichna diahnostryka ta nadiinist mashyn* [Technical diagnostics and reliability of machines]. Ternopil: TNTU imeni I. Puliuia. [in Ukrainian].
2. Koval, S. M., Diachenko, M. O. (2020). *Vibratsiina diahnostryka rotornykh mashyn: metody ta zasoby* [Vibration diagnostics of rotary machines: methods and means]. Kyiv: Instytut tekhnichnoi diahnostryky. [in Ukrainian].
3. Myhal, V. D. (2007) *Osnovy tekhnichnoi diahnostryky avtomobiliv. Aparatni zasoby vibratsiinoho diahnostuvannia* [Fundamentals of technical diagnostics of automobiles. Hardware tools for vibration diagnostics]. Kremenchuk: KrNU. [in Ukrainian].
4. Shvets, V. M., Kravchenko, V. I., Lytvynenko, V. S. (2017). *Diahnostuvannia tekhnichnoho stanu mashyn i obladdnannia* [Diagnostics of the technical condition of machines and equipment]. Kharkiv: NTU "KhPI". [in Ukrainian].
5. Mobley, R. K. (2002). *An Introduction to Predictive Maintenance*. 2nd ed. Burlington: Elsevier, 368 p.
6. Harris, C. M., & Piersol, A. G. (Eds.). (2010). *Harris' Shock and Vibration Handbook*. 6th ed. New York: McGraw-Hill, 1800 p.
7. ISO - International Organization for Standardization. <https://www.iso.org>.
8. Scheffer, C., & Girdhar, P. (2004). *Practical Machinery Vibration Analysis and Predictive Maintenance*. Oxford: Elsevier, 272 p.
9. Randall, R. B. (2011) *Vibration-based Condition Monitoring: Industrial, Aerospace and Automotive Applications*. Wiley Online Library.
10. McFadden, P. D., & Smith, J. D. (1984) Model for the vibration produced by a single point defect in a rolling element bearing. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 96, No. 1, 69-82.

ПЕРСПЕКТИВНИЙ ВІБРОУДАРНИЙ ПРИСТРІЙ ДЛЯ РОЗВАНТАЖЕННЯ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

Олена Гнатюк, викладач вищої категорії ¹(0000-0002-9432-5310),

Денис Гнатюк, викладач спеціальних дисциплін¹,

¹Житомирський агротехнічний фаховий коледж, Покровська 96, 10003, Україна

АНОТАЦІЯ: У зв'язку з ростом об'єму перевезень насипних вантажів автомобільним транспортом потребується підвищення рівня механізації і автоматизації вантажно-розвантажувальних робіт. Для механізації процесів розвантаження в останні роки створенні різні потужні високопродуктивні розвантажувальні машини оригінальних конструкцій (автомобілеперекидачі, віброплощадки, елеватори, тощо). Це надає можливість прискорити розвантаження, знизити затрати і скоротити наднормативні простой автомобілів-самоскидів під розвантаженням.

Ключові слова: віброударне навантаження; гідропривод; клапан-пульсатор.

Постановка проблеми. Впроваджені рекомендації діагностики техніко-технологічних показників роботи розроблені практичні рекомендації по розробці і проектуванні нової конструкції гідроімпульсного привода розвантажувального пристрою для транспортних засобів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

- обґрунтувати доцільність використання вібрацій і ударів та визначити переваги і недоліки існуючих типів віброприводів, що можуть бути використані для підвищення ефективності процесів розвантаження транспортних засобів;
- обґрунтувати вибір конструктивних схем та розробити на їх базі новий гідроімпульсний привод віброударного пристрою для підвищення ефективності розвантаження кузовів-самоскидів транспортних засобів;

Формулювання цілей.

- набули подальший розвиток та застосовані основні положення резонансно-структурної теорії щодо поведінки навалочних вантажів під дією вібрацій і ударів;
- вперше розроблена математична модель гідроімпульсного привода віброударного пристрою у вигляді систем нелінійних диференціальних рівнянь, які відображають взаємозв'язок між основними періодами робочого циклу спрацювання запірних елементів автоматичного розподільника з певними початковими та граничними умовами;

Об'єкт дослідження – пристрої для вібраційного і віброударного розвантаження транспортних засобів.

Предмет дослідження – гідроімпульсний привод віброударного пристрою для розвантаження кузовів-самоскидів транспортних засобів.

Методи дослідження. До основних методів дослідження входить математичне моделювання процесів в гідроімпульсному приводі віброударного пристрою з урахуванням його конструкційних особливостей і режимів роботи на основі нелінійних диференціальних рівнянь механіки руху твердого та рідинного тіла з використанням числових методів їх розв'язання для визначення в аналітичній і графічній формі основних параметрів гідроімпульсного привода віброударного пристрою і ефективних режимів розвантаження сипучих, великокускових і змерзлих вантажів за допомогою віброударного пристрою. Наукова новизна одержаних результатів.

Наукову новизну складають такі основні її результати і положення:

- набули подальший розвиток та застосування основні положення резонансно-структурної теорії щодо поведінки навалочних вантажів під дією вібрацій і ударів;
- вперше розроблена математична модель гідроімпульсного привода віброударного пристрою у вигляді систем нелінійних диференціальних рівнянь, які відображають взаємозв'язок між основними періодами робочого циклу спрацювання запірних елементів автоматичного розподільника з певними початковими та граничними умовами;

На рис. 1, а показано схематичне розташування вузлів гідроприводу, на рис. 2, б гідравлічна схема приводу вібраційного розвантажувача автомобіля-самоскида, на рис. 2, в конструктивна

схема вмонтованого клапана-пульсатора гідропривода вібраційного розвантажувача автомобіля-самоскида. [2].

Запропоновано використовувати базовий гідропривод автомобіля-самоскида, в якому за рахунок створення в додатковому робочому вібраційному гідроциліндрі 5 пульсуючого тиску від загального гідронасоса 18, за допомогою спеціального вібророзбуджувача, або клапана-пульсатора [3], досягається можливість створення вібрацій кузова 16, що призводить до одночасного його очищення і розвантажування.

Пристрій працює наступним чином. Коли кузов 16 автомобіля-самоскида за допомогою телескопічного підйомного гідроциліндра 1 розвантажується, робоча рідина під тиском від загального гідронасоса 18 поступає в робочу порожнину вібраційного гідроциліндра 5 по магістралі 7 від напірної лінії 6, до якої підключений розподільний пристрій – кульковий однокаскадний клапан-пульсатор 14. Клапан-пульсатор періодично при досягненні заданого тиску, визначеного за розрахунковим значенням робочого зусилля плунжера 3 вібраційного гідроциліндра 5, з'єднує напірну магістраль 6 зі зливом 13 через дросель 12.

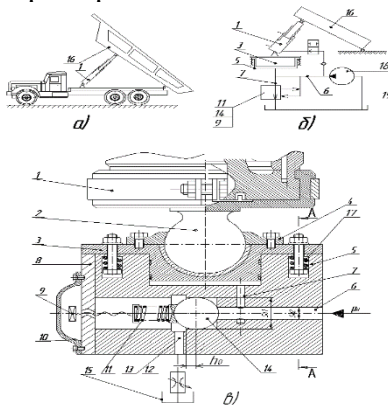


Рис.1. Гідропривод вібраційного розвантажувача автомобіля-самоскида:

- а) схематичне розташування вузлів гідроприводу;
- б) гідравлічна схема приводу вібраційного розвантажувача автомобіля-самоскида;
- в) конструктивна схема вмонтованого клапана-пульсатора.

Принцип дії вібророзбуджувача, що входить у даний запропонований пристрій гідропривода вібраційного розвантажувача автомобіля-самоскида, оснований на миттєвому збільшенні зусилля P_{n1} відкриття його рухомого запірного елемента у виді кулькового клапану-пульсатора, яке створюється тиском p_1 на площі підйому S_{n1} ($P_{n1} = p_1 \cdot S_{n1}$), до величини P_{n2} ($P_{n2} > P_{n1}$). Це збільшення відбувається за рахунок ступінчастої зміни площі підйому від S_{n1} до S_{n2} ($S_{n2} > S_{n1}$) в момент порушення герметизації посадки запірного елемента на сідло. Зусилля $P_{n2} = p_1 \cdot S_{n2}$ перевищує зусилля налагодження пружини $P_{np} = P_{n1}$, що притискає запірний елемент клапана до сідла вібраційного гідроциліндра у вихідному положенні, і може утримувати його у відкритому стані, забезпечуючи доступ рідини із напірної лінії на злив протягом часу падіння тиску в гідросистемі до величини p_2 . При цьому тискові зусилля на запірному елементі зменшаться до значення $P_{n1} = p_2 \cdot S_{n2}$ і пружина 11 зможе повернути його у вихідне положення, притиснувши до сідла вібраційного гідроциліндра.

Для попередньої оцінки конструктивних параметрів вібророзбуджувачів із зворотним зв'язком по тиску можна використати співвідношення [5]:

$$p_1 \geq P_{np} \geq p_2 S_{n2}, \quad (1)$$

Звідки

$$p_2 = p_1 \frac{S_{n1}}{S_{n2}} = p_1 \frac{d^2}{D^2}. \quad (2)$$

Теоретичне дослідження динаміки робочого циклу вібророзвантажувача автомобіля-самоскида

Розглянемо закон руху плунжера 3 при русі вгору. Знайдемо сили реакції опори в шарнірі 2 підйомного телескопічного гідроциліндра 1 і плунжера 3. На рис. 2 зображена схема для знаходження сил реакції опори в шарнірі 2, де кузов 16 знаходиться у положенні розвантаження. Де l – довжина телескопічного підйомного гідроциліндра 1, L – довжина кузова 16, α – кут на який відкрився кузов 16 автомобіля-самоскида, β – кут нахилу підйомного телескопічного гідроциліндра 1. Загальне рівняння руху плунжера 3, рис. 3:

$$(m_n) \frac{d^2 y}{dt^2} = p_u(y, t) S - \sum R - F_y, \quad (3)$$

де $p_u(y, t)$ – поточне значення тиску в порожнині гідроциліндра у вібророзвантажувача (y і t – поточні координати положення кузова 16 і підйомного телескопічного гідроциліндра 1 та часу); m_n – маса плунжера 3; m – маса підйомного телескопічного гідроциліндра 1; M – маса кузова із залишками вантажу 16; $\sum R$ – сумарна сила опору, яка складається із сили R_{np} стискання пружин 17 на рис. 1в, сил тертя R_{np} у рухомих з'єднаннях і в'язкого опору руху; F_y – сила реакції опори 2 підйомного телескопічного гідроциліндра 1 на плунжер 3, що з'єднаний із кузовом 16.

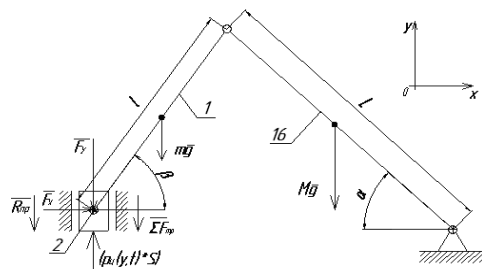


Рис. 2. Розрахункова схема реакцій опори в шарнірі 2 телескопічного підйомного гідроциліндра 1 і вібророзвантажувача

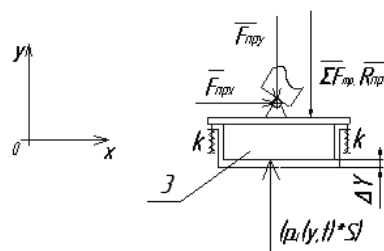


Рис. 3. Розрахункова схема для дослідження закону руху плунжера 3 вібророзвантажувача

Тиск $p_u(y, t)$ залежить від зміни об'єму рідини у робочій порожнині вібраційного гідроциліндра 5 вібророзвантажувача по мірі руху вгору плунжера 3:

$$p_u(y, t) = \frac{\Delta V}{V_o} E_{np}, \quad (2)$$

де ΔV – сумарна зміна об'єму рідини в гідросистемі за рахунок деформації напірних трубопроводів, вібраційного гідроциліндра і самої рідини; V_o – початковий об'єм рідини в гідросистемі (у вібраційному гідроциліндрі і у підводящих трубопроводах, що відповідають початку руху плунжера 3); E_{np} – приведений модуль пружності системи.

Висновки з досліджень й перспективи

Нові конструкції вібраційних приводів, які розширюють технологічні можливості автомобільного транспорту можуть знайти своє призначення у народному господарстві. Завдяки простоті регулювання параметрів вібрацій, гвинтовим з'єднанням, ми отримали простоту регулювання параметрів вібрацій, компактність конструкції. Застосування однокаскадного клапана-пульсатора в якості регулювальної апаратури дає можливість збільшення потужності і одночасно спрощує конструкцію гідропривода вібраційного розвантажувача автомобіля-самоскида.

Список використаних джерел:

1. Yskovych-Lototskyi, R. D., Matveev, Y. B., Krat, V. A. (1982). *Mashyny vibratsiinoho i vibroudarnoi dii [Vibration and vibration impact machines]*. Kyiv: Technica. [in Ukrainian].
2. Iskovych-Lototskyi, R. D., Ivanchuk, Ya. V. (2007) Doslidzhennia dynamiky protsesu roboty universalnogo hidravlichnogo vibroudarnoho pryvodu dlia rozvantazhennia transportnykh zasobiv. Naukovi notatky. Mizhvuzivskyi zbirnyk (za napriamom «Inzhenerna mekhanika») [Study of the dynamics of the operation process of a universal hydraulic vibration-damping drive for unloading vehicles]. Scientific notes. Interuniversity collection (in the direction of "Engineering mechanics"). Luts'k, № 20. [in Ukrainian].
3. Iskovych-Lototskyi, R., Zelinska, O., Ivanchuk, Y., Veselovska, N. (2017) Development of the evaluation model of technological parameters of shaping workpieces from powder materials. *East European Journal of advanced technologies*, 2(85), 43–46.

ASSESSMENT AND ANALYSIS OF MOBILE CRUSHING AND SORTING COMPLEXES

Yevhen Mishchuk, Associate Professor, PhD¹ (ORCID: 0000-0002-7850-0975),

Mykola Ruchinsky, Professor, PhD¹ (ORCID: 0000-0002-9362-292X),

Mykhailo Eremenko, student of specialty 131 «Applied Mechanics»,

¹ Kyiv National University of Civil Engineering and Architecture, Air Force Avenue 31, 03037, Ukraine

ABSTRACT. Annually, about 25% of electricity and 2% of metal are consumed from their total production in the process of manufacturing and processing building materials. More than 60% of operating costs from their total volume in quarries and construction sites are the costs of crushing and sorting equipment. The main machines for coarse and medium crushing today are jaw crushers, which operate on the principle of periodic loading of material with movable crushing jaws. These machines have a significant energy intensity of the work process and metal intensity of the equipment. Mobile crushing and sorting complexes are used in cyclic-flow technologies of rock development to transfer the main stages of their crushing to the quarry in order to reduce transportation costs, improve the environmental safety of open-pit mining by reducing dust. Capital costs for MDSK are higher than in a stationary open-pit installation, since the cost of the chassis is 20-30% of the cost of the installation. The location of the equipment on a mobile frame complicates maintenance and repair and preventive work, but these disadvantages are compensated by the mobility of such complexes. At the same time, an urgent issue is increasing the energy efficiency of such machines, which can be implemented on the basis of parametric optimization of their work process.

Keywords: crushing and sorting complex, energy efficiency, productivity, power, fuel efficiency.

Introduction. Capital costs for a mobile crushing and sorting plant are higher than in a stationary open-air installation, since the cost of the chassis is 20-30% of the cost of the installation [1]. The location of the equipment on a mobile frame complicates maintenance and repair and preventive maintenance, but these disadvantages are compensated by the mobility of such complexes [2]. One of the advantages of mobile crushing and sorting complexes is their use in dense urban areas when processing construction waste. As a result of such processing, secondary crushed stone is formed, suitable for further use in construction [3].

Based on the above, an urgent issue is to increase the energy efficiency of mobile crushing and sorting complexes, which can be implemented on the basis of parametric optimization of their work process.

Review of Recent Studies and Publications. In work [6], the use of mobile crushing and sorting complexes in the development of solid mineral deposits was justified. The emphasis in the work was on considering the operation of the MDSC in combination with extraction, loading and transport equipment. However, a detailed consideration of the parameters of the MDSC was absent in the work and it is not clear what calculation algorithms were used in the study. In work [7], the issue of the great demand in the world for the processing of construction waste was considered. The key place in the processing chain is mobile equipment. For this purpose, the work schematically presents options for combining various equipment for optimal processing of construction waste. In addition, one should not forget about the requirements for building materials that the final processing product must meet, which is also covered in the work. However, there is no review and analysis of the existing market for such machines. In work [9], an assessment and analysis of separate crushing machines that are part of mobile crushing and sorting complexes was performed.

Purpose of work. Assessment and analysis of crushing and screening complexes and determination of important mechanical parameters that significantly affect the efficiency of equipment operation within the complex and construction site.

Materials and methods. The main materials for the analysis are scientific, technical and reference literature on domestic and foreign samples of modern crushing equipment. The main methods used in the work are the use of mathematical analysis in calculating the parameters of the mechanical mode and criterion-based assessment.

Results. The scope of use of MDSK is: 1) primary and secondary crushing of rocks; 2) processing of construction waste; 3) sorting of material by fractions [7].

Fig. 1, a shows the structure of the Lokotrack LT106 mobile crushing and sorting complex. The principle of operation of the complex is as follows. The material is fed by an excavator into the loading hopper 3, which has a lining from the inside, and also due to the hydraulic transmission can change the volume of the loading chamber, which allows you to optimize the material feeding process and reduce the unevenness of its feeding. After loading, the material begins to move longitudinally along the feeder 2, which contains a grate screen for screening out small items and reducing the clogging of the crushing chamber. The screenings fall onto the folding conveyor 1 – H5-4 [8].

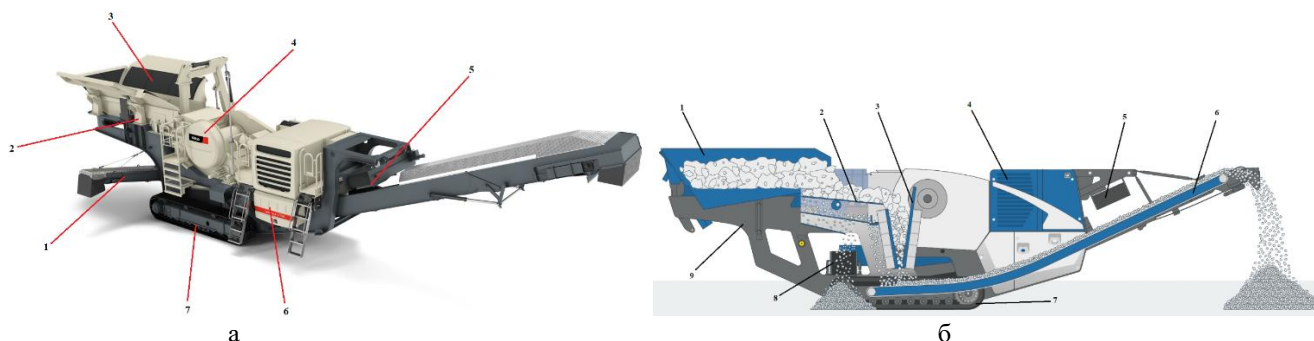


Fig. 1. Mobile crushing and sorting complexes:

a – Metso LT106 (1-H5-4 conveyor; 2 – feeder with grate screen; 3 – hydraulically adjustable loading hopper; 4 – jaw crusher C106; 5 – H10-11, H10-14 main conveyor; 6 – engine CAT C9 and transmission C7.1; 7 – crawler chassis; 6 – Kleeman Mobicat MC 110(i) EVO2 (1 – bunker; 2 – screen; 3 – jaw crusher; 4 – drive; 5 – magnetic separator; 6 – conveyor; 7 – running gear; 8 – complex conveyor; 9 – frame)

The oversize material enters the jaw crusher C106 4. Large pieces of material are additionally crushed using a jackhammer installed between the grate screen and the crusher. This reduces the likelihood of clogging of the crushing chamber. The crushed material enters the main conveyor H10-11, H10-14 5. The crusher is driven by a CAT C9 power plant 6. The crawler-type running gear 7 allows the crusher to be moved to different points of the construction site without the need for a dump truck [9],[10].

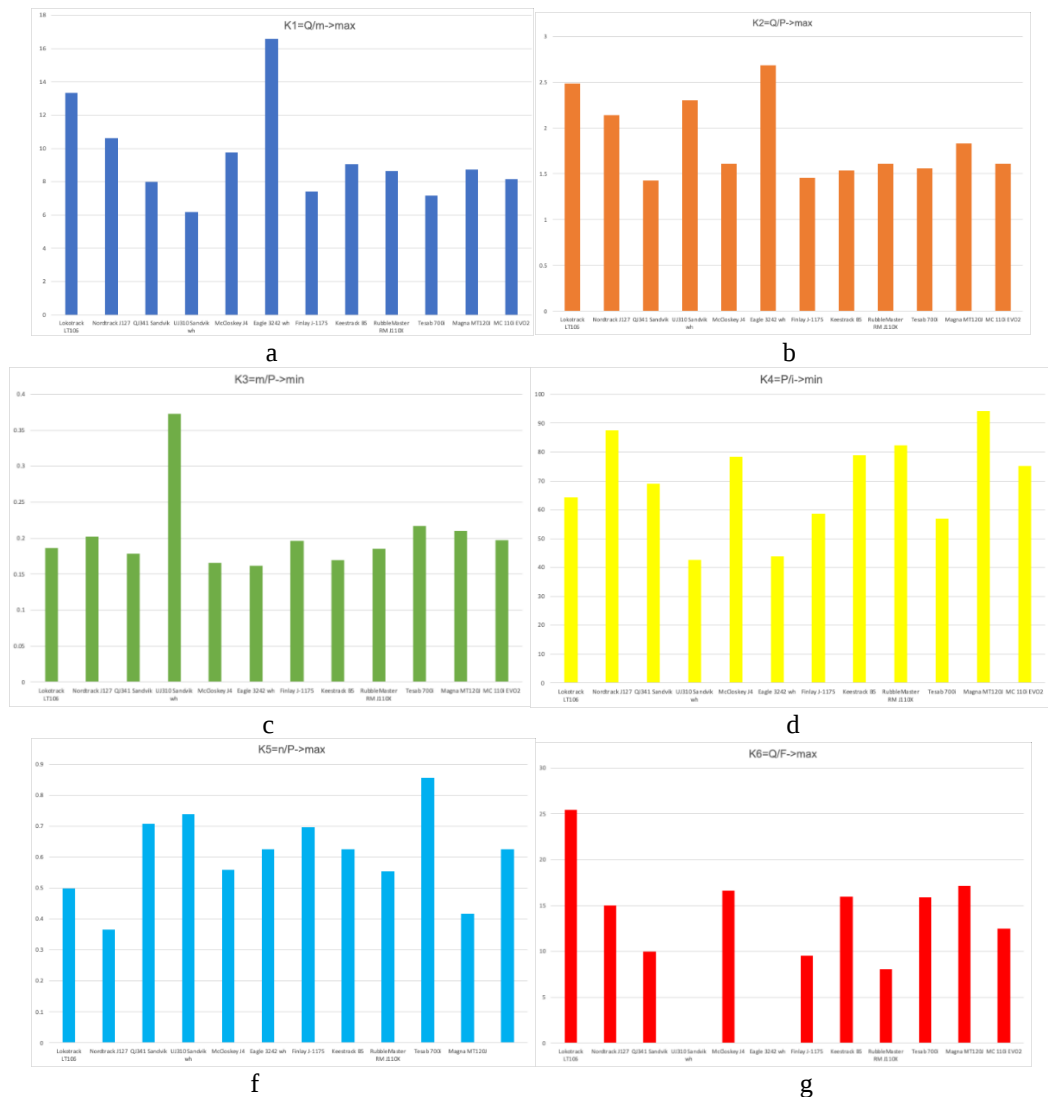


Fig. 2. Histograms of the criterial assessment of the MDSK:
a – k_1 ; b – k_2 ; c – k_3 ; d – k_4 ; f – k_5 ; g – k_6

Fig. 1, b shows the structure of the Kleemann Mobicat MC 110(i) EVO2 MDSC. A feature of the Kleemann Mobicat is the presence of a double-screen screen that filters out small items. This solution increases the crusher's productivity by up to 10%. The Kleemann Mobicat MDSC transmission includes a hydraulic clutch that transmits torque from the gearbox to the crusher and a generator to drive auxiliary mechanisms. Such transmission features allow reducing fuel consumption by 30%.

The following criteria were used to assess the technical and economic indicators and parameters of the MDSK: 1) $k_1 = \Pi/m$ - criterion for assessing the impact of mass on performance (-> max); 2) $k_2 = \Pi/P$ - criterion of the impact of energy costs on productivity (-> max) ; 3) $k_3 = m/P$ - criterion of the influence of power on mass (->min); 4) $k_4 = P/i$ - criterion of the influence of power on the degree of crushing (-> min); 5) $k_5 = n/P$ - criterion of the influence of power on the speed (-> max); 6) $k_6 = Q/F$ – criterion of the impact of fuel consumption on performance (-> max). The corresponding histograms are presented in Fig. 2.

Discussion. Among crushing machines, mobile complexes from Metso, Sandvik and Kleemann look promising. The difference between Kleemann mobile crushers is the use of a modern, simpler and more intuitive control system - spectre. This gives an advantage in personnel training. However, when it is necessary to analyze a large number of parameters when operating a plant with several MDSKs, the Metso IC or Sandvik Automation and Monitoring control system has greater advantages. The use of a diesel-electric drive with a hydraulic clutch has a number of advantages: 1) reduced fuel consumption compared to the use of a hydraulic drive in Sandvik; 2) engine protection in the event of shock loads in the crushing

chamber and absorption of peak loads; 3) smooth start-up of the crusher. Metso also uses a diesel-electric drive with a hydraulic clutch, but in older models. New models of Metso mobile crushers use an electric drive with a complex electronic control system Metso IC, which protects the engine and structural elements of the machine from peak and shock loads. The basis of such a system is frequency control of the machine's speed, which allows for a smooth start, current limitation or automatic speed reduction under heavy loads. There is also the possibility of enabling reverse.

Conclusions. Based on the criteria assessment, we see differences in different types of MDSCs. This indicates the use of different methods in the calculation of such machines, as well as narrow specialization for individual processes. For example, Metso and Sandvik complexes are more focused on use in mining quarries or in conjunction with a large number of other equipment. In turn, Eagle crushing complexes are more classic in their design, due to the lack of electronic control systems. Such complexes are more profitable to use on small volumes of processing or in single use. Thus, it can be noted that an important issue is the parametric optimization of equipment that is combined within one MDSC and beyond. Another important parameter of MDSCs is fuel efficiency. Most modern complexes use a diesel-electric drive in combination with a hydraulic clutch or an electric drive. An equally important parameter that affects the economic component of the plant is ensuring the constancy of power supply to the complex.

References:

1. Haldar, S. K. (2018). Mineral exploration: Principles and applications (2nd ed.). Elsevier.
2. Kelly, E. G., & Spottiswood, D. J. (1982). *Introduction to mineral processing*. John Wiley & Sons
3. Bearman, R.T. Jaw and Impact Crushers. In SME Mineral Processing and Extractive Metallurgy Handbook; Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc.: Englewood, CO, USA, 2019; p. 367.
4. Sobko, B. Yu., Hrytsenko, L. S., & Kriachek, V. P. (2023). Obgruntuvannia zastosuvannia mobil'nykh drobyl'no-sortuval'nykh kompleksiv na kar'ierakh iz vydobutku tverdykh nerudnykh korysnykh kopalyn [Justification of the use of mobile crushing and screening units at quarries for hard non-metallic minerals extraction]. Zbirnyk naukovykh prats NTU "Dniprovska politehnika" – Collection of Scientific Papers of the NTU "Dniprovska Politehnika", (72), 7–15.
5. Luo, H.; Aguiar, J.; Wan, X.; Wang, Y.; Cunha, S.; Jia, Z. Application of Aggregates from Construction and Demolition Wastes in Concrete: Review. Sustainability 2024, 16, 4277. <https://doi.org/10.3390/su16104277>.
6. Mishchuk, Y. (2025). Structural review and assessment of technological and design parameters of crushing equipment for the construction industry. Construction Engineering, (41), 22–39. <https://doi.org/10.32347/tb.2024-41.0403>
7. Wang, Y., Lv, K., & Chen, Z. (2018). The optimization of jaw crusher with complex motion aimed at reducing stroke feature value of its outlet. International Journal of Engineering and Technical Research, 8(1).
8. Metso Corporation. (2024). Crushing and screening handbook (7th ed.). Metso. <https://www.metso.com/insights/e-books/crushing-and-screening-handbook/>
9. Sampaio, C. H., Petter, C. O., Sampaio, L. d. F., Moncunill, J. O., Ambrós, W. M., & Teixeira, A. B. (2024). Concentration Plants of Construction and Demolition Waste for Coarse Aggregate Recycling. Minerals, 14(6), 619. <https://doi.org/10.3390/min14060619>
10. Robert C. Dunne (2019) Mineral Processing & Extractive Metallurgy Handbook. Society for Mining, Metallurgy & Exploration, USA, p. 2258. ISBN 978-0-87335-385-4.

СЕКЦІЯ 2

«ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ВІДНОВЛЕННЯ ІНФРАСТРУКТУРИ В УКРАЇНІ»

ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРИЧНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ ВИМУШЕНИХ КОЛИВАНЬ ДВОХЗВ'ЯЗНОЇ ОБОЛОНКИ МІНІМАЛЬНОЇ ПОВЕРХНІ ПРИ ТЕРМІЧНИХ І СИЛОВИХ НАВАНТАЖЕННЯХ З УРАХУВАННЯМ ГЕОМЕТРИЧНОЇ НЕЛІНІЙНОСТІ.

Олександр Кошевий, доцент, Ph.D., доцент ¹ (ORCID: [0000-0002-1903-2905](https://orcid.org/0000-0002-1903-2905)),

¹ Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних сил 31, 03037, Україна

АНОТАЦІЯ. Оптимізаційний розрахунок параметричної оптимізації двох зв'язної конусної оболонки мінімальної поверхні, має такі параметри: цільова функція – вага матеріалу оболонки, змінні проектування від 1 до 200 мм, ліміт представлений у вигляді першої вимушеної частоти коливання 0.40 Гц. Після оптимізаційного розрахунку отримали наступні результати: зменшення ваги оболонки мінімальної поверхні на 25,3%, перерозподіл товщини оболонки від 4.3 мм до 50.2 мм, перша вимушена частота коливання становить 0.4 Гц, що представлено обмеженням. Методика автора та застосування власного програмного забезпечення дає можливість виконувати ефективний оптимізаційний розрахунок для оболонок мінімальних поверхонь, а застосування двох типів видів оптимізації на одному об'єкті дослідження є важливою прикладною задачею для будівельної і прикладної механіки.

Ключові слова: метод скінченних елементів; оптимальне проектування; параметрична оптимізація; цільова функція; оболонка; оболонка мінімальних поверхонь; геометрична нелінійність; термосилові навантаження.

Вступ. В сучасному проектуванні будівельних конструкцій з розвитком розрахунково-графічних комплексів з'явилося нове програмне забезпечення оптимального проектування. Оптимальне проектування будівельних конструкцій дає змогу зменшити цільову функцію – найчастіше використовують вагу або об'єм, що в свою чергу веде до зменшення витрати конструкційних матеріалів, яке спричиняє зменшення вартості будівельного проекту в цілому. В прикладній і будівельній механіці при виконанні оптимального проектування повинні забезпечуватися базові міцнісні характеристики, що регламентуються будівельними нормами України. Міцнісні характеристики розподіляються на дві групи граничних станів. До першої групи граничних станів відносяться: міцність і стійкість будівельної конструкції під впливом всіх зовнішніх навантажень як статичних так і динамічних. До другої групи граничних станів відносяться розрахунок на тріщиностійкість та прогини, що також дуже важливі складові при оптимального проектуванні будівельних конструкцій. В оптимальному проектуванні важливо враховувати одразу дві групи граничних станів, тому що бувають випадки коли міцність і стійкість будівельної конструкції задовольняється, а прогини із-за зменшення товщини перерізу можуть бути більшими ніж допустимими. Після оптимального проектування будівельної конструкції та затвердженого оптимального рішення виконуються всі можливі перевірки на комбінацію зовнішніх впливів, які можуть бути статичними і динамічними [1].

В прикладній і будівельній механіці при розрахунку будівельних конструкцій є можливість застосовувати різні види основних досліджень, а саме: статичний розрахунок, дослідження власних і вимушених частот коливань, стійкість. Так і спеціальні додаткові дослідження у вигляді фізичної і геометричної нелінійності, задачі які враховують час і недосконаlostі будівельних конструкцій. Застосування спеціальних додаткових досліджень дає змогу оцінити дійсні значення результату оптимального проектування такі як прогини будівельних конструкцій, міцність і стійкість, які максимального наближені до навколишнього середовища. Важливим фактором є в якій зоні працює матеріал: в пружній, пружно-пластичній, пластичній, що дає змогу оцінити поведінку оптимізованої будівельної конструкції, та більш якісно дослідити її поведінку в реальному житті [2].

З розвитком інформаційних технологій на теперішній час є можливість створювати оптимальні

проекти різних будівельних конструкцій. Це можуть бути від звичайних стержневих конструкцій до цілого будівельного каркасу. В даному науковому дослідженні розглядається просторова конструкція у вигляді оболонки мінімальної поверхні. Суть оболонок мінімальних поверхонь полягає у оптимальній формі, яка виводиться на заданому контурі за допомогою програмного забезпечення. Такі конструкції застосовуються у промислових і цивільних об'єктах будівництва, а також: машинобудування, літакобудування, комічна галузь, легка і важка промисловість, хімічна промисловість, що є важливими складовими до економіки України в цілому. Будівництво таких об'єктів під час відбудови України є важливим чинником для зростання економіки в цілому. Для відбудови України мінімізації собівартості є одним із головним пріоритетом, що дає змогу швидко і високотехнологічно виконати це завдання [3].

Використання оптимального проектування дає змогу оцінити мінімізувати вартість оболонки мінімальної поверхні при термічному та силових навантажень з урахуванням геометричної нелінійності. Геометрична нелінійність є важливою складовою, яка дає можливість врахувати дійсні частоти коливаль та прогини оболонки мінімальної поверхні, що додатково спричиняє зменшенню ваги за рахунок методики розрахунку [4].

Мета роботи. Полягає у дослідження параметричної оптимізації оболонки мінімальної поверхні при термічних та силових навантаженнях з урахуванням геометричної нелінійності та визначення оптимальної товщини і ваги.

Матеріали і методи. Виконання всіх міцніших розрахунків виконується за допомогою методу будівельної і прикладної механіки методу скінченних елементів (МСЕ), що використовується в усіх сучасних розрахункових комплексів і є основним методом, який дає точні результати та вдалу збіжність скінченних елементів. Суть методу полягає в розбиття оболонки мінімальної поверхні на скінченні елементи, на які призначається власні властивості елементу по товщині. На кожен скінченний елемент задається комбінація зовнішнього навантаження.

Матеріал для з якого виготовляють оболонку мінімальної поверхні – листовая сталь. Марка сталі С245, металеві листи з'єднуються між собою за допомогою автоматичного зварювання.

Параметрична оптимізація оболонки мінімальної поверхні виконується за рахунок математичного методу градієнтного спуску, що допомагає в автоматизованому режимі знаходити максимум чи мінімум цільової функції, та одразу досягати її екстремуму. Такий метод є одним із розповсюдженим для оптимального проектування та дає високу ефективність по точності результату та витраченого часу на пошук оптимального проекту. Використання даного методу та його ефективності викладено в наступних наукових роботах [1-2]

Виклад основного матеріалу. Для виконання дослідження параметричної оптимізації вимушених коливаль двозв'язної оболонки мінімальної поверхні спочатку виконується побудова геометричної просторової моделі на заданому контурі. Побудова геометричної просторової моделі виконується за допомогою власного програмного забезпечення, де задається контур оболонки майбутньої оболонки мінімальної поверхні, а також вирахування її оптимальної висоти та площі для мінімізації внутрішній зусиль просторової конструкцій. Готовий геометричний каркас переноситься до розрахункового комплексу Femap with Nastran де на геометричний каркас накладається скінчено-елементна сітка після чого задаються зовнішні навантаження.

Зовнішні навантаження представлені комбінацією силових і термічних впливів на оболонку. Навантаження задаються згідно державних норм України з певними коефіцієнтами. Задаються зовнішні навантаження на кожний скінченний елемент окремо, так як важливість збіжності скінченних елементів також впливає на їх площу та кількість вузлів для оболонки.

Проекти конструкції, як правило, не можуть влаштовувати більшості вимог для вирішенні задачі однокритеріальної параметричної оптимізації, вони знаходяться у підпросторі проектування, в якому знаходиться і необхідний оптимальний проект, при цьому цільова функція досягає максимуму чи мінімуму, в залежності від потреб проектувальника. Сейсмічне і статичні навантаження конструкції розділяє підпростір проектування на допустимий і не допустимий, а також будь-які обмеження роботи конструкції: довговічність, міцність, жорсткість, тріщиностійкість, локальна і глобальна стійкість та ін.

Умовний оптимальний проект, який лежить на межі допустимої області є тільки локальний оптимум. Вектор $\vec{x}$ знаходиться на перетині всіх гіперповерхонь, при цьому обмеження представлені у вигляді рівності (тобто на межі), тоді $h_j(\vec{x}) = 0$. Обмеження може знаходитися на межі або всередині підпростору проектування у вигляді нерівності $\vec{x}$, якщо обмеження за границею підпростору проектування – воно буде мати недопустиме значення. При аналізуванні обмеження, потрібно зазначити, що внутрішня точка $g_j(\vec{x}) = 0$ на межі підпростору проектування, коли обмеження знаходиться всередині $g_j(\vec{x}) > 0$, та коли за межею підпростору проектування $g_j(\vec{x}) < 0$. В будівельній механіки, як правило, екстремум цільової функції знаходиться всередині підпростору проектування, а якщо на межі, то $\vec{x}$ перетворюється в рівність $g_j(\vec{x}) = 0$, така нерівність називається – активною.

В процесі оптимального проектування характеристики конструкції зручно представляти у вигляді точки в деякому абстрактному просторі проектуванні. Положення точки в цьому просторі визначається параметрами конструкції і властивості її матеріалу. Параметри проектування можуть бути представлені у вигляді дійсних чисел, функцій, векторів, множина дійсних чисел.

Постановка задачі оптимізації завжди пов'язана із заданням деякого підпростору проектування. Коли конструктор приступає до проектування конструкції, заздалегідь визначає її тип, деякі геометричні розміри і властивості матеріалів, встановлює допустимі межі зміни параметрів проектування.

Підпростір проектування містить проекти конструкції, які можуть не задовольняти множину вимог, необхідної для функціональної придатності конструкції при дії експлуатаційних навантажень. Умови міцності, стійкості, жорсткості, довговічності, і взагалі будь-які обмеження накладені на поведінку конструкції під навантаженням, розглядаються як кордони, які розділяють підпростір проектування на допустимі і недопустимі підпростори.

Оптимізаційних розрахунків параметричної оптимізації двозв'язної конусної оболонки мінімальної поверхні має такі параметри: цільова функція – вага матеріалу оболонки, змінні проектування від 1 до 200 мм, ліміт представлений у вигляді першої вимушеної частоти коливання 0.40 Гц. В ході оптимізаційного розрахунку виконується 10 циклів оптимізації, в кожному скінченному елементі на 20 мм., в частинах оболонки, де не потрібно збільшувати товщину, або зменшувати оптимізаційний розрахунок припиняється, при цьому цикли оптимізації пришвидшуються [5]. Блок схема, що показує як в деталях іде процес оптимізаційного розрахунку. Побудова розрахункової скінчено-елементної моделі виконується у Femap with Nastran, параметрична оптимізація виконується на розробленому власному оптимізаторі, за допомогою якого процес відбувається в автоматизованому режимі.

Обговорення. Перевірка достовірності і ефективності методики виконувалася порівнянням з результатами [20]. Конструкція представлена у вигляді дискретної моделі, яка розбита на прямокутні пластинчасті скінченні елементи. При параметричній оптимізації з цільовою функцією – об'єм конструкції, а саме [5]:

$$\min V(X) = k_1 x_1 + k_2 x_2^2 + k_3 x_3^2 + k_4 x_4^2 + k_5 x_5^2, \quad (1)$$

при обмеженні по міцності

$$\sigma_{\text{пр}i}(X) \leq \sigma_t, \quad i = 1; 2; \dots P. \quad (2)$$

При загальній втраті стійкості

$$P^*(X) \geq P, \quad (3)$$

при місцевій втраті стійкості

$$\sigma_{\text{кр}}^M(x_1) > \sigma_{\text{пр}}^{\text{max}}, \quad (4)$$

геометричними обмеженням, що представлені у вигляді:

$$x_{\alpha \text{min}} \leq x_{\alpha} \leq x_{\alpha \text{max}}, \quad (\alpha = 1; 2; \dots 5), \quad (5)$$

де k_1 – площа пластини в плані, k_2, k_3, k_4, k_5 – коефіцієнти, які враховують кількість відповідних ребер, їх загальну довжину, і співвідношення висоти ребра до його товщини. $\sigma_{\text{пр}i}$ – приведені напруження в кожному скінченному елементі. $\sigma_{\text{пр}}^{\text{max}}$ – приведені напруження в найбільш навантаженому скінченному елементі [6].

Критичне навантаження на пластину $P^*(X)$ дорівнює мінімальному власному числу $\gamma_1(X)$ регулярного пучка квадратичних форм. Поставлена задача відноситься до класу задач нелінійного програмування з алгоритмом обмежень. При відносно простому вигляду цільової функції для обчислення обмежень (2.32–2.33) необхідно виконувати операції з матрицями великого порядку [7].

Висновки. Після проведення чисельного експерименту параметричної оптимізації двозв'язної конусної оболонки мінімальної поверхні при термосиловому навантаженні маємо наступні результати:

- зменшення ваги оболонки 25.3%, графік зміни цільової функції;
- перша вимушена частота коливання маємо 0.4 Гц;
- розподіл товщини оболонки від 4.3 мм до 50.2 мм становить після 10 циклів оптимізаційного розрахунку.

Виходячи із результатів чисельного дослідження можемо зробити **загальний висновок**, що методика автора та застосування власного програмного забезпечення дає можливість виконувати ефективний оптимізаційний розрахунок для оболонок мінімальних поверхонь, а застосування двох типів видів оптимізації на одному об'єкті дослідження є важливою прикладною задачею для будівельної і прикладної механіки.

Список використаних джерел:

1. Kosheviy O.O. (2019). Optimal design of cylindrical tanks with rigid coating shells. *Strength of Materials and Theory of Structures: scientific and technical collection*, 103, 253-265. <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2019.103.253-265>
2. Kosheviy O.O. (2018). Optimization of a steel welded tank under the constraint of: stresses, displacements, natural frequencies of oscillation. *Theory and practice: scientific and technical collection*, 3, 34 - 50. <https://doi.org/10.32347/2522-4182.3.2018.34-50>
3. Kosheviy O.O., Kosheva I.S. (2022) Multi-criteria parametric optimization in a pair of objective functions: weight and displacement of the shell of the minimum surface on a rectangular contour under thermal and power load. *Ways to improve the efficiency of construction in the context of market relations*, № 49 (1), 66-78.. [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2022.49\(1\).66-78](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2022.49(1).66-78)
4. Kosheviy O.P., Kosheviy O.O. (2015). Numerical study of natural oscillations of stretched shells formed by minimal surfaces. *Urban Planning and Territorial Planning*, 55, 215-227.
5. Kosheviy O.P., Kosheviy O.O. (2016). Natural oscillations of shells of minimal surfaces on a circular and square contour. *Urban Planning and Territorial Planning*, 59, 234-244.
6. Krivoschapko S.V., Ivanov V.N., Khalabi S.M. (2006) Analytical Surfaces: Materials on Geometry of 500 Surfaces and Information for Strength Calculation of Thin Shells. Kiev: Nauka. 544 p.. [in Ukrainian].
7. Kosheviy O.P., Kosheviy O.O. (2022). Numerical realization of multi-criteria parametric optimization of the shell of minimum surface on a rectangular contour under thermal and power loading. *Strength of Materials and Theory of Structures: scientific and technical collection*, 108, 309-324. <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2022.108.309-324>

ТЕХНОЛОГІЧНЕ ПЕРЕЗАВАНТАЖЕННЯ: ІННОВАЦІЙНІ ПІДХОДИ ДО ВІДНОВЛЕННЯ ІНФРАСТРУКТУРИ УКРАЇНИ

Максюта Антон, аспірант кафедри економічної теорії, обліку та оподаткування¹, ([ORCID: 0009-0002-5313-403X](https://orcid.org/0009-0002-5313-403X)),

¹Київський національний університет будівництва і архітектури проспект, Повітряних сил 31, 03037, Україна

АНОТАЦІЯ. Після масштабних руйнувань, спричинених повномасштабним вторгненням російської федерації аналізуються інноваційні підходи до відновлення інфраструктури України. Акцентується увага на тому, що процес відбудови має виходити за межі простого відновлення зруйнованого й перетворитися на шанс для технологічного та інституційного перезавантаження країни. Описуються ключові напрями модернізації: впровадження BIM та GIS-технологій, екологічне та модульне будівництво, застосування штучного інтелекту, принципів “smart recovery” та Environmental Social Governance (ESG). Наголошується на важливості цифрової трансформації, сталості, прозорості, міжнародної співпраці та підготовки нових кадрів. Відбудова України розглядається як стратегічний процес формування нової інфраструктури, здатної відповісти викликам XXI століття та забезпечувати довготривалий сталий розвиток.

Ключові слова: інновації; технології; екологія; цифровізація; інфраструктура; перезавантаження.

Вступ. Внаслідок повномасштабного вторгнення російської федерації в Україну країна зазнала безпрецедентних руйнувань критичної та соціальної інфраструктури. Зруйновані мости, дороги, енергетичні об’єкти, житлові будівлі, школи й лікарні створили виклик не лише для держави, а й для всього світового співтовариства, яке долучилося до процесів відновлення. Проте відбудова України - це не просто реконструкція зруйнованого, а можливість технологічного перезавантаження, модернізації та переходу до більш сталих і цифрових рішень.

Аналіз літературних джерел. У використаних джерелах розглядаються характеристика сучасних технологій щодо використання інноваційних підходів до відновлення інфраструктури України, які дають можливість переосмислити процеси технологічного перезавантаження, як стратегічного комплексу відбудови України.

Мета роботи. Полягає в дослідженні та аналізі інноваційних підходів до відновлення інфраструктури України в умовах повномасштабного вторгнення росії, а також виявленні можливостей для технологічного перезавантаження, яке дозволить не лише відновити зруйновану інфраструктуру, але й створити сучасну, сталу та цифрову модель розвитку країни.

Виклад основного матеріалу. За даними Kyiv School of Economics (KSE) [1], станом на листопад 2024 року прямі збитки інфраструктури України через повномасштабне вторгнення росії сягнули майже \$170 мільярдів. Найбільше постраждали житловий сектор (понад \$60 млрд), транспортна інфраструктура (\$38,5 млрд) та енергетика (\$14,6 млрд). Загалом було пошкоджено або зруйновано понад 236 000 житлових будівель, 26 000 км доріг, 4 000 освітніх установ та 1 500 медичних закладів.

Сьогодні інноваційне відновлення інфраструктури в Україні розглядається не лише як технічне завдання, а як комплексна стратегія трансформації держави, де цифровізація, екологічна свідомість та стійкість стають фундаментальними цінностями. Головним завданням стає не лише швидке повернення до «довоєнного» стану, а побудова інфраструктури, здатної витримувати нові виклики: кліматичні, соціальні, військові та економічні.

Сучасні технології відіграють ключову роль у формуванні нового підходу до інфраструктурного розвитку. Вони дозволяють переосмислити процеси планування, проєктування та реалізації об’єктів, орієнтуючись на ефективність, стійкість і цифрову трансформацію.

1. Використання Building Information Modeling (BIM) - цифрового моделювання будівель та інженерних споруд, що дозволяє зменшити ризики помилок, оптимізувати кошториси і скоротити терміни будівництва. BIM-технології вже впроваджуються в багатьох міжнародних проєктах, а в Україні вони знаходять усе ширше застосування завдяки державно-приватному партнерству.

2. Використання екологічно чистих матеріалів та технологій, зокрема 3D-друку будівель, енергоефективних модулів, відновлюваних джерел енергії. Наприклад, деякі тимчасові житлові

модулі для ВПО створюються із перероблених матеріалів та забезпечені сонячними панелями, що дозволяє зробити такі об'єкти автономними та більш стійкими до зовнішніх факторів.

3. Ще одним важливим інструментом стає інтернет речей (IoT), який інтегрується в міську інфраструктуру: «розумне» освітлення, системи моніторингу якості повітря, розумне управління транспортом тощо. Такі технології дозволяють містам ставати більш функціональними, безпечними та зручними для мешканців.

4. Окрему роль відіграє геоінформаційне моделювання (GIS), яке дозволяє точно оцінити масштаби руйнувань, планувати відновлення з урахуванням ризиків, а також здійснювати моніторинг виконання робіт у режимі реального часу. Це сприяє підвищенню прозорості процесів відбудови та залученню іноземних інвесторів.

5. Особливої актуальності набуває концепція “smart recovery” - розумного відновлення, яка передбачає інтеграцію сучасних технологій на всіх етапах будівництва: від планування до експлуатації. У фокусі цієї концепції — ефективне управління ресурсами, мінімізація викидів CO₂, адаптація до зміни клімату та підвищення якості життя громадян.

6. Одним із практичних прикладів такого підходу є розробка національної цифрової платформи для моніторингу процесів реконструкції, яка дозволяє об'єднати дані про потреби громад, наявні ресурси, технічний стан об'єктів, плани робіт та підрядників. Така платформа сприяє прозорості, боротьбі з корупцією та ефективному залученню донорських коштів.

Також Україна вже отримала перші успішні приклади застосування модульного будівництва, яке дає змогу швидко зводити школи, лікарні та тимчасове житло. Це особливо актуально в умовах обмежених термінів та логістичних труднощів. Модульні споруди можуть бути адаптовані до різних кліматичних умов, під'єднані до автономних джерел живлення і забезпечені сучасними системами безпеки.

Не менш важливою є роль штучного інтелекту (AI) у відновленні. Наприклад, AI-алгоритми допомагають аналізувати супутникові знімки для оперативного виявлення пошкоджених об'єктів, прогнозувати обсяги необхідних матеріалів, оптимізувати логістику поставок. У поєднанні з машинним навчанням та хмарними технологіями це створює потужну аналітичну базу для ухвалення рішень.

Участь міжнародних партнерів, зокрема Світового банку, ЄС, USAID, сприяє впровадженню глобальних стандартів сталого будівництва, зокрема принципів ESG (екологія, соціальна відповідальність, корпоративне управління):

- екологічні фактори - вплив компанії або проєкту на довкілля, що включає використання природних ресурсів, рівень викидів парникових газів, енергоефективність, управління відходами, дотримання екологічних стандартів тощо;

- соціальні фактори - вплив на суспільство та взаємодія з людьми, дотримання прав людини, умови праці, рівень безпеки, ставлення до працівників, взаємодія з громадами, гендерна рівність, інклюзивність тощо;

- корпоративне управління - структура управління, прозорість прийняття рішень, антикорупційна політика, відповідальність керівництва, дотримання етичних норм, участь акціонерів.

У сукупності ESG-критерії допомагають оцінити, наскільки діяльність компанії чи проєкту є відповідальною, сталою та привабливою для інвесторів у довгостроковій перспективі. Важливо, щоб відбудова України відповідала цим критеріям, адже дотримання принципів ESG є важливою умовою для залучення міжнародної підтримки та фінансування.

Ще один важливий напрям - підготовка кадрів нової генерації. В умовах зростаючого попиту на інженерів, архітекторів, урбаністів і фахівців з цифрових технологій, українські університети починають адаптувати навчальні програми, зосереджуючись на міждисциплінарних знаннях, практичних навичках та роботі з новітнім програмним забезпеченням.

Варто зазначити, що технологічне перезавантаження вимагає і перезавантаження управлінських підходів. Це означає відмову від бюрократичної неефективності, перехід до гнучких моделей управління, децентралізацію та активне залучення громад до процесів прийняття рішень.

Успішна реалізація технологічного перезавантаження вимагає системного підходу: розвитку цифрових навичок у фахівців, оновлення нормативної бази, створення інноваційних хабів та залучення міжнародного досвіду. Важливо також забезпечити громадський контроль, щоб інновації справді працювали в інтересах громад і були соціально орієнтованими.

Висновки. Відновлення інфраструктури України - це шанс для переходу до якісно нової моделі розвитку: цифрової, сталої та технологічної. Інноваційні підходи стають не лише інструментом реконструкції, а й основою для формування нової державної стратегії в галузі урбаністики, будівництва та енергетики. Україна має унікальний шанс побудувати не просто те, що було втрачено, а створити інфраструктуру майбутнього.

Інноваційні підходи до відновлення інфраструктури в Україні - це не лише відповідь на виклики війни, а й можливість сформувати нову філософію розвитку країни. Технологічне перезавантаження означає не лише зміну інструментів, а зміну мислення - від копіювання старих рішень до створення інноваційних моделей. Такий підхід дозволяє не просто відновити Україну, а побудувати її з урахуванням потреб ХХІ століття - гнучкою, сталою, безпечною та технологічно розвиненою.

Список використаних джерел:

1. Damages to Ukraine's infrastructure due to the war have risen to \$170 billion - KSE Institute estimate as of November 2024 14 February 2025 <https://kse.ua/about-the-school/news/damages-to-ukraine-s-infrastructure-due-to-the-war-have-risen-to-170-billion-kse-institute-estimate-as-of-november-2024/>

ЗМІЦНЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ БЕЗПЕКИ УКРАЇНИ ШЛЯХОМ ДИВЕРСИФІКАЦІЇ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГОПОСТАЧАННЯ

Віталій Плоский, професор, д.т.н., професор ¹ (ORCID: 0000000226328085),

Олексій Забаріло, доцент, к.ф.-м.н., доцент ¹ (ORCID: 0000000349518882),

Юлія Коротких, старший викладач ¹ (ORCID: 0000000299058151),

Павло Забаріло, аспірант ¹ (ORCID: 0009000377123674),

¹ Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних сил 31, 03037, Україна

АНОТАЦІЯ. У статті озвучено важливість енергетики для розвитку країни та наголошено на необхідності зміцнення енергетичної незалежності. Обґрунтовано важливість надійної системи енергетичної безпеки та перелічено заходи для її поетапного впровадження. Дано визначення диверсифікації джерел енергоресурсів та переваг її застосування. Наведено конкретні приклади впровадження вищезазначеної політики енергетичної диверсифікації та енергоефективності в розвинених країнах Європейського Союзу, стратегії, що реалізуються в рамках впровадження комплексних структур енергоспоживання як основний орієнтир для розгортання аналогічних ініціатив на теренах України. Дано розгорнуту характеристику неосвоєного потенціалу України в контексті найбільш перспективних джерел відновлювальної енергетики на тлі поступової переорієнтації до більш диверсифікованої структури та відмови від імпортного викопного палива. Озвучено перспективи подальших досліджень.

Ключові слова: відновлювальна енергетика; енергоефективність; диверсифікація; енергогенерація; енергетична безпека.

Вступ. Енергетичний сектор є одним з ключових у національній економіці, і безперервне та ефективне енергопостачання має безпосередній вплив на економічне зростання. Саме тому енергетична незалежність є пріоритетом для розвитку України, але, незважаючи на зрушення у правильному напрямку, все ще присутня значна залежність від імпорту енергоносіїв, не кажучи вже про проблеми надмірного забруднення навколишнього середовища через використання застарілого виробничого обладнання, а також труднощі, спричинені повномасштабним вторгненням, вплив яких зокрема на енергетику і промисловість важко переоцінити, а тому впровадження диверсифікованої системи енергопостачання стає все більш важливим завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження сутності, типів та значущості диверсифікації діяльності відображаються у творах різних фахівців та в різних напрямках[1], як,

приміром, вибір оптимального методу диверсифікації підприємств і факторів, що на неї впливають[2]. Проблеми та перспективи розвитку енергоефективності, включаючи альтернативну енергетику як одну з потенційних та оптимальних напрямків диверсифікації, вивчались багатьма дослідниками, але для України пріоритетними є праці, що сфокусовані на європейському досвіді роботи із альтернативними джерелами енергії, зокрема сонячної[3], та додають контекст європейської інтеграції та можливих проблем, із ним пов'язаних[4].

Мета роботи. Метою дослідження є вивчення досвіду енергетичної диверсифікації як одного з основних інструментів досягнення енергетичної безпеки країни. Для досягнення поставленої мети необхідно застосувати наступні кроки:

- визначити поняття енергетичної диверсифікації та її переваги;
- вивчити приклади впровадження такого підходу в країнах Європейського Союзу;
- проаналізувати потенціал відновлюваних джерел енергії в Україні;
- окреслити перспективи подальших досліджень.

Виклад основного матеріалу. Енергетична диверсифікація означає використання різних джерел енергії, постачальників і маршрутів, що, як наслідок, зменшує залежність від одного ресурсу або постачальника. Країна, яка диверсифікує свій базис джерел енергогенерації, захищає себе від енергетичних перебоїв і зміцнює свою енергетичну безпеку. Серед безперечних переваг диверсифікованої енергетичної системи є наступні аспекти:

- Політична незалежність: Розподіл енергетичних потреб між різними постачальниками дозволяє країні-імпортеру зменшити свою залежність від одного постачальника і зміцнити свою незалежність у світовій політиці.
- Економічна стабільність: Енергетична диверсифікація сприяє збільшенню економічної стабільності. Отримання енергії з різних джерел і постачальників захищає країну-імпортера від енергетичних перебоїв, коли одне джерело або постачальник неспроможне задовольнити попит.
- Захист навколишнього середовища: Розвиток відновлюваних ресурсів, таких як сонячна та вітрова енергетика, зменшує загрозу дефіциту енергії. Інвестиції у відновлювану енергетику також стимулюють інновації та зростання зайнятості.

Ключовим компонентом енергетичної диверсифікації сьогодні є активне використання альтернативних джерел енергії. Прикладом реалізації такого підходу є те, що Європейський Союз протягом десятиліть послідовно переходив на відновлювані джерела енергії та диверсифікував своїх постачальників природного газу, щоб зменшити майбутню залежність від одного імпортера у випадку перебоїв або політичних конфліктів та підвищити енергетичну безпеку регіону.

Цю політику було закріплено в ряді ініціатив, серед яких варто відмітити "Промисловий план Green Deal" в лютому 2023 року, спрямований на підвищення довгострокової конкурентоспроможності європейської промисловості з нульовими викидами та сприяння переходу до кліматичної нейтральності, а пізніше в рамках цієї стратегії в травні 2024 року був прийнятий Закон про критичну сировину (Critical Raw Materials Act, CRMA), спрямований на підвищення стійкості ланцюгів постачання критичних мінералів в ЄС та зменшення залежності від третіх країн щодо критичної сировини, необхідної для "зеленого" переходу[5].

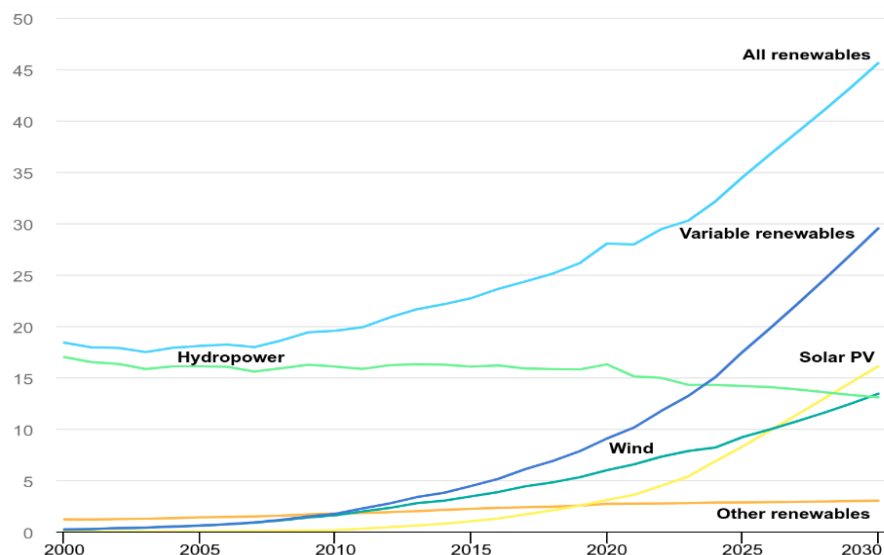


Рис.1. Частка виробництва електроенергії з відновлюваних джерел за технологіями, 2000-2030[6]

Для України до повномасштабного вторгнення найважливішим аспектом альтернативних джерел енергії була її чистота та екологічність – їх активне використання це сприяє поліпшенню екологічної ситуації і не призводить до зміни енергетичного балансу на планеті. При використанні відновлюваних джерел енергії немає необхідності видобувати, переробляти, збагачувати і транспортувати паливо, а також усувається проблема утилізації або захоронення шкідливих відходів традиційного виробництва енергії. З екологічних міркувань відновлювана енергетика має перевагу над традиційними видами палива та ядерною енергією. Але в сучасних умовах, на тлі відмови від імпортованих енергоносіїв, використання відновлюваних джерел енергії є суттєво необхідною альтернативою викопним видам палива, оскільки може покрити значну частину енергоспоживання і має великий потенціал для розвитку. Київська школа економіки оцінює прямі втрати в електроенергетиці внаслідок російських атак у 56,2 млрд доларів США[7], і ця сума постійно зростає, і тому вкрай важливо збільшити інвестиції у широкомасштабне розгортання децентралізованої відновлюваної енергетики.

Ефективна диверсифікація ресурсів та шляхів їх отримання в енергетичному секторі допоможе йому вийти на якісно вищий рівень функціонування і, відповідно, знизити енергетичні ризики, підвищити прибутковість тощо[8].

Таблиця 1

SWOT-аналіз впровадження альтернативних джерел енергії в Україні

<u>Сильні сторони:</u> Багаті природні ресурси Зростання інтересу до зеленої енергетики Кваліфіковані фахівці	<u>Можливості:</u> Європейська інтеграція Зростання світового ринку Підвищення енергетичної безпеки
<u>Слабкі сторони:</u> Обмежене фінансування Стара інфраструктура Регуляторні бар'єри	<u>Загрози:</u> Політична та військова нестабільність Конкуренція з традиційними енергоджерелами Зміна клімату

Висновки. Масове використання відновлюваних джерел енергії для досягнення ефективної енергетичної диверсифікації має низку незаперечних переваг і лише посилить втілення національної стратегії щодо забезпечення енергетичної безпеки. Але для досягнення цієї мети існує потреба в подальших дослідженнях, спрямованих на вдосконалення процесу управління джерелами генерації енергії.

Для поступового впровадження диверсифікованої системи енергопостачання слід розглянути

наступні кроки:

Створити правову базу для енергетичної політики, яка б приваблювала інвестиції, заохочувала підприємництво та інновації, а також обмежувала неефективність та марнотратство.

Укладати партнерства з приватним сектором для визначення та розвитку альтернативних джерел енергії.

Співпрацювати з експертами для визначення найкращого поєднання доступних внутрішніх та зовнішніх джерел енергії.

Співпрацювати з міжнародною спільнотою для впровадження та забезпечення дотримання екологічних стандартів, пов'язаних з розвідкою та видобутком енергоносіїв.

Розробити комплекс рекомендацій, зокрема із залученням новітніх інформаційних технологій.

Список використаних джерел:

1. Bohuslavskiy Ye.I., Chernychenko A.O. (2013) Vybir optymalnogo metodu dyversyfikatsii pidpriemstva [Choosing the optimal method of enterprise diversification]. *Efektivna ekonomika - Effective Economics*, № 10. <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=2424> [In Ukrainian].
2. Drymalovska Kh.V., Kuzmin O.Ie., Peredalo Kh.S. (2013) Chynnnyky vplyvu na dyversyfikatsiiu diialnosti pidpriemstv [Factors influencing the diversification of enterprise activities]. *Visnyk Natsionalnoho universytetu "Lvivska politehnika". Menedzhment ta pidpriemnytstvo v Ukraini: etapy stanovlennia i problemy rozvytku - Bulletin of the National University "Lviv Polytechnic". Management and Entrepreneurship in Ukraine: Stages of Formation and Development Problems*, №769, 143-148. http://nbuv.gov.ua/UJRN/VNULPM_2013_769_23 [In Ukrainian].
3. Zaverbnyi A.S., Shpak Yu.N. (2019) Problemy harmoniinoho rozvytku enerhozabezpechennia ta enerhoefektyvnosti ekonomiky v umovakh yevrointehratsii. [Problems of harmonious development of energy supply and energy efficiency of the economy in the conditions of European integration.]. *ECONOMICS: time realities*, № 4(44),40-48. <https://economics.net.ua/files/archive/2019/No4/40.pdf> [In Ukrainian].
4. Seymur Ağazade. (2023) Energy Diversification Trends and Convergence in this Diversification. *SSRN Electronic Journal*. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4343016>
5. Pokryshka D.S. (2024) Ohliad stratehichnykh dokumentiv Yevropeiskoho Soiuzu u sferi ekonomichnoi bezpeky: analit. ohliad [Review of strategic documents of the European Union in the sphere of economic security: analytical review]. Kyiv: NISD, 10-11. <https://doi.org/10.53679/NISS-analytrep.2024.12> [In Ukrainian].
6. IEA, Share of renewable electricity generation by technology, 2000-2030. URL: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/share-of-renewable-electricity-generation-by-technology-2000-2030>
7. Zbytky ta vtraty enerhetychnoho sektoru Ukrainy vnaslidok povnomasshtabnoho vtorhnennia Rosii perevyshchyly \$56 mlrd [Damages and losses to Ukraine's energy sector as a result of a full-scale Russian invasion exceeded \$56 billion]. Otsinka KSE Institute stanom na traven 2024 roku - KSE Institute estimate as of May 2024. URL: <https://kse.ua/ua/about-the-school/news/zbitki-ta-vtrati-energetichnogo-sektoru-ukrayini-vnaslidok-povnomasshtabnogo-vtorgnennya-rosiyi-perevishhili-56-mlrd-otsinka-kse-institute-stanom-na-traven-2024-roku> [In Ukrainian].
8. Ploskyi V.O., Zabarylo P.O. (2024) *Potochnyi stan potentsialu alternatyvnoi enerhetyky Ukrainy* [Current state of alternative energy potential of Ukraine]; Materialy III Mizhnarodnoi naukovo praktychnoi konferentsii «Green Construction», 16-17 may 2024. Kyiv: KNUCA. https://www.knuba.edu.ua/wp-content/uploads/2024/05/zbirnyk_gotovyj-4.pdf [In Ukrainian].

ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ В ПРОЦЕСІ ВІДБУДОВИ УКРАЇНИ: ШЛЯХИ ДО СТАЛОГО РОЗВИТКУ

Названов Денис, аспірант кафедри економічної теорії, обліку та оподаткування¹ (ORCID [0009-0008-8149-9400](https://orcid.org/0009-0008-8149-9400)),

¹Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних сил 31, 03037, Україна

АНОТАЦІЯ. Після повномасштабного вторгнення росії з'явилися численні плани економічного відновлення та відбудови України. Узгоджене планування має вирішальне значення для досягнення найближчих і дострокових цілей України та задоволення потреб у прозорому, ефективному способі фінансування проєктів у будівельній галузі.

Ключові слова: інновації; технології; сталий розвиток; відбудова.

Вступ. Відбудова інфраструктури України після масштабного руйнування, спричиненого військовими діями, є не лише необхідністю для відновлення функціонування держави, а й унікальним шансом для переходу до нових технологічних стандартів. Використання інноваційних технологій на всіх етапах відбудови дозволить Україні не тільки відновити зруйновані об'єкти, але й побудувати інфраструктуру, що відповідатиме вимогам сталого розвитку, екологічним і цифровим стандартам XXI століття.

Мета роботи полягає в дослідженні ролі інноваційних технологій у процесі відновлення інфраструктури України після руйнувань, спричинених військовими діями, та виявленні шляхів до сталого розвитку країни.

Виклад основного матеріалу. Інноваційні технології, які використовуються під час відбудови, охоплюють широке коло інструментів: від цифрових технологій до екологічно чистих рішень у будівництві. Це включає в себе такі підходи, як цифрове моделювання будівель (BIM), геоінформаційні системи (GIS), відновлювані джерела енергії, 3D-друк, застосування нових екологічних матеріалів, а також автоматизовані системи управління інфраструктурою.

Основною метою є створення не лише відновленої, а й адаптованої до змін клімату та майбутніх викликів інфраструктури, що забезпечує високу стійкість до зовнішніх факторів та оптимальне використання ресурсів.

«Важливою віхою на шляху до сталого розвитку в Україні є перехід від «коричневої» до «темно-зеленої» економіки, що вимагає використання сучасних технологій. Створення системи управління, яка заохочує стійкі інвестиції та збалансований фінансовий облік приватних компаній, одночасно захищаючи їх від ризику «greenwashing», є життєво важливими», - наголошує Джулія Джессон, керівник проєкту «Capacities for Climate Action» на заході, який Український Кліматичний Офіс (УКО) організував спільно з Міжнародним інститутом сталого розвитку (IISD)[1].

Переглядаючи плани відновлення, Україна має визначити пріоритетність конкретних дій та заходів для досягнення відчутних результатів. Таксономія (логічна система класифікації, яка дозволяє упорядковувати знання чи об'єкти за певними ознаками з метою кращого розуміння, аналізу чи застосування) має враховувати потреби всіх зацікавлених сторін, особливо на місцевому та регіональному рівнях. Місцеві громади, які зазнали найбільшої шкоди, повинні отримати достатнє фінансування для відновлення. Водночас, місцеві плани з відновлення повинні включати принципи сталого розвитку, щоб гарантувати, що заходи по відновленню будуть не лише ефективними в короткостроковій перспективі, але й відповідатимуть довгостроковим цілям сталого розвитку [1].

Одним із ключових стратегічних пріоритетів має стати розвиток високотехнологічних галузей економіки, таких як інформаційні технології, біотехнології, нанотехнології, енергетика, включаючи відновлювані джерела енергії, та інші. Важливо забезпечити сприятливі умови для розвитку цих галузей, стимулювати дослідження та розробки, а також підтримувати підприємства, які впроваджують інноваційні рішення у виробництво. Це сприятиме створенню нових робочих місць, а також підвищенню продуктивності праці та збільшенню доданої вартості в економіці.

Іншим необхідним аспектом є розвиток людського ресурсу, що включає реформу системи освіти, підвищення якості навчання фахівців, а також створення умов для постійного професійного розвитку. Особливу увагу треба приділяти розвитку наукових та інженерних компетенцій, які є основою для створення інновацій. Важливо забезпечити інтеграцію наукових досліджень і освіти з потребами економіки, щоб підготовлені кадри мали можливість реалізовувати свої знання та навички в практичній діяльності.

Стратегічним пріоритетом також має стати створення ефективної інноваційної інфраструктури, яка включає науково-дослідні центри, технологічні парки, бізнес-інкубатори, кластери та інші елементи. Ця інфраструктура має забезпечувати підтримку всіх етапів інноваційного процесу - від ідеї до її комерціалізації та впровадження у виробництво (реалізацію). Важливо створити умови для тісної співпраці між науковими установами, бізнесом та державою, що сприятиме розвитку інноваційних екосистем у різних регіонах країни [2].

Загалом відбудова за принципом (build back better) є необхідною і вимагає загального розуміння принципів сталого розвитку, але одночасно вона має бути практичною. Філіп Гасс, директор енергетичної програми IISSD, який прийняв участь у панельній дискусії, організованій Міністерством захисту довкілля та природних ресурсів України, присвяченій будівництву в житловому секторі: «Починаючи з 2022 року, Інститут підтримує українські організації та Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України з метою інформування зацікавлених сторін про те, що, незважаючи на виклики, «зелені» сталі рішення є актуальними навіть під час війни. І ми тут, щоб продемонструвати, що відбудова за принципом (build back better) можлива навіть у найскладніші часи, і відбувається вже зараз» [1].

Торстен Воллерт, радник Представництва ЄС в Україні з питань енергетики, підкреслює: «Правила та норми ЄС незабаром будуть діяти в Україні, і до цього потрібно готуватись. Житлово-комунальне господарство – це складна галузь, тому потрібно зменшити корупційні ризики. Законодавство має вирішувати практичні питання. В ЄС діють стандарти енергоефективності, розробляється законодавство, є експерти, і Україна має бути готовою, щоб уникнути ситуації, коли політичні рішення прийняті, а на місцях впровадження стримуються і виникають проблеми. Звісно, можна залишатися на низькому рівні енергоефективності, але тоді доведеться заплатити за це відповідно високу ціну» [1].

Необхідним є також активне залучення міжнародного досвіду та інвестицій у розвиток інновацій в Україні. Це може включати участь у міжнародних науково-дослідних програмах, створення спільних підприємств з іноземними компаніями, а також залучення іноземних інвесторів до фінансування інноваційних проєктів. Важливим завданням є адаптація найкращих світових практик до національних умов, що дозволить підвищити ефективність і результативність інноваційної політики [2].

Ольга Юхимчук, заступниця міністра з питань євроінтеграції Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України наголошує: «Україна залишається відданою досягненням цілей ЄС, включаючи досягнення кліматичної нейтральності до 2050 року. Вона підкреслює, що Національно-визначений внесок (НВВ) країни слугує не лише цільовим показником, але й комплексним інвестиційним планом для відновлення» [1].

Під час визначення стратегічних напрямів розвитку важливо враховувати соціальні чинники, що впливають на інновації. Зокрема, слід забезпечити, щоб інноваційні продукти й послуги були доступними для широких верств населення, сприяти розвитку соціального підприємництва та інтегрувати інновації у сфери охорони здоров'я, освіти та соціального захисту. Це сприятиме покращенню якості життя громадян і зменшенню соціальної нерівності.

Реалізація такого підходу вимагає комплексного підходу та злагодженої співпраці між державними, регіональними й місцевими органами влади, активної взаємодії з усіма зацікавленими сторонами, а також систематичного моніторингу ситуації й гнучкого коригування дій відповідно до зовнішніх та внутрішніх змін. Крім того, важливо впроваджувати механізми державно-приватного партнерства для залучення додаткових ресурсів у розвиток інноваційного сектору. Лише за таких умов можливе сталий інноваційний розвиток та зростання країни [2].

Сучасна ситуація в Україні вимагає використання невідкладних заходів для ефективного впровадження зелених стандартів, включаючи забезпечення фінансових можливостей, розвитку людського капіталу, підвищення технічної експертизи і подолання логістичних та операційних бар'єрів у наступних напрямках:

- на законодавчому рівні створення систем, що забезпечать сталість проєктів і планів відновлення;
- навчання архітекторів та дизайнерів, підготовку обладнання та вирішення широкого кола питань, таких як закупівлі, розвиток людського потенціалу та підвищення обізнаності громадськості, щоб прокласти шлях до сталої відбудови;
- впровадження пілотних проєктів, демонстрація переваг сталої відбудови, включаючи комфорт проживання, вплив на здоров'я та економію коштів, для подальшого масштабування.

Висновки.

Таким чином, навіть під час війни, Україна може стати прикладом для наслідування, демонструючи переваги сучасних «зелених» будівель. Зразкові проєкти, створені сьогодні, можуть бути масштабовані в наступні десятиліття, слугуючи орієнтирами для сталого розвитку. Для забезпечення підтримки з боку громадськості та зацікавлених сторін вкрай важливо інформувати суспільство про переваги сучасних стандартів – підвищений комфорт проживання, покращення здоров'я та економію коштів. Пілотні проєкти мають не лише демонструвати ці переваги, а й слугувати навчально-тренінговими центрами для навчання майбутніх спеціалістів та фахівців. Унікальна стійкість України та її технологічний досвід створюють міцний фундамент для обміну знаннями та просуванням інноваційних рішень у сфері «зеленого» відновлення.

Список використаних джерел:

1. Rol staloho rozvytku u vidnovlenni Ukrainy: pidsumky zakhodu [The role of sustainable development in the restoration of Ukraine: event results]. 4 hrudnia 2024 roku. <https://ukrainian-climate-office.org> [in Ukrainian].
2. Anton Kuchyn, Yevhen Hrebonozhko. (2024) Stratehichni priorytety ta instrumenty rozbudovy natsionalnoi innovatsiinoi systemy Ukrainy dlia zabezpechennia staloho rozvytku [Strategic priorities and tools for building the national innovation system of Ukraine to ensure sustainable development]. *Derzhavne upravlinnia. State Administration. Bulletin of the Taras Shevchenko National University of Kyiv*, 2(20)/2024, 70-81. <https://doi.org/10.17721/2616-9193.2024/20-11/12>

ПЕРЕХІД ВІД DESIGN-DRIVEN ДО DATA-DRIVEN СИСТЕМ У БУДІВЕЛЬНОМУ ПРОЕКТУВАННІ

Андрій Потеха, аспірант факультету будівництва, цивільної та екологічної інженерії ¹ (ORCID: 0009-0008-8187-1049),

¹ Вінницький національний технічний університет, Адреса: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95

АНОТАЦІЯ. *Design-driven підхід, уособлений BIM-технологіями, вже виявив свою ефективність у структурованому обміні й координації моделей протягом життєвого циклу об'єкта. Проте його обмеження – висока вартість впровадження, навчальні бар'єри, технічна та організаційна складність, проблеми інтеоперабельності та безпеки даних – ставлять під сумнів доцільність подальшого ексклюзивного використання таких систем. Data-driven підхід, натомість, робить ставку на автоматизований збір, обробку та аналітику даних із відкритих та стандартних форматів, забезпечуючи гнучкість, масштабованість та прозорість процесів. Ця теза аналізує існуючі design-driven/BIM-рішення, виокремлює їх недоліки, окреслює шляхи трансформації у data-driven системи та демонструє переваги й перспективи їх розвитку.*

Ключові слова: *Building Information Modeling (BIM); design-driven; data-driven; інтеоперабельність; автоматизація; аналітика; Machine Learning;*

Вступ. Індустрія будівництва зазнала глибокої цифрової трансформації: від традиційних 2D-чертежів і паперових специфікацій ми перейшли до інтегрованих 3D-моделей, які об'єднують архітектурні, конструктивні та інженерні рішення в єдиному цифровому середовищі. Саме на цьому етапі на арену вийшов Building Information Modeling (BIM) — методологія, яка забезпечила

прозорість процесів проєктування та координації, дозволила автоматизувати виявлення колізій і значно знизити кількість помилок у будівельній документації.

Проте на практиці application-орієнтований характер BIM-систем показав і свої обмеження. По-перше, висока вартість ліцензій на CAD-ПЗ та супутню IT-інфраструктуру перетворює перехід на BIM на значне капіталовкладення, доступне передусім великим гравцям ринку. По-друге, необхідність глибокого навчання персоналу й узгодження внутрішніх процесів створює організаційні бар'єри, які гальмують адаптацію технології в малому та середньому бізнесі. Нарешті, навіть стандартизований формат IFC не здатен повністю гарантувати збереження усіх метаданих і геометричної точності при міграції між різними платформами, що призводить до фрагментації даних і дублювання робіт. Ці виклики зумовлюють пошук нових парадигм, де головним активом стають не параметричні моделі, а структуровані дані, відкриті формати та автоматизовані аналітичні конвеєри, що заклали основу data-driven підходу в будівництві.

Аналіз літературних джерел. У наукових працях останніх років чітко окреслюється поступ від традиційних BIM-систем до data-driven підходів у будівництві. Дослідження [1] виокремлює двадцять три ключові чинники обмеження BIM, серед яких висока вартість ПЗ, складність інтеперабельності та навчання персоналу. Схожі висновки робить [2] й стратегічний аналіз інтеграції Big Data в BIM: хоча великі масиви даних підвищують гнучкість моделювання, «важкі» CAD-формати й досі знижують швидкість і точність обміну інформацією. Зокрема, систематичний огляд стану й викликів data-driven construction [3] узагальнює, як імплементація поточкових ETL-конвеєрів, відкритих форматів (JSON, CSV) та хмарних API змінює парадигму роботи з даними у проєктуванні й експлуатації об'єктів.

Мета роботи. Дослідження парадигми design-driven у будівельному проєктуванні з метою ідентифікації її ключових обмежень та вузьких місць, а також розробка концептуального фреймворку переходу до data-driven систем, які базуються на автоматизованому зборі, стандартизації та аналітиці структурованих даних.

Матеріали і методи. У якості основних матеріалів для дослідження використовувалися наукові статті та галузеві звіти з тематики BIM-технологій та data-driven підходів у будівництві, технічна документація стандартів IFC та JSON-BIM, офіційні технічні нотатки платформи DataDrivenConstruction.io, а також приклади відкритих наборів даних із порталу open construction data.

Виклад основного матеріалу. Building Information Modeling (BIM) виникла як відповідь на необхідність централізувати всі дані про проєкт у єдиній інтегрованій тривимірній моделі, де архітектурні, конструктивні й інженерні рішення поєднані з атрибутами матеріалів, обсягами та технологічними даними. Завдяки цьому здійснюється автоматизоване виявлення колізій, координується робота різних дисциплін і генерується точний перелік матеріалів для кошторисного розрахунку [1]. Проте з часом проявилися суттєві обмеження: по-перше, пропріетарні формати (RVT, NWD) ускладнюють обмін між різними CAD-системами, а конвертація через IFC часто призводить до втрат метаданих і неточностей у геометрії. По-друге, необхідність глибокого навчання персоналу та значні капіталовкладення в ліцензії й інфраструктуру створюють високий бар'єр входу, особливо для малих і середніх організацій. По-третє, структурно design-driven підхід акцентує увагу на візуалізації й параметризації моделей, але не охоплює гнучких інструментів для аналізу великих масивів даних та прогнозування на основі реального ходу будівництва.

Трансформація підходу проєктування починається з переосмислення основного артефакту: замість «важкої» тривимірної моделі акцент переноситься на структурування даних і їхній простий обмін через відкриті формати (JSON, CSV). Застосовуються ETL-конвеєри, які автоматично імпортують інформацію з DWG/IFC у табличні бази даних чи хмарні сховища без потреби запускати CAD-додаток. Крім того, у межах data-driven екосистеми з'являються модулі потокової аналітики (stream processing) для обробки даних з IoT-пристроїв на майданчику в реальному часі та API-інтерфейси для швидкого запиту звітів про обсяги матеріалів чи стан монтажних робіт [4]. Паралельно розробляються конвертери та SDK, які дозволяють інтегрувати будь-які CAD-системи з BI-платформами (Power BI, Tableau) або середовищами машинного навчання (Python/Pandas, scikit-learn).

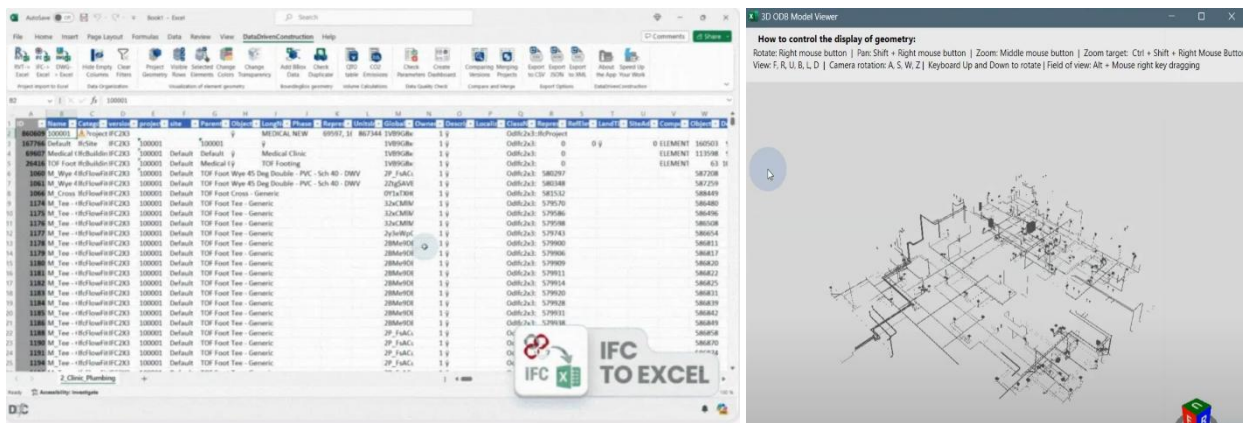


Рис.1. Конвертація IFC моделі в єдиний Data-set

У порівнянні з традиційними design-driven (BIM) підходами, data-driven системи забезпечують радикальне спрощення входу, оскільки інженеру достатньо базових навичок роботи з таблицями (Excel, SQL) або веб-інтерфейсом, а не складних CAD-додатків. Використання легковагих відкритих форматів (JSON, CSV) і REST-API усуває необхідність купувати дорогі ліцензії та витратити ресурси на навчання персоналу в роботі з пропрієтарними системами.

Важливою перевагою є реальний час обробки даних: завдяки потоковій аналітиці (stream processing) та інтеграції з IoT-пристроями на будмайданчику можна миттєво отримувати інформацію про хід робіт, стан обладнання чи умови навколишнього середовища. Це дає змогу оперативно виявляти відхилення від плану та коригувати графіки й ресурси без затримок [5].

Аналітична глибина та прогнозування є ще одним ключовим ресурсом data-driven екосистем: структуровані дані відразу готові для машинного навчання та статистичних моделей. Наприклад, аналіз історичних показників затримок дозволяє побудувати ймовірнісні моделі ризиків, а модулі ML-прогнозів цін на будматеріали – передбачати коливання вартості з високою точністю [6].

З точки зору масштабованості, хмарні сервіси дозволяють одночасно обробляти тисячі проєктів без потреби в локальній IT-інфраструктурі. Команди можуть динамічно підключати нові джерела даних – мобільні застосунки для інспекцій, фінансові звіти чи датчики стеження за витратами матеріалів – і вивантажувати результати в єдине сховище для гнучкого аналізу.

Інтероперабельність досягається завдяки відкритим стандартам обміну: дані проєкту в універсальних форматах зберігаються без втрат метаданих і легко переміщуються між BI-інструментами (Power BI, Tableau) та середовищами Python/Pandas. Це усуває проблему «островів даних» і дублювання робіт при конвертації з пропрієтарних форматів.

Використання data-driven підходу також покращує безпеку та якість прийняття рішень. Завдяки централізації даних із різних джерел проєктні менеджери мають повну картину ризиків і можуть приймати зважені рішення на ранніх етапах, що дозволяє зменшити непередбачені витрати й уникнути простоїв.

Нарешті, економічна ефективність досягається через оптимізацію ресурсів, зниження кількості помилок і уникнення зайвих витрат на переробки. Data-driven системи дозволяють контролювати запаси матеріалів у режимі реального часу та прогнозувати їхній дефіцит, що сприяє зменшенню відходів і підвищенню стійкості будівництва. Таким чином, data-driven системи демонструють переваги за такими ключовими напрямками:

- Бар'єр входу: низький – достатньо знань роботи з таблицями та API.
- Реальний час: миттєва обробка даних із IoT і сенсорів.
- Аналітика й AI: структуровані дані готові для ML/AI-моделей.
- Масштабованість: хмара без локального ПЗ.
- Інтероперабельність: відкриті формати й REST-API без втрат даних.
- Прогнозування й ризик-менеджмент: глибокі аналітичні моделі на базі історії та реального часу.
- Економічна ефективність: оптимізація матеріалів, зниження відходів, уникнення переробок.

Ці потужності створюють основу для подальшого злиття data-driven BI, цифрових двійників та «самонавчальних» систем у будівництві.

Обговорення. У результаті проведеного аналізу виявлено, що перехід від design-driven до data-driven систем істотно підвищує швидкість та точність прийняття проектних рішень завдяки миттєвому доступу до структурованих даних і можливості побудови прогнозних моделей на їх основі. Використання легковагих форматів (JSON, CSV) та REST-API дозволяє знизити ризики втрати метаданих і геометрії під час обміну інформацією, що підтверджує високу інтероперабельність data-driven екосистем.

Інтеграція потокової аналітики та IoT-пристроїв дає змогу оперативно відстежувати хід будівельних робіт у реальному часі й своєчасно коригувати графіки, що значно зменшує ймовірність простоїв. Крім того, готовність даних до роботи з модулями машинного навчання сприяє глибокому аналізу ризиків та оптимізації витрат матеріалів і часу, тоді як масштабованість хмарних сервісів усуває потребу в потужній локальній IT-інфраструктурі.

Висновки. У ході дослідження підтверджено, що класичні design-driven (BIM) системи відіграли ключову роль у цифровізації процесів будівельного проектування, проте їхня залежність від пропріетарних форматів, високі бар'єри входу та обмежена аналітична гнучкість створюють суттєві перепони для широкомасштабного впровадження.

Перехід до data-driven екосистем відкриває можливість формувати єдину базу структурованих даних у відкритих форматах, що значно спрощує обмін інформацією та інтеграцію з BI-та ML-інструментами без втрат метаданих. Використання потокової аналітики й IoT-пристроїв забезпечує моніторинг будівельних процесів у реальному часі й своєчасне коригування графіків, що сприяє мінімізації ризиків затримок і додаткових витрат.

Список використаних джерел:

1. Enshassi, M. A., Al Hallaq, K. A., & Tayeh, B. A. (2019). Limitation factors of Building Information Modeling (BIM) implementation. *The Open Construction & Building Technology Journal*, 13, 189–196. <https://doi.org/10.2174/1874836801913010189>
2. Sompolgrunk, A., Banihashemi, S., Golzad, H., & Le Nguyen, K. (2024). Strategic alignment of BIM and big data through systematic analysis and model development. *Automation in Construction*, 168, 105801. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105801>
3. Huang, Y., Shi, Q., Zuo, J., Pena-Mora, F., & Chen, J. (2021). Research status and challenges of data-driven construction project management in the big data context. *Journal of Advanced Civil Engineering Practice*, 2021, Article ID 6674980. <https://doi.org/10.1155/2021/6674980>
4. Li, F., Laili, Y., Chen, X., Lou, Y., Wang, C., Yang, H., Gao, X., & Han, H. (2023). Towards big data driven construction industry. *Journal of Industrial Information Integration*, 35, 100483. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2023.100483>
5. Huang, X., Liu, Y., Huang, L., Onstein, E., & Merschbrock, C. (2023). BIM and IoT data fusion: The data process model perspective. *Automation in Construction*, 149, 104792. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104792>
6. Dave, B., Buda, A., Nurminen, A., & Främling, K. (2018). A framework for integrating BIM and IoT through open standards. *Automation in Construction*, 95, 35–45. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.07.022>

3D-ДРУК ТРИМАЧА ДЛЯ ВІДБОРУ КЕРНІВ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ВІМ-ТЕХНОЛОГІЙ

Микола Корзаченко, к.т.н, доцент¹ (ORCID: 0000-0002-5674-8662)

Ігор Петренко, асистент¹,

¹Національний університет «Чернігівська політехніка», вул. Шевченка 95, 14035, Україна

АНОТАЦІЯ. У роботі представлено розробку тримача для відбору кернів, виготовленого за допомогою 3D-друку з використанням ВІМ-технологій. Актуальність роботи зумовлена необхідністю виконання обстежень ґрунтової основи під існуючими фундаментами в умовах обмеженого простору. Описано конструкцію установки, що дозволяє здійснювати відбір зразків ґрунту під певним кутом без суттєвого порушення основи будівлі. Зазначено переваги використання пристрою з урахуванням фіксації точного місця відбору та інтеграції результатів досліджень у цифрову модель об'єкта. Пристрій виготовлено із сучасного термопластика PETG з використанням технології тривимірного друку. Матеріал характеризується відмінною корозійною стійкістю та витривалістю до агресивних зовнішніх чинників, що дає змогу ефективно використовувати тримач під час обстежень у вологих, підземних або відкритих середовищах. Отримана конструкція є мобільною, універсальною та може застосовуватись при реконструкції та реставрації історичних споруд.

Ключові слова: 3D-друк; пристрій; керн; ВІМ-технології; обстеження

Вступ. У сучасних умовах обстеження та дослідження стану ґрунтової основи будівель і споруд, особливо під існуючими фундаментами, є важливою складовою забезпечення їхньої надійності та безпеки. Зокрема, актуальною задачею є відбір зразків ґрунту під різними кутами в обмежених просторових умовах, що часто виникають при обстеженнях об'єктів історичної забудови та пам'яток архітектури. Проте відбір зразку під кутом є не простою задачею. В першу чергу це стосується пристрою, який би допомагав встановлювати керновідбірний снаряд під певним кутом. Кафедрою технологій зварювання та будівництва Національного університету «Чернігівська політехніка» створено тримач для відбору кернів, виготовлений методом 3D-друку із використанням ВІМ-технологій.

Аналіз літературних джерел. Під час проєктування тримача для відбору монолітів ґрунту було опрацьовано низку літературних джерел, що висвітлюють конструктивні рішення ґрунтовідбірного обладнання [1, 2], методики польових ґрунтових досліджень [3, 4] та конструктивні особливості пристроїв тримачів [5, 6, 7]. Отримані дані лягли в основу технічного завдання для 3D-моделювання тримача та дозволили врахувати усі необхідні конструктивні вимоги.

Мета роботи. Створити надійний тримач для відбору кернів під певним кутом.

Виклад основного матеріалу. Тримач для відбору кернів виготовлено методом 3D-друку із використанням ВІМ-технологій на етапі проєктування та інтеграції в цифрову модель об'єкта.

Конструкція установки складається з трьох основних елементів (рис. 1):

- а) основа – платформа, що забезпечує стійкість під час роботи;
- б) направляюча – жорсткий регульований елемент, який дозволяє задавати необхідний кут буріння або відбору;
- в) захват – знімний фіксатор бурового інструменту або кернодобувача.

Виготовлення тримача для відбору кернів виконано із сучасного термопластика PETG за допомогою технології 3D-друку. Обраний матеріал відзначається високими антикорозійними властивостями та стійкістю до впливу агресивного зовнішнього середовища, що дозволяє ефективно застосовувати тримач під час обстежень у вологих, підземних або відкритих умовах. PETG не втрачає міцності та геометричних характеристик під дією вологи, дощу чи тривалого перебування у ґрунті. Крім того, матеріал має стійкість до ультрафіолетового випромінювання, що важливо для тривалого зберігання та використання обладнання на відкритому повітрі. Тримач не піддається корозії, не вимагає додаткового захисного покриття та зберігає свої властивості за температур від -20 до +60 °С. Це забезпечує тривалу експлуатацію без втрати функціональних якостей.

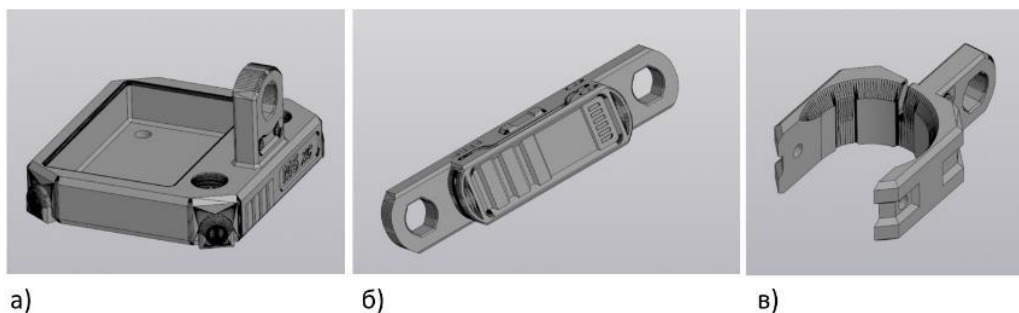


Рис.1. Модель пристрою підготовлена для 3D друку: а) основа; б) напрямна; в) захват

Тримач розроблено спеціально для приладу, призначеного для відбору основних монолітів ґрунту непорушеної структури, що використовується у складі польової лабораторії Литвинова. Під час розробки конструкції враховувалися особливості експлуатації ґрунтовідбірного обладнання в умовах обмеженого простору та різноманітних ґрунтів. Діаметр захватної частини тримача підбирався з урахуванням діаметра направляючого циліндра ґрунтовідбірної гільзи, яка має циліндричну форму та дозволяє відбирати монолітний зразок без порушення його природної структури. Використання ВІМ-технологій дозволило на етапі моделювання створити модель, та покращити її характеристики. Завдяки цьому забезпечується щільне прилягання тримача до гільзи, що гарантує фіксацію і точність при відборі зразків. Конструкція оптимізована для застосування в польових умовах, а виготовлення методом 3D-друку дозволяє оперативно адаптувати тримач під гільзи різних діаметрів та модифікацій.

Установка є розбірною, легкою та транспортабельною, що дозволяє здійснювати відбір зразків безпосередньо на будівельному майданчику або в обмежених умовах існуючих споруд (рис. 2).

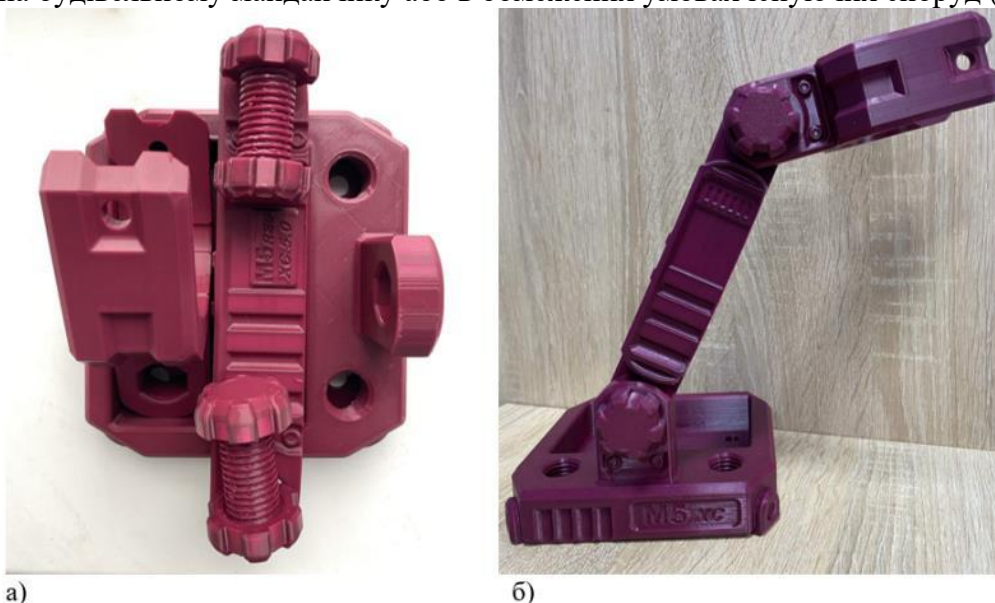


Рис.2. Пристрій для відбору кернів під кутом виконаний із сучасного термопластика PETG за допомогою технології 3D-друку: а) в зібраному стані для транспортування; б) в робочому стані

Основа пристрою має чотири отвори для кріплення до ґрунту гвинтовими анкерами. Така конструкція забезпечує надійну фіксацію пристрою в робочому положенні навіть на нестійких чи пухких ґрунтах, запобігаючи його зміщенню під час відбору зразків. Окрім цього є можливість додаткового привантаження основи плитою або блоками. Це зменшує похибки, пов'язані з мимовільним переміщенням гільзи та дозволяє уникнути її перекосів.

Переваги установки:

- можливість відбору зразків під заданим кутом;
- мобільність, швидке переміщення з точки на точку з фіксованим кутом відбору;

- можливість точного позиціонування місця відбору та занесення цих даних в ВІМ-модель об'єкту, це дозволяє інтегрувати дані про місця відбору та результати випробувань безпосередньо у цифрову модель об'єкта;

- можливість оперативного виготовлення тримача за індивідуальними розмірами для конкретного об'єкта.

Недоліки:

- обмеження глибини відбору;

- під час переміщення на нову точку потреба в попередній перевірці просторових умов та наявності комунікацій;

- необхідність забезпечення контролю за міцністю пластикових елементів під час роботи.

Висновки. У процесі розробки тримача для відбору монолітів ґрунту активне застосування ВІМ-технологій дозволило суттєво оптимізувати всі етапи проєктування. Це дозволило підібрати оптимальні параметри тримача, визначити його розміри та форму. Вдалося точно визначити діаметр направляючого циліндра та узгодити геометрію тримача із конструкцією приладу. У ВІМ-моделі були змодельовані всі стикувальні вузли та навантаження, які виникають під час експлуатації. Це дало можливість виявити потенційні конструктивні недоліки на етапі проєктування та оперативно внести корективи. Також ВІМ-модель допомогла автоматично згенерувати креслення та специфікації для 3D-друку, що суттєво пришвидшило виготовлення та зменшило ризики похибок під час друку.

Розроблений тримач може бути застосований для оперативного моніторингу стану ґрунтів під існуючими спорудами, особливо в умовах реконструкції та реставрації історичних об'єктів.

Список використаних джерел:

1. AMS Samplers. URL: https://www.ams-samplers.com/?utm_source=chatgpt.com (date of application: 16.05.2025).
2. Geotech Environmental Equipment. URL: https://www.geotechenv.com/soil_sampling_kits.html?utm_source=chatgpt.com (date of application: 16.05.2025).
3. Jean-Louis Briaud (2013) Geotechnical Engineering. Unsaturated and Saturated Soils. USA : Wiley. 998 p.
4. Burt G. Look (2007) Handbook of geotechnical investigation and design tables / Burt G. Look. London : Taylor and Francis. 331 p.
5. Huang, C. Y., Meier, N., Caffrey, M., Wang, M., & Olieric, V. (2020). 3D-printed holders for in meso in situ fixed-target serial X-ray crystallography. Applied Crystallography, 53(3), 854-859. <https://doi.org/10.1107/S1600576720002897>
6. Meloni, G. N., & Bertotti, M. (2017). 3D printing scanning electron microscopy sample holders: A quick and cost effective alternative for custom holder fabrication. PloS one, 12(7), e0182000. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0182000>.
7. Tsvetanova, L., & Kuvandjiev, N. (2022). Design and 3D printing of holders for XRF analysis requiring small volumes of sample. Industry 4.0, 7(1), 18-20. <https://stumejournals.com/journals/i4/2022/1/18>

АКТУАЛЬНІСТЬ ЕФЕКТИВНОЇ ПЕРЕРОБКИ БЕТОНУ У ВТОРИННИЙ ЩЕБІНЬ І ОБЛАДНАННЯ, ЩО ПРИ ЦЬОМУ ВИКОРИСТОВУЄТЬСЯ

Максим Миколайчук, студент¹,

Владислав Кібаленко, студент¹,

Олександр Дьяченко, доцент, к.т.н., доцент¹(ORCID: 0000-0001-8199-2504),

Володимир Слюсар, асистент, аспірант¹(ORCID: 0000-0003-4332-3144),

¹ Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних сил 31, 03037, Україна

АНОТАЦІЯ. В сучасному світі поруч із пошуком рішень, що дозволяють оптимізувати процеси виробництва і скоротити часовий проміжок отримання споживачем товарів і послуг, необхідно зменшувати вплив на природне середовище. Використання вторинного щебню у будівництві дозволяє скоротити об'єм як використання природних ресурсів так і об'єм будівельного сміття, що йде на захоронення. В роботі виконано огляд переліку процесів, які виконуються при переробці бетону у вторинний щебінь, визначені схеми, які використовуються при організації процесу переробки і їх відмінність. Запропоновано використання мобільних установок для виконання операцій по переробці, що дозволяє скоротити тривалість обслуговуючих процесів і кількість учасників логістичного ланцюга. Проаналізовані види конструкцій мобільних установок і обладнання, яке використовується для переробки бетону, визначені їх недоліки і переваги. Визначено, що найбільш ефективним рішенням є використання у комплексі кількох окремих мобільних установок для дроблення і сортування разом з допоміжним навісним обладнанням для екскаваторів, що дозволить отримувати необхідний фракційний склад щебню.

Ключові слова: мобільні установки; переробка; вторинний щебінь; логістичний ланцюг; подрібнення; сортування.

Вступ. Будівлі і споруди, у залежності від їх технічного стану, історичної цінності, енергоефективності, можуть вимагати процесів технічного обслуговування, модернізації, відновлення і ремонту, реставрації або ж врешті решт - демонтажу. Під час проведення цих процесів з'являється велика кількість будівельного сміття

Утворення будівельного сміття і відсутність його переробки породжує дві проблеми:

- виснаження природних ресурсів;
- засмічення великих площ і ділянок.

Тому необхідність збільшення відсотку переробки твердих побутових відходів загалом і будівельного сміття зокрема у вторинну сировину і її використання у різних галузях промисловості є стратегічною для України.

Аналіз літературних джерел.

В Україні у більшості випадків будівельне сміття потрапляє на сміттєзвалища або полігони твердих побутових відходів(ТПВ). Відсоток будівельного сміття, яке переробляється на вторинну сировину в Україні не оцінено і досі[1].

Відсоток перероблених в Україні твердих побутових відходів, станом на 2022 рік від загальної кількості – 3,2%[2].

Переробка бетону у сировину з метою її повторного використання є перспективним напрямком, який дозволить зменшити площу полігонів і звалищ[3]. Також повторне використання перероблених заповнювачів, отриманих шляхом дроблення і сортування будівельних відходів дозволяє зменшити видобування і споживання ресурсів, таких як щебінь і пісок[4].

Мета роботи.

Метою роботи є виконання аналізу недоліків і переваг використання мобільних рішень для дроблення і сортування бетону при виготовленні вторинного щебню.

Досягнення мети здійснюється шляхом виконання наступних завдань:

- виконати огляд стану проблеми переробки бетону в Україні;
- визначити ключові процеси, які відбуваються в процесі переробки;
- проаналізувати види обладнання, які використовуються для виконання окремих операцій в процесі переробки у вторинний щебінь і визначити недоліки і переваги різних технічних рішень, наявних на ринку.

Матеріали і методи. Процеси при переробці бетону у вторинний щебінь(recycled concrete aggregate - RCA) поділяють на основні, обслуговуючі і допоміжні.

До основних процесів відноситься безпосередньо технологічні процеси переробки(розділення плит на шматки, видалення арматури, подрібнення і сортування вторинного щебню, тощо), а до обслуговуючих логістичні процеси(складування, розвантаження і навантаження транспортних засобів, транспортування матеріалів). Допоміжні процеси пов'язані з обслуговуванням обладнання, виробленням енергії.

У процесі переробки бетону утворюється логістичний ланцюг учасників, довжина якого відрізняється у залежності від типу обладнання, яке використовується на всіх етапах переробки.

Безпосередньо на ефективність функціонування логістичного ланцюга впливає тривалість основних і обслуговуючих операцій.

Ефективність окремого логістичного ланцюга, який утворюється у процесі організації процесу переробки бетону визначається на основі витрат часу на окремі процеси:

$$E_{\text{Л}} = (\sum_{i=1}^n q_{\text{цi}} / \sum_{j=1}^k q_{\text{лj}}) \cdot 100\% \rightarrow \max \quad (1)$$

де $\sum_{i=1}^n q_{\text{цi}}$ - витрата часу на процеси, що забезпечують збільшення цінності готової продукції, год;
 $\sum_{j=1}^k q_{\text{лj}}$ - сумарні витрати часу на виконання усіх процесів ланцюга, год.

Причому витрати часу на виконання основних операцій порівняно невисокі, а от обслуговуючі операції вимагають більших витрат часу. Тому доцільним є пошук рішень, які дозволять скоротити логістичний ланцюг учасників процесу переробки і як результат знизить витрати часу на обслуговуючі процеси. З цією метою пропонується використання сучасних мобільних комплектів обладнання, що складається з окремих установок для виконання основних операцій в межах безпосередньо місць виникнення відходів.

Виклад основного матеріалу. Станом на 2020 рік в Україні понад 80% житлового фонду збудовано ще до 1980 років. З точки зору енергоефективності таке житло не відповідає сучасним вимогам по енергоспоживанню, є незручним до користування інклюзивними групами населення та вимагає частих ремонтів інженерних мереж.

Вже зараз необхідно задумуватися над рішенням житлової кризи і виконувати планування і впровадження процесів по оновленню житлового фонду. Оновлення може відбуватися двома основними шляхами: перший – знесення старих або пошкоджених будинків і зведення на їх місці нових і сучасних, другий – якісні і комплексні процеси моніторингу, відновлення, ремонту, модернізації і реставрації вже існуючих будинків.

Бетонні вироби і конструкції є одними із найпоширеніших при зведенні будівель і споруд. Поширенню бетону сприяють його фізико-механічні параметри і властивості. Оскільки він є довговічним і міцним матеріалом, порівняно легко протистоїть ерозії, високим температурам, підвищеній вологості, корозії і атмосферних впливів, вимагаючи мінімального обслуговування і ремонту. Через поширеність бетону як будівельного матеріалу, при демонтажі будівель і споруд, левову частку серед будівельних відходів займає саме бетон(42% від загальної кількості будівельних відходів).

Найпоширеніші утилізації бетону: захоронення або переробка.

Бетон можна переробити у вторинний щебінь, що знаходить застосунок у якості наповнювача для інших бетонних виробів, а також для використання у нижніх шарах автомобільних доріг.

Плюси, які виникають при повторному використанні бетону у якості наповнювача: 1 – такий наповнювач дешевший; 2 – зменшення викидів шкідливих речовин і вуглецю; 3 – зменшення використання природніх речовин у якості наповнювача; 4 – стає будівництво(мінімізація негативного впливу і максимізація позитивного при будівництві)[4].

Надалі був виконаний огляд мобільних подрібнювально-сортувальних установок, а також суміжного обладнання, що представлено на ринку і аналіз їх недоліків і переваг.

Найбільш універсальним обладнанням є мобільні подрібнювально-сортувальні установки, які об'єднують у собі шасі, опорну раму з аутригерами, дробарку, грохот, конвеєрні системи і додаткове обладнання(рис.1). Одна установка виконує визначений перелік операцій дроблення і сортування, що дозволяє отримувати необхідний за розміром матеріал, розсортований за фракційним складом.

Однак серед недоліків варто відмітити те, що подібне устаткування має високу масу і габаритні розміри, що призводить до необхідності отримання спецдозволів для транспортування дорогами загального користування. А установки, які мають гусеничне шасі вимагають ще й використання спеціальних великогазових трейлерів(тралів) для переміщення між будмайданчиками. Вартість їх купівлі і обслуговування є достатньо високою через складність конструкції.



Рис. 1. Мобільні подрібнювально-сортувальні установки на колісному(а) і гусеничному (б) шасі

Меншою універсальністю наділені мобільні установки, які використовуються лиш для окремих операцій(рис.2). До прикладу модульні подрібнювальні установки або мобільні сортувальні. Таке устаткування має у своєму складі обладнання для виконання основної операції(сортування або подрібнення) і обслуговуючої(транспортування з допомогою конвеєрів).

Однак таке устаткування можна компонувати на будівельному майданчику відповідно до того, який розмір матеріалу буде надходити на подрібнення і які необхідно отримувати цільові фракції готової продукції. Серед переваг також можна відмітити – простоту конструкції, меншу ціну купівлі і витрат на обслуговування. Маса і габаритні розміри таких установок дозволяють транспортувати їх без використання великогазових тралів і без отримання спецдозволів. А у випадку сортувальних установок на колісному шасі потреба у тралах відпадає повністю.

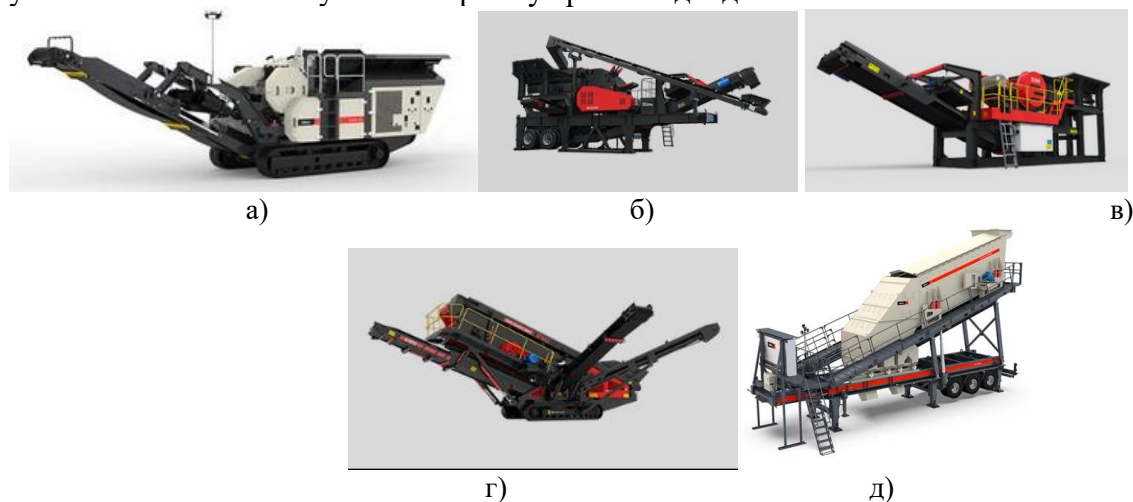


Рис.2. Пересувні установки для дроблення(а), (б), (в) та сортування (г), (д)

Супутні операції подрібнення, сортування або просіювання щебню можна виконувати з допомогою змінного обладнання, яке встановлюється на екскаватори(рис.3). Незважаючи на те, що таке обладнання має низьку продуктивність і ефективність у нього є істотна перевага. Маючи одну базову машину можна за потреби виконувати ті чи інші операції просто замінивши обладнання, яке прикріплено до стріли.

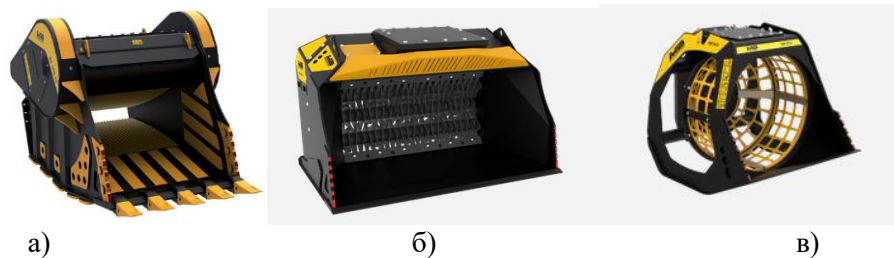


Рис.3. Змінне устаткування екскаваторів для виконання подрібнення(а), просіювання(б) і сортування(в) сипких матеріалів

Обговорення. При незмінних об'ємах переробки і споживання, підвищення ефективності функціонування лежить у площині скорочення кількості учасників логістичного ланцюга у каналі, обслуговуючих операцій, оптимізації їх виконання задля скорочення витрат.

Для скорочення переліку учасників і кількості обслуговуючих операцій варто використовувати схему організації процесу переробки, у якій використовуються мобільні подрібнювально-сортувальні установки і супутнє універсальне обладнання, що доставляються безпосередньо на будівельний майданчик, де виконується подрібнення бетону і сортування вторинного щебеню на фракції, після чого готовий продукт розподіляють і транспортують між замовниками.

Висновки. На основі виконаних огляду процесу переробки і аналізу обладнання, що при цьому використовується визначено:

- використання універсального обладнання дозволяє виконувати широкий перелік основних операцій у технологічному процесі переробки безпосередньо на будмайданчику і скоротити логістичний ланцюг, який утворюється у процесі переробки будівельних матеріалів

- найбільш доцільним до використання або розробки є установки, які використовуються для виконання окремих операцій(дроблення або сортування) через простоту конструкції, меншу масу і нижчу вартість.

- у рамках студентського наукового гуртка пропонується розробка комплектів обладнання, яке можна швидко переміщувати з одного будівельного об'єкта до іншого, розгортати і компонувати у залежності від фракційного складу готової продукції.

Список використаних джерел:

1. *Otsinka vplyvu na dovkillia pry budivnytstvi polihoniv TPV [Environmental impact assessment of the construction of solid waste landfills]* (2023) MCL.KIEV.UA. <https://mcl.kiev.ua/ocenka-vozhdejstva-na-okruzhajushhuju-sredu-pri-stroitelstve-poligonov-tbo/>
2. *Smittieva katastrofa v Ukraini: yak pozbutysia vidkhodiv zavdyaki dosvidu YeC [Garbage disaster in Ukraine: how to get rid of waste thanks to the EU experience]* (2022 June 27) ECOPOLITIC. <https://ecopolitic.com.ua/ua/news/smittieva-katastrofa-v-ukraini-yak-pozbutysya-vidkhodiv-zavdyaki-dosvidu-ies/>
3. Marinković, S., & Carević, V. (2019). Comparative studies of the life cycle analysis between conventional and recycled aggregate concrete. *New trends in eco-efficient and recycled concrete*, Woodhead Publishing, 257-291. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102480-5.00010-5>
4. Zhang, Y., & Lu, R. (2025). Effects of recycled lightweight aggregates as coarse aggregates on workability, mechanical and microstructural behavior of recycled concrete. *Construction and Building Materials*, 482, 141694. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.141694>

КОНЦЕПЦІЯ СИСТЕМИ «РОЗУМНОГО» ВИРОБНИЦТВА НА ОСНОВІ ІОТ

Марія Данильченко, студентка¹,

Євгеній Горбатюк, доцент, к.т.н., доцент¹ (ORCID: 0000-0002-8148-5323),

Дмитро Мішук, доцент, к.т.н., доцент¹ (ORCID: 0000-0002-8263-9400),

¹Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна

АНОТАЦІЯ. На сьогоднішній день існує велика конкуренція серед компаній за увагу споживача. При цьому необхідно враховувати, що високотехнологічні виробництва також потребують значної кількості висококваліфікованих людських ресурсів, яких залишилося не так багато в Україні. Сучасні реалії економічного розвитку держави потребують нових підходів до реалізації стратегій автономності, ефективності та безпечності. Це означає, що в подальшому багато компаній будуть реалізовувати проекти, які мають високу ефективність та автономність в прийнятті рішень. Один з варіантів розвитку є створення «розумних» виробництв. Стрімкий рівень розвитку систем автоматики та інформаційних систем дозволяє розробляти та впроваджувати нові рішення для реалізації концепцій «розумних» виробництв. Зокрема, технології «інтернету речей» (ІоТ) є основою розвитку «розумних виробництв» та їхнього впровадження в реальні проекти.

Технологія розумного виробництва містить концепції «розумних» пристроїв, хмарних обчислень та машинного навчання. Розумні пристрої забезпечують як збір та передачу даних до систем керування та до серверів в інтернет мережі, а також і зворотні дію, тобто зчитування зовнішніх даних з мережі та виконання відповідних дій. Хмарні обчислення забезпечують комунікацію між «розумними» пристроями та відповідними сервісами системи управління, яка розташовується в мережі інтернет. При цьому існує як локальна система керування, яка знаходиться безпосередньо поряд з виконавчим пристроєм або сенсором на підприємстві, так і глобальна, що дозволяє здійснювати підключення різних авторизованих клієнтів та здійснювати управління. Машинне навчання забезпечує аналіз великих обсягів даних для визначення закономірностей, що дозволяє оптимізувати використання ресурсів.

Ключові слова: «розумне» виробництво; концепція; інтернет речей; ІоТ.

«Інтернет речей» (ІоТ) – це технологія, яка давно вийшла за межі концепції та активно впроваджується в різні сфери життєдіяльності людини. Застосування технологій ІоТ та автоматизованого виробництва є основою для майбутнього створення цифрових міст. Застосування ІоТ в промисловості є одним з найбільш актуальних та перспективних напрямків інтеграції та формування так званих «розумних виробництв». Це підприємства нового покоління, які будуть характеризуватися високим рівнем автоматизації, гнучкості та ефективності. Все це може бути досягнуто завдяки об'єднанню різного обладнання, датчиків, програмного забезпечення та мережевої інфраструктури [1-3].

За допомогою впровадження принципів ІоТ у виробництво можна реалізовувати такі задачі:

- здійснювати моніторинг стану обладнання в реальному часі, що дозволить прогнозувати їхній технічний сервіс та обслуговування, а також оптимізувати виробничі процеси;
- виконувати контроль всіх етапів виробництва за допомогою датчиків, встановлених на виробничих лініях, що дозволить виявляти дефекти на ранніх стадіях та забезпечувати високу якість кінцевого продукту;
- оптимізувати використання ресурсів (енергії, матеріалів), зменшення простоїв обладнання та підвищення їхньої продуктивності;
- контролювати умови праці та виявляти потенційно небезпечні ситуації на робочому майданчику, що дозволить створювати безпечне робоче середовище;
- створювати гнучкі та адаптивні виробництва за рахунок аналізу даних про технологічні процеси та ринкові тенденції.

Основними вимогами для системи моніторингу «розумного підприємства» будуть контроль загальної ефективності (ОЕЕ), час простою обладнання, витрати на одиницю продукції, рівень завантаженості обладнання та енергоспоживання [4, 5].

Розглянемо спрощену схему проекту «розумного» підприємства на основі ІоТ з Рис. 1.

Рівень пристроїв містить різноманітні датчики (температури, вологості, тиску, вібрації, переміщення, рівня заповнення тощо), виконавчі пристрої (клапани, двигуни) та систему керування, яка зазвичай побудована на основі промислових контролерів (PLC) та іншого допоміжного обладнання для управління різними пристроями. Ці пристрої збирають дані про стан обладнання,

виробничі процеси та навколишнє середовище. Наприклад, на кожен верстат встановлюються датчики вібрації, температури двигуна, споживання електроенергії. Також можуть використовуватися лічильники кількості вироблених деталей [1, 3, 5].

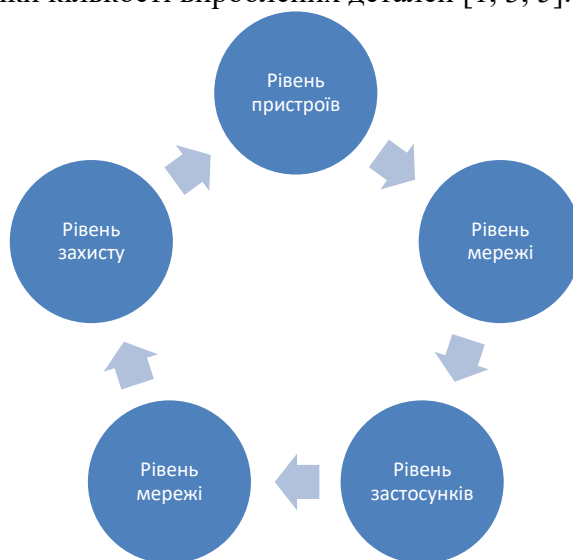


Рис. 1. Загальна архітектура «розумного» підприємства на основі IoT

Рівень мережі призначено для передачі зібраних даних через різні мережеві протоколи (наприклад, MQTT, OPC UA) до центральної платформи, а також і в зворотному напрямку, від центральної платформи до рівня пристроїв. Для цього можуть використовуватися, як дротові (Ethernet, Industrial Ethernet), так і бездротові технології (Wi-Fi, Bluetooth, LoRaWAN, NB-IoT). Дані з датчиків через промислову мережу (наприклад, Modbus TCP/IP) передаються на локальний шлюз IoT, який, у свою чергу, підключається до хмарної IoT-платформи через Ethernet або Wi-Fi. Отримані дані агрегуються та зберігаються у базі даних. За допомогою алгоритмів машинного навчання та аналітики виявляються закономірності, прогнозуються події та генеруються алгоритми майбутніх дій [4, 6, 7].

Рівень застосунків призначено для підключення різноманітних застосунків для візуалізації даних у зручному для користувача вигляді та генерування і направлення команд на актуатори та контролери для виконання корисної роботи та оптимізації процесів.

В подальших дослідженнях запропоновано дослідити систему управління електродвигуном із запропонованою архітектурою реалізації IoT, яка містить (див. Рис. 2.):

- частотний перетворювач DELFA VFD004EL43A;
- модуль arduino D1 WiFi UNO R3 ESP8266 ESP-12E;
- енкодер Opkon PRI-40-A-R6-HLD-360-ZZ-V3-2M5-R;
- локальний сервер Raspberry Pi 4 Model B.

В даній системі також передбачено комунікацію з серверами Azure та Amazone. Саме ці сервера мають розвинену архітектуру для реалізації обробки і аналізу великої кількості даних [5, 6].

Дана система керування може бути реалізована в роботизованій системі з незначними змінами та в промисловості для будівельних кранів, машин для дроблення матеріалів та ущільнення [3-5].

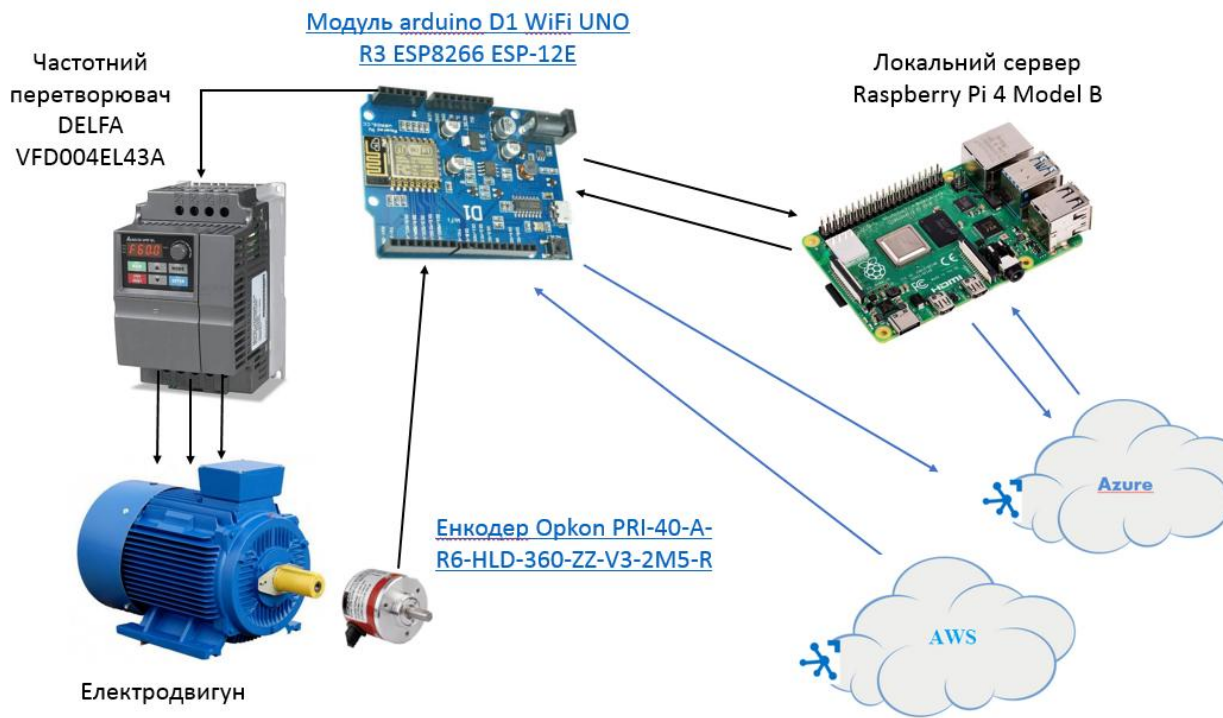


Рис. 2. Запропонована система автоматизації промислового електродвигуна засобами з IoT

Список використаних джерел

1. Woubishet Z.T., Ethiopia N., Jouni I. (2019). Internet of Things based Durability Monitoring and Assessment of Reinforced Concrete Structures. The 5th International Workshop on the Future of the Internet of Things (FIT 2019) August 19-21, 2019, Halifax, Canada. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.08.096>.
2. E.G.M. Petrakis, S. Sotiriadis, T. Soultanopoulos, P.T. Renta, R. Buyya, N. Bessis (2018). Internet of Things as a Service (iTaaS): Challenges and solutions for management of sensor data on the cloud and the fog Internet of Things, 3-4, 156-174.
3. Mishchuk, D., Bojchenko A. (2019). Rozrobka koncepciyi sistemi keruvannya robotom dlya shtukaturnih robot na osnovi nejronnoyi mrezhki [Development of the concept of control system work for plaster works based on neural network]. Girnichi, budivelni, dorozhni ta me-liorativni mashini [Mining, construction, road and reclamation machines], Nr. 93, 46-60. – (in Ukrainian). <https://doi.org/10.32347/gbdmm.2019.93.0501>.
4. Boychenko A., Mishchuk D. (2020). Possibilities of using the packet TensorFlow neural network design library for the kinematic study of a manipulator. Girnichi, budivelni, dorozhni ta meliorativni mashini [Mining, construction, road and reclamation machines], Nr. 95. 14-24. <https://doi.org/10.32347/gbdmm2020.95.0201>.
5. Mishchuk, Y., & Mishchuk, D. (2022). IoT-based industrial automation systems. Girnichi, budivelni, Dorozhni Ta meliorativni Mashini, (96), 42–50. <https://doi.org/10.32347/gbdmm2020.96.0501>.
6. Xin-Liang Wang, & Qing-Gai Huang. (2018). Infusion Monitoring Communication Model of Smart Home Based on Coloured Petri Net. Int J Bioautomation, 22(3), 239–252. <https://doi.org/10.7546/ijba.2018.22.3.239-252>.
7. Teslyuk, V. M., Kazarian, A. H., & Kazimira, I. Y. (2021). Data processing in smart home systems using models based on petri network theory. Scientific Bulletin of UNFU, 31(1), 131-136. <https://doi.org/10.36930/40310122>

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИЙ РЕНЕСАНС: ІННОВАЦІЙНІ БУДІВЕЛЬНІ ТЕХНОЛОГІЇ У ПОВОЄННІЙ ВІДБУДОВІ УКРАЇНИ

Ганна Шпакова, професор, д.е.н, професор¹(ORCID: 0000-0003-2124-0815),

Андрій Шпаков, професор, д.е.н, професор¹(ORCID: 0000-0002-7498-4271),

Ірина Глушенко, старший викладач¹,

¹Київський національний університет будівництва і архітектури, просп. Повітряних Сил, 31, Україна

АНОТАЦІЯ. У статті розглянуто комплекс економічних, нормативно-правових, фінансових, технологічних та гуманітарних чинників, які формують стратегію відновлення будівельної галузі України після воєнних дій. На основі аналізу державної «Стратегії термомодернізації до 2050 р.», директив ЄС, програм ЄІБ, KfW та USAID, а також емпіричних даних пілотних проєктів показано, що поєднання політики, інвестицій і цифровізації здатне зменшити енергоємність будівель та скоротити викиди протягом найближчого часу. Описано результати термомодернізації житлового фонду міст, впровадження систем для управління даним у громадах, розгортання модульного житла для ВПО та випробування низьковуглецевого бетону із технологією CarbonCure. Обґрунтовано доцільність переходу до децентралізованої відновлюваної генерації та модернізації систем централізованого тепlopостачання з тепловими насосами. Запропоновано рекомендації щодо створення фонду «GreenRebuild», поширення ESCO-моделі, інтеграції BIM та EMS у навчальні програми та забезпечення відкритих енергетичних даних для об'єктів, що фінансуються за рахунок державно-приватного партнерства.

Ключові слова: термомодернізація; енергоефективність; технології; будівництво; цифровізація

Вступ. Пріоритетні напрямки розвитку будівельної галузі, як і загальноекономічні та політичні тренди розвитку економіки більшості країн, визначаються ведучими країнами світу, серед яких перші місця займають США, Японія, ФРН, Франція, Великобританія. Тому країни, які прагнуть економічної безпеки та сталого розвитку, ретельно стежать за тенденціями розвитку будівельного сектора економіки ведучих країн з метою формування прогнозів та розробки перспективних планів. Проте реальність українського будівельного простору, обумовлена тривалою військовою агресією, вносить зміни в тенденції та пріоритети не тільки європейських, але й світових будівельних корпорацій, зобов'язує переглядати світові стандарти безпеки, актуальність зведення захисних споруд різних типів і призначень. Значних змін та модернізації зазнають технології виконання робіт [1].

Мета роботи. Повномасштабна агресія проти України перетворила реконструкцію національної інфраструктури на виклик безпрецедентного масштабу, але водночас відкрила вікно можливостей перейти від «відбудови-як-було» до стійкого енергоефективного відтворення.

Виклад основного матеріалу. Урядова «Стратегія термомодернізації будівель до 2050 р.» офіційно задає орієнтир: зменшити кінцеве споживання енергії у секторі будівель щонайменше на 15% до 2030 р. і довести більшість споруд до рівня майже нульового енергоспоживання (NZEB) [2]. Реалізація таких амбіційних планів відбувається під впливом комплексу економічних, регуляторних, фінансових, технологічних і гуманітарних чинників, що формують першу траєкторію розвитку будівельної галузі. Першочерговий економічний стимул – дефіцит енергоресурсів та зростання тарифів – підсилюється нормативними змінами. Україна імплементує директиви ЄС, зокрема нову редакцію Директиви (EU) 2023/1791 «Про енергоефективність», де закріплено принцип Energy Efficiency First для всіх інвестицій у тепlopостачання й будівництво [3]. Цей регуляторний тиск уже трансформує проєктні вимоги: нові й реконструйовані об'єкти мають проходити обов'язковий енергоаудит і досягати щонайменше класу «В». Фінансову базу таких перетворень формують міжнародні інституції. Європейський інвестиційний банк відкрив гарантію «Ukraine Facility» для модернізації систем централізованого тепlopостачання зі загальним обсягом до 200 млн. євро, доступних через «Укрексімбанк» для муніципальних і приватних замовників [4]. Німецький банк KfW, у свою чергу, виділив 24,2 млн. євро на масштабування програми енергоефективного модульного житла для внутрішньо переміщених осіб [5].

Другий напрямок розвитку галузі ґрунтується на світовій тенденції розбудови мереж міні-заводів. Тим паче, розгалуженість підприємств, їх «мініатюрність» є великою перевагою під час обстрілів: ураження одної невеликої ланки комплексу або виробництва малої потужності не

приводить до зупинки всього виробничого комплексу. Тобто в умовах військового стану та ризиків повітряних атак пріоритет за «компактними» технологічними лініями. Звичайно, війна не є нормальними умовами функціонування економіки, проте і в мирні часи жоден регіон не застрахований від стихійних лих та катаклізмів різного походження – від природних до техногенних [1].

Наступна тенденція, що спостерігається в розвитку будівництва ведучих країн світу, це структурні зрушення в будівельному комплексі. Одним з найважливіших факторів підвищення конкурентоздатності будівельних організацій є скорочення термінів будівництва, максимальне «стискання» всього інвестиційного циклу (передпроектне обґрунтування, проектування, будівництво, здача в експлуатацію), виконання робіт з високою якістю. Тут перспективи полягають в цифровізації та індустріальному виробництві.

Будівництво ж захисних об'єктів стратегічного й тактичного значення, ремонтні та відновлювальні роботи – це комплекс робіт, який за визначенням має бути виконаний в найкоротші терміни. Тому має місце тенденція удосконалювання методів керування інвестиційним процесом, спрямованих на скорочення тривалості всіх його етапів, підвищення рівня координованості та взаємодії всіх учасників процесу. Також скорочення термінів будівництва можна досягти за рахунок індустріалізації будівництва і переносу багатьох процесів з будмайданчика в заводські умови. В цьому разі можливі істотні структурні зрушення у витратах на користь сполучених галузей [6].

Консорціум українських і британських закладів вищої освіти запустив BIM-платформу «ReBuildUA», що вже містить бібліотеку з понад тисячі двохсот типових NZEB-елементів; дослідження Loughborough University демонструє, що використання BIM дає змогу скоротити відходи бетону на будмайданчику майже на дванадцять відсотків [7]. Паралельно логістичні обмеження, спричинені руйнуванням транспортної інфраструктури під час військових дій, стимулюють перехід до модульного та позамайданчикowego виробництва. Проєкт ONOVA уже спорудив більше ніж шістьсот модульних квартир, теплопровідність оболонки яких удвічі краща за мінімальні вимоги ДБН [8]. Гуманітарний вимір – необхідність швидко забезпечити житлом сотні тисяч переселенців – підштовхує державу й донорів фінансувати саме такі заводські рішення, бо вони інтегрують утеплення і інженерію ще на конвеєрі, знижуючи витрати та час монтажу [5].

Не менш важливою є децентралізація генерації. Відновлювані джерела енергії виявилися стійкішими до ракетних ударів, ніж великі ТЕС: приватна компанія DTEK змогла відновити понад 400 МВт сонячних потужностей упродовж тижня після обстрілів, тоді як ремонт теплових блоків триває місяцями [9]. Публічно-приватні партнерства з GE Vernova та Honeywell спрямовані на розбудову ще одного ГВт вітро- та сонячної генерації до 2027 р., що значно підсилить енергетичну автономію критичних об'єктів. Також це стосується політики захисту довкілля. Проте основним шляхом в Україні в умовах воєнного та повоєнного періодів буде залишатись переробка вторинної сировини – використання будівельного лому. В такий спосіб можливо буде «утилізувати» більшість зруйнованих об'єктів, очистити територію від звалищ та забезпечити галузь будівельною сировиною.

Слід відзначити, що вирішення багатьох проблем будівництва, пов'язаних з питаннями екології, неможливе без використання наукомістких технологій. Зростання ролі таких технологій є також основною тенденцією розвитку будівництва [1]. Одним із вузьких місць лишається система централізованого теплопостачання, що втратила частину генерації та мереж. USAID ESP спільно з муніципалітетами Славутича, Луцька, Хмельницького та Охтирки затвердили нові схеми теплопостачання, орієнтовані на когенерацію, теплові насоси й відновлювану енергію [10].

Висновки. Для закріплення позитивної динаміки необхідно синхронізувати будівельні, енергетичні та кліматичні політики через міжвідомчу платформу RISE; запустити національний фонд «GreenRebuild», який надаватиме гранти та податкові пільги для пілотних низьковуглецевих матеріалів і 3D-друку; інтегрувати BIM та EMS-модулі у програми технічних університетів; розширити ESCO-контракти на всі муніципальні будівлі й започаткувати ринок «зелених» облігацій під гарантії міжнародних фінансових інституцій; а також забезпечити публічну звітність про енерговитрати об'єктів, зведених коштом держави та донорів. Такі кроки сформують ланцюг, в якому інновації, фінанси й регуляція підсилюють одне одного та рухають галузь до кліматичної нейтральності. З метою подолання відставання від ведучих

закордонних країн та виходу на міжнародний рівень як конкурентоздатного виробника продукції в Україні має бути реалізована значна кількість інвестиційних задач. Серед них корінне відновлення виробничого потенціалу країни, формування повноцінної виробничої і соціальної інфраструктури, розвиток ринку житла й ін. Виконання таких масштабних інвестиційних програм можливо лише у відносно стабільних економічних і політичних умовах при досить високих середньорічних темпах розвитку будівництва, а також за умови випереджального розвитку матеріально-технічної бази будівництва та її корінного переозброєння [1]. Отже, післявоєнна відбудова України дедалі більше сприймається не як повернення до довоєнного стану, а як можливість побудувати якісно нову, низьковуглецеву та цифровізовану інфраструктуру. Синергетичний вплив зовнішніх фінансових джерел, європейських регуляторних зобов'язань і місцевих технологічних інновацій уже дозволяє скорочувати енергоємність будівель і відсоток викидів CO₂ у будівельних матеріалах, закладаючи підвалини для кліматично нейтральної України-2050.

Список використаних джерел:

1. Shpakova, H.V., Shpakov, A.V. (2023). Post-war reconstruction of Ukraine: plans and realities. *Notes of modern science. Multidisciplinary scientific journal*, 10, 116-118. https://www.newroute.org.ua/wp-content/uploads/2023/11/nsn_10.pdf. [in Ukrainian].
2. Cabinet of Ministers of Ukraine (2023). *Strategy for thermal modernization of buildings in Ukraine until 2050*. <https://www.kmu.gov.ua/>. [in Ukrainian].
3. European Union. Directive (EU) 2023/1791 on energy efficiency (revised version). Official Journal L 231 (2023). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32023L1791&qid=1748077158735>.
4. European Investment Bank. Ukraine District Heating Facility (20240760). (2025). <https://www.eib.org/en/projects/pipelines/all/20240760>.
5. Ministry for Reintegration of Temporarily Occupied Territories of Ukraine. (2023, December 8). *German bank KfW has allocated €24.2 million for energy-efficient housing for IDPs*. <https://unity.gov.ua/en/2023/12/08/german-bank-kfw-has-allocated-e24-2-million-for-energy-efficient-housing-for-idps/>.
6. Recovery and reconstruction of Ukraine. EU Solidarity with Ukraine. An official website of the European Union. https://eu-solidarity-ukraine.ec.europa.eu/eu-assistance-ukraine/recovery-and-reconstruction-ukraine_en.
7. Demian, P. (2023). Building Information Modelling (BIM) Collection. *Loughborough University Repository*. <https://doi.org/10.17028/rd.lboro.c.6845652>.
8. ONOVA. Modular houses for IDPs and warming centres. (2024). <https://onova.org.ua/en/projects/modulni-budynky-dlia-pereselentsiv-ta-punkty-obihrivu>. [in Ukrainian].
9. Prengaman, Peter. Associated Press. (2024, November 20). *Ukraine has seen success in building clean energy, which is harder for Russia to destroy*. <https://apnews.com/article/ukraine-clean-renewable-energy-russian-bombing-distributed-1f226213742cc057f9f65208167e6f38>.
10. International District Energy Association. (2024, March 4). *Ukrainian cities are modernizing heat supply systems with the USAID Energy Security Project*. <https://www.districtenergy.org/blogs/district-energy/2024/04/03/ukrainian-cities-are-modernizing-heat-supply-syste>.

ОСОБЛИВОСТІ ОРГАНІЗАЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ РІШЕНЬ ПРИ ВІДНОВЛЕННІ ПОВОЄННИХ ТЕРИТОРІЙ

Олександр Молодід, професор, д.т.н., професор¹ (ORCID: 0000-0001-8781-6579),
Володимир Рашківський доцент, к.т.н., завідувач кафедри будівельних машин¹ (ORCID: 0000-0002-5369-6676),
Микола Пристайло, доцент, к.т.н., доцент¹ (ORCID: 0000-0003-3151-4680),
Юрій Засць, аспірант¹ (ORCID: 0000-0002-9711-042X),

¹ Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних сил 31, 03037, Україна

АНОТАЦІЯ. У статті розглянуто ключові організаційні та технологічні підходи до відновлення територій, що зазнали руйнувань унаслідок бойових дій. Особлива увага приділена аналізу досвіду смт Бородянка Київської області — одного з населених пунктів, які постраждали під час активних бойових дій у 2022 році. Окреслено основні виклики, застосовані технології, форми міжсекторальної взаємодії та проблеми, які виникали під час реалізації відновлювальних програм. Наведено рекомендації щодо подальшої оптимізації процесів реконструкції з урахуванням принципів сталого розвитку.

Ключові слова: повоєнне відновлення; організаційні рішення; технології реконструкції; смт Бородянка; гуманітарна допомога; інфраструктура; сталий розвиток.

Вступ. Повоєнне відновлення територій є одним із найважливіших викликів для України у ХХІ столітті. Руйнування інфраструктури, житла, закладів освіти й охорони здоров'я, а також порушення соціальної тканини громад потребують системного та швидкого реагування. Водночас кожна територія має свої унікальні особливості, що впливають на підходи до її реконструкції. Сmt Бородянка є яскравим прикладом комплексного впровадження організаційно-технологічних рішень в умовах повоєнного відновлення.

Мета роботи. Аналіз існуючих та розробка ефективних організаційно-технологічних рішень при виконанні будівельних відновлюваних робіт на повоєнних територіях.

Матеріали і методи. Основними матеріалами для аналізу є експертне наукове дослідження процесів, аналіз закордонного досвіду.

Виклад основного матеріалу.

Після звільнення Бородянки від російських окупаційних військ у березні 2022 року першочерговим завданням стало забезпечення безпеки та базових життєвих потреб населення. Відновлення здійснювалося за участю:

- Місцевих органів влади, які координували оперативне реагування.
- Державної служби України з надзвичайних ситуацій, яка займалася розмінуванням і демонтажем аварійних споруд.
- Гуманітарних місій — зокрема, ООН, ЮНІСЕФ, ініціативні волонтерські організації.
- Волонтерських ініціатив та місцевих громадських організацій.

Було створено **єдиний центр координації допомоги**, який об'єднував державні та недержавні зусилля з надання гуманітарної, правової та психологічної допомоги.

У 2022 році між Київським національним університетом будівництва і архітектури та Бородянською ОТГ було заключено договір про виконання аналізу та надання експертних висновків по пошкодженим та зруйнованим об'єктах нерухомості на території громади. В ході проведення обстежень спеціалістами КНУБА було виконано обстеження понад 200 об'єктів нерухомості та надано близько 20 експертних висновків (рис.1) [1].

В умовах обмежених ресурсів та часу застосовувалися такі технологічні рішення:

Виконання аерофотозйомки для фіксації масштабів руйнувань та планування реконструкції [2–5].

Монтаж швидкокомтованих модульних конструкцій — як тимчасове житло та об'єкти соціальної інфраструктури (ЦНАП, модульне містечко для тимчасового переміщених осіб, центри незламності).

Утеплення й модернізація будівель із впровадженням енергоефективних технологій (енергозберігаючі вікна, теплоізоляція, сонячні панелі) на об'єктах, віднесених до I-II категорій пошкоджень.

Внесення результатів експертного обстеження в цифрові реєстри пошкоджень (через портал «Дія», система «єВідновлення») — для обліку руйнувань, реєстрації заяв на компенсації та підвищення прозорості процесів.

Слід відзначити, що особливу увагу було приділено соціальному відновленню: реалізовано програми психологічної допомоги, зокрема через мобільні бригади фахівців; запроваджено програми підтримки сімей з дітьми та осіб, що втратили житло; забезпечено відновлення освітньої мережі: реконструйовано ЗОШ №3, заклад дошкільного виховання «Буратино» (рис. 2) [5].

Під час реалізації відновлювальних заходів було виявлено низку типових проблем:

- Нерівномірність доступу до допомоги через перевантаженість системи та обмеженість ресурсів.
- Труднощі логістики в умовах зруйнованої інфраструктури.
- Повільне проходження бюрократичних процедур, що стримувало відновлення.
- Відсутність єдиного цифрового інструментарію моніторингу прогресу відбудови.



Рис. 1. Обстеження об'єктів нерухомості в смт. Бородянка: а – експертна група обстеження КНКУБА; б – обстеження несучих конструкцій місцевого палацу культури; в – обстеження зруйнованої будівлі центру реабілітації ЮНЕСКО, г – обстеження житлової будівлі.

На основі аналізу прикладів повоєнного відновлення в інших країнах (Ірак, Боснія і Герцеговина, Японія) доцільним є впровадження таких підходів:

- Розробка локальних стратегій відновлення із залученням громад.
- Інтеграція принципів сталого розвитку (зелена енергетика, циркулярна економіка).
- Децентралізація процесів управління, що дає громадам більшу гнучкість і автономність.
- Посилення контролю за використанням коштів — через цифрові інструменти та залучення громадського моніторингу.

Зауважимо, що процеси відбудови житлових приміщень по території смт. Бородянка виконуються у відповідності до рекомендацій експертних висновків, виконаних для громади експертною групою КНУБА.

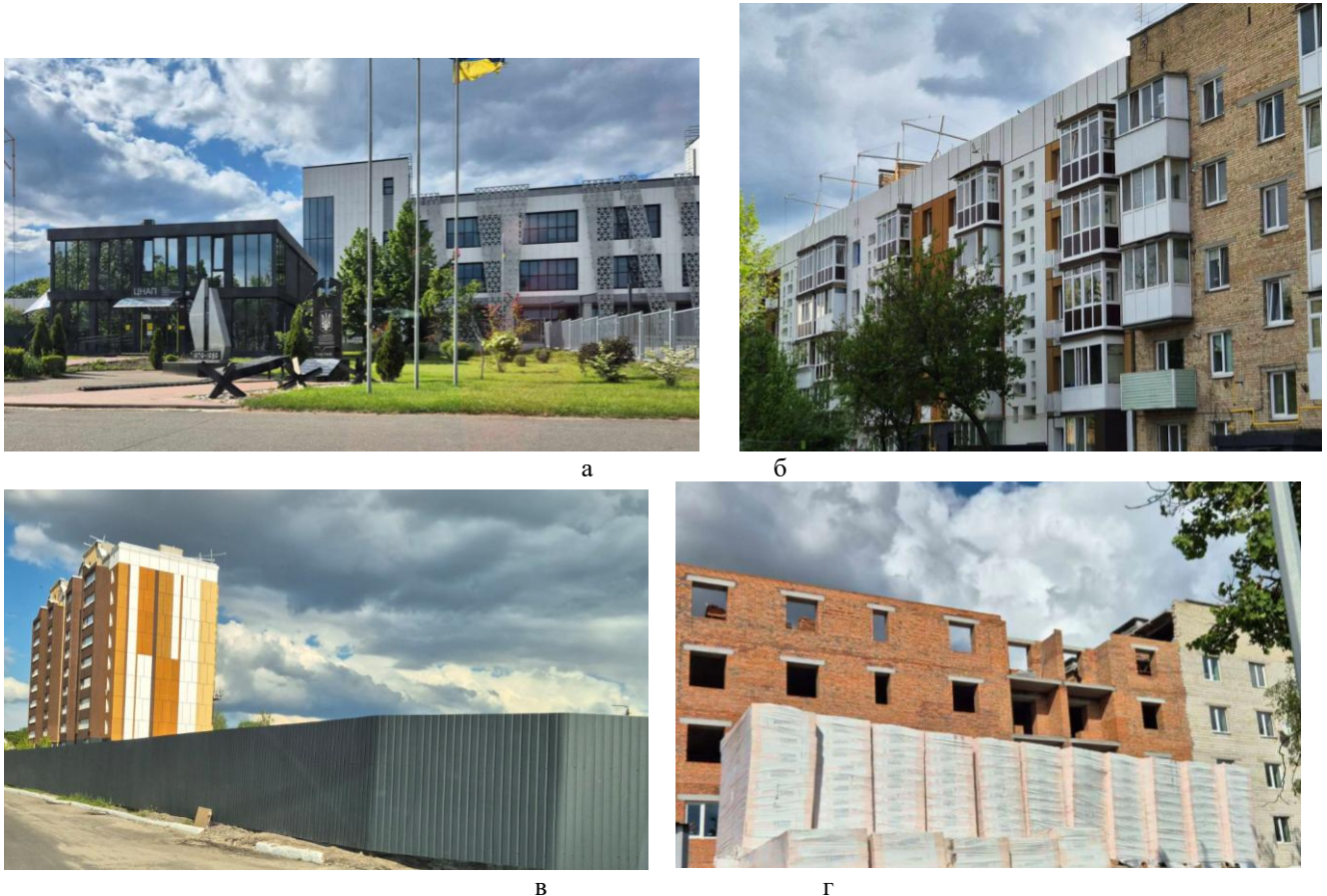


Рис. 2. Реалізація процесів відновлення: а – відновлення центру реабілітації та ЦНАП; б – виконання процесів енергоефективності будівель; в – демонтаж будівель; г - секційне відновлення будівель.

Висновки. Відновлення повоєнних територій вимагає комплексного підходу, де поєднуються технологічна інноваційність, ефективне управління та соціальна чутливість. Сmt Бородянка демонструє, що навіть у критичних умовах можна досягти відчутного прогресу за рахунок міжсекторальної взаємодії, мобілізації громади та застосування сучасних технологій. Досвід цієї громади може стати цінним прикладом для масштабування на інші постраждалі регіони України.

Список використаних джерел:

1. Molodid O. S., Kovalchuk O. Yu., Rashkivskiy V. P., Plokhuta R. O., Musiiaka I. V. (2022) *Osoblyvosti obstezhennia budivel ta sporud, shcho zaznaly poshkodzen vnaslidok voiennykh dii* [Peculiarities of inspection of buildings and structures damaged as a result of military operations]: materialy XII Mizhnar. nauk.-prakt. konf “Kompleksne zabezpechennia yakosti tekhnolohichnykh protsesiv ta system (KZIaTPS–2022)”, 26–27 travnya 2022 roku. Chernihiv: NU «Chernihivska politehnika». <https://conference-chernihiv-polytechnik.com/materiali-konferentsiyi/kzyatps-2022/> [in Ukrainian].
2. Rashkivskiy V., Demianenko R. (2023) *Study of the adequacy of the BIM model in the survey of damaged building objects* : Conference Proceedings “2023 IEEE International Conference on Smart Information Systems and Technologies , May 4–6, 2023. Astana, Kazakhstan. <https://doi.org/10.1109/SIST58284.2023.10223588> .
3. Varukha V., Nechyporuk V., Rashkivskiy V. (2023) *Rozrobka mekhanizovanoi dilianky dlia vykonannia budivelnykh robot na terytoriiakh, shcho postrazhdaly v khodi viiskovykh dii* [Development of a mechanized site for construction work in the territories, which suffered during military operations].

territories affected by military operations]: tezy dop. XXII Mizhnar. onlain-konf. nauk.-ped. pratsivnykiv, nauk. spivrobitnykiv ta aspirantiv «Problemy ta perspektyvy rozvytku tekhnichnykh ta bioenerhetychnykh system pryrodokorystuvannia: konstruiuvannia ta dyzain», 19–20 kvitnya 2023 roku. K.: NUBiP. https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u232/zbirnik_npppdf.

4. Rashkivskiy, V., Teteriatnyk, O., Balaka, M. & Fedyshyn, B. (2023). Analiz tekhnolohii vidnovlennia pidzemnykh komunikatsii ta shliakhy vyryshennia mozhlyvykh uskladnen [Restoration technologies analysis of underground pipelines and ways to solve possible complications]. *Girnychi, budivelni, dorozhni ta melioratyvni mashyny*, (101), 44–52. <https://doi.org/10.32347/gbdmm.2023.101.0401> [in Ukrainian].
5. Bilokon S. S., Didkivskiy O. R., Rashkivskiy V. P. (2024) *Mechanization of preparatory work on construction sites in post-war territories: tezy dop. XXIII Mizhnar. onlain-konf. nauk.-ped. pratsivnykiv, nauk. spivrobitnykiv ta aspirantiv* «Problemy ta perspektyvy rozvytku tekhnichnykh ta bioenerhetychnykh system pryrodokorystuvannia: konstruiuvannia ta dyzain», 11–12 kvitnya 2024 roku. K.: NUBiP. https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u232/zbirnik_1.pdf.

ВИКОРИСТАННЯ МЕХАНІЗОВАНИХ КОМПЛЕКСІВ ПРИ ВИКОНАННІ ДЕМОНТАЖНИХ РОБІТ НА ПОШКОДЖЕНИХ ОБ’ЄКТАХ НЕРУХОМОСТІ

Євгеній Горбатюк доцент, к.т.н., доцент ¹ (ORCID: 0000-0002-8148-5323),

Максим Балака доцент, к.т.н., доцент ¹ (ORCID: 0000-0003-4142-9703),

Дмитро Литвинюк, аспірант¹,

Олександр Тіняков, аспірант¹,

¹ Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних сил 31, 03037, Україна

АНОТАЦІЯ. У статті розглянуто особливості використання механізованих комплексів у процесі демонтажу пошкоджених внаслідок бойових дій об’єктів нерухомості. Здійснено класифікацію типів обладнання, наведено приклади їх застосування на території України, зокрема в деокупованих населених пунктах Київської області. Проаналізовано переваги механізованих методів демонтажу у порівнянні з ручними та висвітлено основні виклики під час їх застосування. Акцентовано увагу на безпекових аспектах, особливо у контексті мінної небезпеки та наявності вибухонебезпечних предметів.

Ключові слова: демонтаж; механізовані комплекси; руйнування; важка техніка; відновлення; безпека; аварійні об’єкти.

Вступ. Внаслідок збройної агресії російської федерації значна кількість об’єктів нерухомості в Україні зазнала часткового або повного руйнування. Для безпечного проживання населення, а також для створення умов для подальшого відновлення міст і селищ, необхідним етапом є демонтаж аварійних будівельних конструкцій. З огляду на великі обсяги таких робіт, їх ефективне виконання потребує застосування механізованих комплексів, здатних істотно прискорити демонтажні процеси, знизити рівень загроз для персоналу та оптимізувати витрати ресурсів [1–7].

Мета роботи. Аналіз використання механізованих комплексів при виконанні демонтажних робіт на пошкоджених об’єктах нерухомості.

Матеріали і методи. Основними матеріалами для аналізу є науково-технічна та довідкова література, відкриті інтернет-джерела, звіти та візуальне оцінювання.

Виклад основного матеріалу.

У демонтажних роботах на пошкоджених об’єктах нерухомості використовуються такі основні типи машин і механізмів (рис. 1–2):

- гідравлічні екскаватори з навісним обладнанням (гідроножиці, гідромолоти, гідроножиці-крашери) для руйнування бетонних та цегляних конструкцій;
- телескопічні маніпулятори з дистанційним управлінням для роботи в небезпечних або важкодоступних місцях;
- мобільні крани для демонтажу великих секцій конструкцій та підйому важких елементів;
- подрібнювачі бетону (мобільні дробарки) для переробки уламків на будівельний щебінь;
- колісні та гусеничні навантажувачі для розчищення територій від уламків.

Усі ці машини можуть об’єднуватись у механізовані демонтажні комплекси, які функціонують як єдина система з централізованим управлінням, налагодженою логістикою та інтегрованими

засобами безпеки. В свою чергу, механізовані комплекси відрізняються за типом, призначенням та функціональними можливостями.

Практика застосування в Україні підтверджує ефективність такого підходу. Зокрема, після деокупації Київської області у 2022 році, внаслідок значних руйнувань у Бородянці, Ірпені та Гостомелі, налагоджено широкомасштабне використання механізованої техніки для проведення демонтажних робіт. Це дозволило суттєво прискорити очищення територій, мінімізувати участь людей у небезпечних зонах та створити належний рівень безпеки.



а)



б)

Рис. 1. Попередня переробка будівельних матеріалів пошкоджених будівель:

а) завантаження в дробильну установку; б) перевантаження попередньо подрібненого матеріалу



а)



б)

Рис. 2 Організація переробного майданчика:

а) ділянка подрібнення зі зволожувальною установкою; б) відокремлення металевих каркасів залізобетонних конструкцій

Державна служба України з надзвичайних ситуацій та муніципальні служби застосовували екскаватори з гідроножцями для зносу обвалених поверхів багатоквартирних будинків [1, 5]. Компанії-підрядники використовували мобільні крани для зняття бетонних панелей з небезпечних секцій. Водночас ініційовано проєкти з вторинної переробки уламків бетону для використання в підсипці та будівництві тимчасових доріг [3].

Переваги застосування механізованих комплексів у демонтажних роботах:

- використання механізованих комплексів дозволяє скоротити тривалість демонтажних робіт у 5–10 разів порівняно з ручними методами;

- зменшення потреб у фізичній присутності людей у небезпечних зонах, що значно знижує рівень травматизму;
- обробка великих обсягів уламків, при якій техніка здатна ефективно працювати з важкими, масивними та великогабаритними конструкціями;
- комплекси можуть функціонувати навіть у разі часткової відсутності під'їзних шляхів або руйнування критичних ділянок будівель.

Обмеження використання механізованого демонтажу:

- ефективна й безпечна експлуатація техніки вимагає досвідчених операторів і технічного супроводу виконання робіт;
- закупівля або оренда спеціалізованої техніки потребує значних інвестицій, особливо у випадках масштабних проєктів;
- перед початком демонтажу в зоні бойових дій обов'язковим є проведення інженерної розвідки та очищення від вибухонебезпечних предметів.
- руйнування сильно пошкоджених будівель супроводжується ризиком неконтрольованого обвалу, що ускладнює застосування важкої техніки.

Однією з ключових умов ефективного та контрольованого виконання демонтажних робіт є створення умов комплексної безпеки для персоналу, навколишнього середовища та суміжної інфраструктури. Безпека охоплює як підготовчий етап, так і безпосередньо процес демонтажу.

Основні заходи безпеки включають:

- попереднє інженерне обстеження конструкцій (визначаються несучі елементи, зони потенційного обвалу, ступінь пошкоджень та черговість демонтажу, що дозволяє уникнути неконтрольованих руйнувань);
- розмінування та перевірка на наявність вибухонебезпечних предметів (особливо актуально для деокупованих територій, де існує загроза наявності мін, снарядів або інших вибухонебезпечних залишків);
- використання засобів колективного захисту (захисні щити, фізичні бар'єри, сигнальні огорожі, системи світлової та звукової сигналізації, які створюють безпечну робочу зону);
- системи моніторингу стану конструкцій (контроль за станом об'єкта здійснюється за допомогою лазерних нівелірів, інклінометрів, сенсорів вібрації або деформації, що дає змогу оперативно реагувати на зміну стану конструкцій та запобігти аваріям).

З огляду на масштабні руйнування інфраструктури та житлового фонду внаслідок збройної агресії, розвиток напрямку механізованого демонтажу в Україні є надзвичайно актуальним. Для підвищення ефективності та сталості таких робіт доцільно реалізувати низку стратегічних ініціатив.

Розширення державної підтримки – необхідно забезпечити доступ громад до фінансування для придбання сучасних механізованих демонтажних комплексів, зокрема шляхом державних програм, субсидій або партнерств із міжнародними донорами. Формування мобільних демонтажних підрозділів – створення спеціалізованих мобільних команд із відповідною технікою дозволить оперативно реагувати на потреби регіонів, де ситуація потребує швидких втручань. Розвиток національної індустрії переробки уламків – інтеграція будівельного рециклінгу у процес демонтажу сприятиме зменшенню обсягів відходів, економії природних ресурсів та формуванню замкнутого циклу у сфері будівництва. Навчання та підвищення кваліфікації персоналу – важливо організовувати регулярне навчання операторів техніки, інженерів та керівників проєктів щодо роботи з сучасним обладнанням, а також дотримання чинних стандартів безпеки та екологічних вимог.

Ці кроки сприятимуть не лише прискоренню відновлення зруйнованих територій, а й формуванню системного підходу до управління будівельними відходами, підвищенню технологічної спроможності держави та зміцненню її інфраструктурної стійкості.

Висновки. Застосування механізованих комплексів при виконанні демонтажних робіт є критично важливим етапом у процесі відновлення пошкоджених територій. Використання сучасної техніки дає змогу не лише істотно прискорити проведення демонтажу, очищення та підготовки територій до подальшої реконструкції, але й значною мірою зменшити ризики для працівників, задіяних у цих роботах. Досвід, накопичений в Україні, підтверджує ефективність комплексного підходу, що поєднує передові технічні рішення з належною організацією процесу, дотриманням

вимог безпеки та тісною координацією між усіма учасниками робіт.

Список використаних джерел:

1. State Emergency Service of Ukraine (2023). Zvit pro avariino-riatuvalni roboty v deokupovanykh rehionakh [Report on emergency and rescue operations in the deoccupied regions]. <https://dsns.gov.ua/upload/2/0/4/5/2/3/6/zvit-pro-osnovni-rezultati-diialnosti-dsns-u-2023-roci.pdf> [in Ukrainian].
2. Pochka, K., Prystailo, M., Delembovskyi, M., Balaka, M., Maksymiuk, Y. & Polishchuk, A. (2025). Features of the Dynamic Interaction Between the Elastically Deformed Working Body of a Ripper-Pick and the Soil. In: Prentkovskis, O., Yatskiv (Jackiva), I., Skačkauskas, P., Karpenko, M., Stosiak, M. (eds) TRANSBALTICA XV: Transportation Science and Technology. TRANSBALTICA 2024. Lecture Notes in Intelligent Transportation and Infrastructure. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-85390-6_52.
3. Diachenko, O. S., Anopko, A. Ie. & Hoxh, V. V. (2023). Ohliad tekhnolohii pererobky vidkhodiv budivelnoi haluzi i mozhylyvist yikh vykorystannia pry pererobtsi zruinovanykh budivel i sporud [Overview of waste processing technologies of the construction industry and the possibility of their use in the processing of destroyed buildings and structures]. Energy-saving machines and technologies: Proceedings of the IV International Scientific and Practical Conference (May 23–25, 2023). P. 21–24. http://esmt.knuba.edu.ua/?page_id=900 [in Ukrainian].
4. Gorbatiyuk, Ie., Balaka, M. & Mishchuk, D. (2021). Information model of bulldozer-looser movement. The world of science and innovation. Abstracts of the 7th International Scientific and Practical Conference (February 10–12, 2021). Cognum Publishing House. London, United Kingdom. P. 54–59.
5. Ministry of Community and Territorial Development of Ukraine (2023). Metodychni rekomendatsii u sferi planuvannia y orhanizatsii vidnovlennia munitsypalnoi infrastruktury [Methodological recommendations in the field of planning and organizing the restoration of municipal infrastructure]. https://decentralization.gov.ua/uploads/library/file/850/vidnovlennya_2023.pdf [in Ukrainian].
6. Prystailo, M., Balaka, M., Mozharivskyi, V., Drachuk, V. & Honta I. (2024). Superposition principle of impact on the working environment of actuating elements for site preparation machines. Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University, Vol. 1 No. 105, 61–67. <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2024.105.1.61>.
7. Gorbatiyuk, I., Mishchuk, D. & Balaka, M. (2022) Development machines of boring working organs is with the causative vibroagent of vertical vibrations. Theoretical and science bases of actual tasks. Proceedings of the XXIII International Scientific and Practical Conference. Lisbon, Portugal. P. 585–587. <https://doi.org/10.46299/ISG.2022.1.23>.

ОСОБЛИВОСТІ ВИКОНАННЯ ДЕМОНТАЖНИХ РОБІТ НА ОБ'ЄКТАХ НЕРУХОМОСТІ З ПОТЕНЦІЙНОЮ НАЯВНІСТЮ ШКІДЛИВИХ БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

Володимир Рашківський доцент, к.т.н., завідувач кафедри будівельних машин¹ (ORCID: 0000-0002-5369-6676),
Костянтин Черненко доцент, к.т.н., доцент¹ (ORCID: 0000-0002-1616-5999),
Сергій Білоконь, аспірант¹,
Володимир Муляр, аспірант¹,

¹ Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних сил 31, 03037, Україна

АНОТАЦІЯ. У статті розглянуто специфіку демонтажних робіт на об'єктах, у конструкціях яких можуть міститися шкідливі або небезпечні матеріали — зокрема азбест, свинець, ртуть, полімерні компоненти, які при руйнуванні утворюють токсичні аерозолі та пил. Проаналізовано ризики, пов'язані з наявністю таких речовин, наведено порядок їх ідентифікації, особливості планування робіт та засоби індивідуального й колективного захисту. Підкреслено важливість екологічної безпеки та дотримання норм охорони праці при роботах у постраждалих регіонах України.

Ключові слова: шкідливі матеріали; демонтаж; азбест; охорона праці; утилізація; екологічна безпека; житловий фонд.

Вступ. У повоєнний період в Україні актуалізувалася проблема демонтажу великої кількості зруйнованих об'єктів нерухомості, зведених переважно у 1950–1980-х роках. Значна частина цих споруд містить шкідливі будівельні матеріали, заборонені або обмежені у використанні сучасними нормативами. До таких речовин належать, зокрема, азбестові вироби, свинцевмісні фарби, герметики з ПХВ, фреонові утеплювачі тощо. Роботи з демонтажу таких об'єктів потребують суворого дотримання технологічних, екологічних та санітарно-гігієнічних вимог [1–6].

Мета роботи. Визначення особливостей виконання демонтажних робіт на об'єктах нерухомості з потенційною наявністю шкідливих будівельних матеріалів.

Матеріали і методи. Основними матеріалами для аналізу є науково-технічна та довідкова література про вітчизняні та зарубіжні зразки сучасного дробильного обладнання, експертне оцінювання.

Виклад основного матеріалу.

Вдихання повітря, що містить азбестові волокна, може призвести до захворювань, пов'язаних з азбестом, в основному рак легенів і слизової оболонки грудної клітини. Азбест становить небезпеку для здоров'я, лише якщо азбестові волокна викидаються в повітря та вдихаються. Вплив азбесту в минулому наразі у Великобританії гине близько 4500 людей на рік. Працівники, які здійснюють технічне обслуговування та ремонт будівель піддаються особливому ризику. Між першим контактом з азбестом і його початком зазвичай проходить велика затримка захворювання. Це може коливатися від 15 до 60 років. Тільки шляхом запобігання або мінімізації цього зараз можна скоротити захворювання, пов'язані з азбестом. Зараз в Україні заборонено використовувати азбест у будівництві чи ремонті будь-яких будівель приміщень, але багато тисяч тонн його використовувалися в минулому, і більша його частина все ще на місці. Існує три основних типи азбесту, які все ще можна знайти приміщень, які зазвичай називають «блакитний азбест» (кроцидоліт), «коричневий азбест» (амозит) і «білий азбест» (хризотил). Всі вони небезпечні канцерогени, крім синього і коричневого азбесту більш небезпечний, ніж білий. Незважаючи на їхнє найменування, Ви не можна впізнати їх лише за кольором.

Будь-які будівлі, побудовані або відремонтовані до 2000 року, можуть містити азбест. Як якщо азбестовмісний матеріал (АСМ) знаходиться в хорошому стані, і ні бути потурбованим або пошкодженим, існує незначний ризик. Але якщо це так? Порушений або пошкоджений, він може становити небезпеку для здоров'я, оскільки люди можуть вдихають будь-які азбестові волокна, що потрапляють у повітря.

Чим більше вдихнуло азбестових волокон, тим більший ризик для здоров'я. Тому працівники, які можуть піддаватися впливу азбесту під час виконання технічного обслуговування. Особливому ризику піддаються ремонтні роботи. До таких працівників належать:

Бригади МЧС, при розборі завалів, підрядники з будівництва та демонтажу, покрівельники, електрики, малярі та декоратори, столяри, сантехніки, газовики, штукатурі, монтажники цехів, опалення та інженери з вентиляції та геодезисти.

Якщо азбест присутній і його можна легко порушити, він знаходиться в поганому стані і небезпечний для присутніх. При правильному управлінні інші особи, які можуть займати приміщення, можуть наражатися на небезпеку.

Типи небезпечних матеріалів у будівлях радянського періоду

Найпоширенішими шкідливими матеріалами, які зустрічаються в будівлях, є:

Азбест — у формі покрівельних листів (шифер), теплоізоляційних матів, вентиляційних коробів, трубопроводів;

Свинцеві фарби та емалі — у покриттях вікон, дверей, металевих елементів;

Поліхлорвініл (ПХВ) та фенолформальдегідні смоли — в обробці, клеях, підлогових покриттях;

Мінеральна вата із сполучними смолами — яка при зруйнуванні виділяє небезпечний пил;

Фреонові або пенопластові утеплювачі — із ризиком викиду токсичних газів під час різання або спалювання.

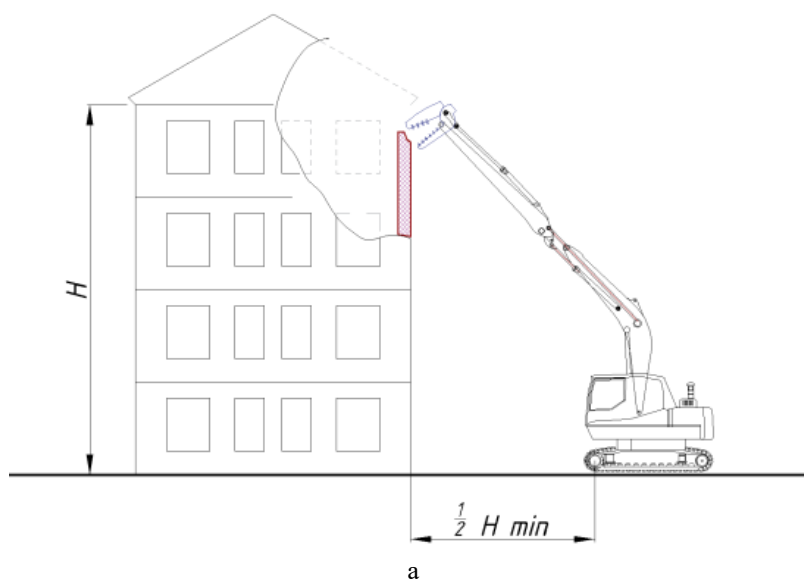


Рис. 1 Виконання демонтажних робіт екскаватором з гідравлічними ножицями: а – схема виконання робіт; б – результат демонтажних робіт.

Ризики при демонтажі та вплив на здоров'я

Основні шкідливі фактори:

Пилоподібна фаза азбесту — канцерогенний вплив, небезпека розвитку азбестозу та раку легенів;

Пари важких металів (свинець, ртуть) — отруйна дія на нервову систему;

Токсичні гази при термічному розкладанні пінополіуретану чи ПВХ.

Зони підвищеного ризику:

Демонтаж покрівель, теплоізоляції, каналізацій, вентиляцій, фарбованих елементів, складів хімікатів, промислових об'єктів.

Етапи безпечного демонтажу при наявності шкідливих матеріалів

Попереднє обстеження об'єкта:

Ідентифікація небезпечних компонентів (за техдокументацією або лабораторно).

Візуальний огляд з фіксацією потенційно токсичних зон.

Розробка плану демонтажу з урахуванням екологічних та санітарних вимог:

Складання карт-схем демонтажу.

Визначення зон обмеженого доступу.

Організація заходів безпеки:

Обладнання майданчика: загородження, попереджувальні знаки.

Застосування **засобів індивідуального захисту (ЗІЗ)**: респіратори класу FFP3, спецодяг, захисні окуляри, рукавички.

Екскаватор, що розміщується поруч із будівлею, за допомогою гідравлічних ножиць руйнує залізобетонні конструкції та елементи будівлі. Екскаватор має бути розміщений на відстані не менше ніж половина висоти будівлі, для унеможливлення падіння будівельного сміття на. Знесення будівлі відбувається з гори в низ для забезпечення стійкості конструкцій будівлі.

Будівельне сміття використовують для створення збільшення зони роботи екскаватора. При цьому будівельне сміття необхідно ущільнити та вирівняти, а також організувати виїзд для екскаватора враховуючи його технічні особливості. Крутість укосу, зазвичай, не має бути більшим за 1:1 (залежність висоти укосу до його основи), а висота обмежена 3 м. Ширина і довжина даного насипу має бути не менше ніж півтори довжини машини, щоб забезпечити безпечне маневрування під час знесення.

Демонтаж за спеціалізованими технологіями:

Вологе різання азбесту (з мінімізацією пилу).

Застосування герметичних контейнерів для збору небезпечних відходів.

Утилізація відповідно до державних стандартів (зокрема ДСТУ 4315:2004, ДСТУ 30730-2004).

Моніторинг та контроль після завершення робіт:

Повітряний контроль (аерозольний аналіз).

Деактивація або очищення майданчика.

У повоєнній відбудові в Україні вже фіксувалися випадки виявлення **азбестовмісних матеріалів** під час розчищення пошкоджених багатоповерхівок у Київській, Чернігівській, Харківській областях. Станом на 2024 рік спільно з Miyamoto Ukraine було розроблено методичні рекомендації щодо поводження з азбестовмісними матеріалами при виконанні будівельних робіт на території України [7].

Нормативна база:

Закон України «Про поводження з відходами»;

Постанова КМУ №1120 (від 13.07.2000) — про поводження з небезпечними відходами;

ДСТУ 4315:2004 — «Захист довкілля. Азбест. Вимоги до безпеки»;

СанПіН 2.2.2.2006 — про вплив хімічних речовин на атмосферу робочої зони.

Найбільш активну роль у виявленні та документуванні таких об'єктів відіграють органи місцевого самоврядування, служби ДСНС, громадські ініціативи та екологічні інспекції.

Висновки. Демонтаж пошкоджених об'єктів нерухомості із наявністю шкідливих матеріалів є надзвичайно відповідальною та технічно складною процедурою. Недотримання норм безпеки може спричинити серйозні наслідки для здоров'я працівників та місцевого населення, а також забруднення довкілля. Запорукою безпечного виконання таких робіт є: попереднє обстеження, дотримання технологічного регламенту, наявність кваліфікованого персоналу та належне оснащення.

Список використаних джерел:

1. Закон України «Про поводження з відходами». — Відомості Верховної Ради України, 1998.
2. ДСТУ 4315:2004. Захист довкілля. Азбест. Вимоги до безпеки.
3. ДСНС України. (2023). Методичні вказівки щодо робіт з виявлення та демонтажу об'єктів із небезпечними речовинами.
4. WHO. (2014). Elimination of asbestos-related diseases. Geneva: World Health Organization.
5. Koutsourakis, G., Papadopoulos, A. (2019). Safe demolition practices for buildings with hazardous materials. Journal of Environmental Health.
6. SanPiN 2.2.2.2006 — Гігієнічні вимоги до повітря робочої зони
7. Рекомендації знесення будівель, що зазнали руйнувань через військові дії в Україні та мають азбестовмісні конструкції та матеріали. Miyamoto Ukraine. 2024

РОЗРОБКА СИСТЕМИ ДИНАМІЧНОГО МОНІТОРИНГУ ПРОЦЕСІВ НА БУДІВЕЛЬНОМУ МАЙДАНЧИКУ

Володимир Рашківський доцент, к.т.н., завідувач кафедри будівельних машин¹ (ORCID: 0000-0002-5369-6676),

Роман Демяненко доцент, к.т.н., доцент¹ (ORCID: 0000-0002-5405-3840),

Наталія Єгорова, студентка¹,

Микита Бурковський, студент¹,

¹ Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних сил 31, 03037, Україна

АНОТАЦІЯ. У статті досліджено питання організації та впровадження системи динамічного моніторингу процесів на будівельному майданчику. Проаналізовано існуючі підходи до цифрового управління будівельними роботами, охарактеризовано ключові компоненти систем моніторингу. Окреслено технічну архітектуру та алгоритм роботи інтегрованої системи збору, обробки та візуалізації даних. Розглянуто приклади впровадження в українських умовах, зокрема у межах повоєнного відновлення інфраструктури. Обґрунтовано переваги використання систем динамічного моніторингу для підвищення ефективності, прозорості та безпеки будівельних робіт.

Ключові слова: моніторинг; будівельний майданчик; цифрова трансформація; IoT; BIM; безпека; управління даними.

Вступ. Розробка системи динамічного моніторингу дозволяє інтегрувати сучасні цифрові технології (сенсорні мережі, супутникові координати, відеоаналітика, BIM, аналітичні платформи) у комплексну модель керування будівельними процесами в режимі реального часу.

Мета роботи. Розробка системи динамічного моніторингу процесів на будівельному майданчику.

Виклад основного матеріалу. Степінь віброізоляції можна описати коефіцієнтом ефективності k_{ef} .

Основні функції системи динамічного моніторингу

Система має забезпечувати:

- **Збір даних** з об'єкта: прохід персоналу, виконання робіт, переміщення техніки, параметри середовища.
- **Обробку і зберігання** даних у хмарному середовищі або на сервері.
- **Візуалізацію** інформації (через мобільні додатки, панелі диспетчерів, дашборди).
- **Інтеграцію** з системами управління проєктами, зокрема BIM.
- **Оповіщення про відхилення** від графіка чи потенційні загрози.

Архітектура системи

Технічні компоненти

Сенсорні модулі IoT (датчики температури, вологості, вібрації, шуму, пилу, CO₂); GPS-трекери для спецтехніки та носимих засобів; RFID/QR-ідентифікація персоналу; камери відеоспостереження з аналітикою на основі ШІ; центральний сервер або хмарна платформа для обробки і зберігання даних; інтерфейс користувача (UI) — мобільний застосунок, диспетчерський пульт.

Програмне забезпечення

Інтеграція з BIM-моделлю об'єкта (цифровий двійник); SCADA-система або аналогічна панель для диспетчеризації; аналітичні модулі для прогнозування затримок чи порушень безпеки.

Алгоритм функціонування

Ініціалізація системи: введення цифрової моделі об'єкта, визначення контрольних точок.

Монтаж сенсорних та ідентифікаційних пристроїв на техніку, огорожу, каркас.

Безперервний збір даних із усіх джерел.

Фільтрація, обробка і агрегація даних у центрі управління.

Візуалізація та оповіщення в реальному часі про:

- затримки виконання робіт;
- перевищення шуму, пилу, вібрації;
- відсутність персоналу на небезпечній ділянці;
- відхилення у температурному режимі (наприклад, під час бетонування);
- аварійні ситуації (вихід із робочої зони, пожежа, витік).

У рамках реконструкції навчального закладу в місті Ірпінь (2023 р.) було впроваджено пілотну версію системи на основі встановлення датчиків температури, пилу та вологості на ключових ділянках, застосування GPS-маячків на будівельній техніці, обліку присутності працівників через QR-сканування при вході, візуального контролю через IP-камери з автоматичним зберіганням кадрів, щоденної аналітики щодо дотримання графіка робіт та умов безпеки. В результаті впровадження зменшено випадки простою техніки на 22%, підвищено рівень дисципліни та охорони праці, скорочено витрати на наглядові функції на 18%.

Переваги та обмеження системи

Переваги:

Прозоре управління ресурсами.

Зменшення людського фактора в контролі.

Підвищення оперативності прийняття рішень.

Зниження ризиків нещасних випадків.

Історичні дані для подальшого аналізу.

Обмеження:

Потреба у стабільному інтернет-з'єднанні.

Вартість первинного впровадження (до 3–5% бюджету об'єкта).

Потреба у навчанні персоналу.

Проблеми з інтеграцією на малих об'єктах із недостатньою цифровізацією.

На базі Київського національного університету будівництва і архітектури розроблено макет системи моніторингу виконання монтажних процесів з використанням баштового крана (рис. 1-2), що включає в себе макет баштового крана, обмежувальний каркас, що моделює нерухомі об'єкти, системи візуального спостереження.



а



б

Рис.1. Макет системи моніторингу виконання монтажних процесів: а – загальний вид; б – розміщення мобільної камери на каретці.



в



г



д



е

Рис. 1. Макет системи моніторингу виконання монтажних процесів (продовження): в – розміщення мобільної камери в кабіні; г – результат спостереження за баштою крана від обмежувального каркасу; д – результат спостереження за вантажною кареткою з кабіни; е – результат спостереження за вантажем з вантажної каретки.

На першому етапі дослідження планується дослідити поведінку елементів вантажного крана під час виконання вантажних операцій. Наступним планується насичення установки системами цифрового моніторингу для подальшого динамічного відслідковування поведінки крана, формування цифрової бази його станів та створення інформаційної цифрової системи для динамічного моніторингу роботи баштового крана.

Висновки. Розробка та впровадження системи динамічного моніторингу є стратегічно важливим напрямком розвитку будівельної галузі в Україні, особливо у контексті масштабної реконструкції пошкодженої інфраструктури. Інтеграція цифрових технологій у будівництво дозволяє підвищити контроль, ефективність, безпеку та прозорість процесів. Подальші кроки — створення національних стандартів цифрового будівництва та пілотні проєкти на рівні громад.

Список використаних джерел:

1. Дубровський В.І., Кравець Ю.С. (2022). *Цифрові технології в будівництві*. – Київ: НАБАУ.
2. ISO 19650-1:2018 – Organization of information about construction works using BIM.
3. Zhang, Y., Wang, L. (2020). *Real-time Monitoring Systems for Smart Construction Sites*. Journal of Automation in Construction.
4. Autodesk. (2023). Construction Cloud Technical Overview.
5. Пархоменко А. (2023). Практика впровадження IoT на будівельних майданчиках України. Збірник «Цифровізація будівництва».
6. McKinsey Global Institute. (2021). The Next Normal in Construction: How disruption is reshaping the world's largest ecosystem.

СЕКЦІЯ 3

«МЕТОДИ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМ, МОНІТОРИНГ І ДІАГНОСТИКА ТЕХНІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ»

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНІЧНИХ КОНСТРУКЦІЙ В УМОВАХ ВПЛИВУ ДИНАМІЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ ВИПАДКОВОГО ХАРАКТЕРУ

Олег Дєдов, доцент, д.т.н., професор¹ (ORCID: 0000-0001-5006-772X),

¹Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних сил 31, 03037, Україна

АНОТАЦІЯ. У роботі наведені результати досліджень динамічних характеристик технічних об'єктів під впливом динамічного навантаження техногенного походження. Однією з актуальних проблем у сучасному будівництві є оцінка динамічної дії на несучі елементи споруди. Проблемне питання полягає як у еволюційному так і миттєвому руйнуванні несучих конструкцій та оздоблювальних матеріалів під дією динамічних навантажень. Для вирішення проблеми запропонований підхід, який базується на експериментальних дослідженнях динамічних параметрів існуючих конструкцій при дії випадкових динамічних впливах. Проаналізовано коливання несучих конструкцій за їх прискоренням та виявлений характер їх розповсюдження у загальній системі споруди. Отримані результати досліджень можуть бути використані при розробці методики і технологій діагностування та можуть стати основою для впровадження новітніх стандартів у будівництві при дослідженні систем із складною динамікою руху за умов невизначеного зовнішнього впливу.

Ключові слова: коливань; власні частоти коливань; динамічне навантаження; вібраційна діагностика; спектральний аналіз.

Вступ. Технічні об'єкти при експлуатації піддаються різноманітним впливам, які мають статичний та динамічний характер. У реальних системах такі впливи відбуваються одночасно та становлять єдиний інтегрований процес, хоча при виконанні проектних робіт, як правило, розглядаються окремо. Зокрема важливим аспектом є взаємний вплив між існуючими спорудами та побудованими об'єктами, який не завжди підлягає аналізу належним чином. Передавання коливань у загальній системі є складним багатоелементним процесом, що, у разі відсутності належного врахування, може призводити до переходу, тому все частіше виникають випадки переходу конструкцій у аварійний, або непридатний до експлуатації стан. Поведінку коливальних систем, схильних до дії випадкових сил, необхідно вивчати однаковими методами уявлення як самих випадкових впливів, так і випадкових реакцій коливальних систем на ці впливи. Основні труднощі при аналізі складних технічних систем за цим підходом пов'язані з визначенням природи зовнішніх впливів і неоднозначністю інтерпретації результатів дослідження. Насамперед необхідно встановити джерела цих впливів, особливо у випадках складних систем, де таких джерел може бути кілька. При цьому вирішальним фактором часто виступає не окреме джерело вібрації, а сукупна дія декількох. Актуальність теми зумовлена зростаючою потребою у забезпеченні надійності та безпеки конструкцій в умовах дії складних динамічних процесів.

Аналіз літературних джерел. Застосування динамічних методів поширене при діагностики при обстеженні і моніторингу будівельних об'єктів. Дослідженню розповсюдженні коливань у ґрунтовому масиві з урахуванням його неоднорідності присвячена робота [1]. Авторами обґрунтована актуальність і важливість врахування шарів з різними динамічними характеристиками, можливість виникнення резонансних явищ, а також можливість підсилення, послаблення динамічної дії. Дослідження динамічного впливу від залізничних колій [2] вказують на наявність багаточастотних коливань, які є джерелом передавання енергії коливань. Багато робіт присвячено дослідження впливу вібрації техногенного походження в межах міста на основі експериментального вимірювання. Так, в роботі [3], запропонований метод пошуку і аналізу важливих точок на основі побудови спектру записів осцилограм. Вимірюванням динамічних характеристик систем з метою виявлення дефектів елементів конструкції присвячено [4].

Вимірювання динамічних характеристик систем з метою діагностики та моніторингу існуючих дефектів у металоконструкціях представлені в роботі [5]. Авторами [6] розглянуто метод аналізу поширення хвилі та співвідношення пропускання у будівельних конструкціях. Дистанційне вимірювання наведене в роботі [7] базується на застосуванні лазерних та оптичних приладів. В роботі [8] наведені результати експериментальних досліджень роликів конвеєра на основі Wavelet аналізу, який є ефективним при дослідженні нестационарних процесів із зміною частотних характеристик.

Мета роботи полягає у дослідженні закономірностей поширення коливань у конструкціях споруд та ідентифікації їх динамічної реакції на зовнішні випадкові вібраційні впливи.

Матеріали і методи. У якості динамічного критерію для оцінки стану несучих конструкцій були використані значення власних частот коливань.

Зареєстровані віброграми коливань споруди у точках контролю підлягали обробці за допомогою спектрального аналізу методом дискретного перетворення Фур'є.

Отримані спектри були проаналізовані з метою визначення числових значень частот коливань, які відповідають основним пікам на спектрограмах та є наслідком відгуку конструкції на зовнішні джерела вібрації.

Виклад основного матеріалу. Проведення досліджень базувалося на підході, в основу якого покладена гіпотеза про розгляд систем складної структури, яка має динамічний вплив, як єдиної системи із відповідними їй динамічними характеристиками. Одночасна реєстрація динамічних параметрів кількома автономними приладами дозволяє контролювати якість отриманих даних та забезпечити їх достовірність. 4.3. Перед початком випробувань проводиться первинна реєстрація динамічних параметрів у вигляді безперервних часових записів з метою визначення шумових характеристик навколишнього середовища та потенційних джерел динамічного впливу. Якісний аналіз проводиться на основі порівняння отриманих віброграм при дії динамічного навантаження та віброграм без динамічного впливу (шумові характеристики). Зазначений підхід дозволяє розглядати складну будівельну систему не лише як сукупність окремих елементів, а як єдину динамічну структуру з внутрішніми зв'язками та взаємозалежностями, що особливо важливо при складних вібраційних сценаріях.

Період вимірювання (безперервні часові записи) були обрані таким чином, щоб охоплювати період часу, за який відбуваються зміни напружено-деформованого стану конструкцій, поширення динамічних хвиль тощо.

На основі проведених експериментальних досліджень, отриманий ряд віброграм, що характерні при дії випадкових динамічних впливів на будівельні конструкції. Зовнішній вплив (рис. 1) має виражений випадковий характер з різким зростанням інтенсивності навантаження. Фіксується чіткий профіль імпульсу з послідовними коливаннями, що відображають реакцію структурних елементів споруди. Характер амплітуди та форма хвилі свідчать про властивості конструктивної системи, її жорсткість та демпфування.

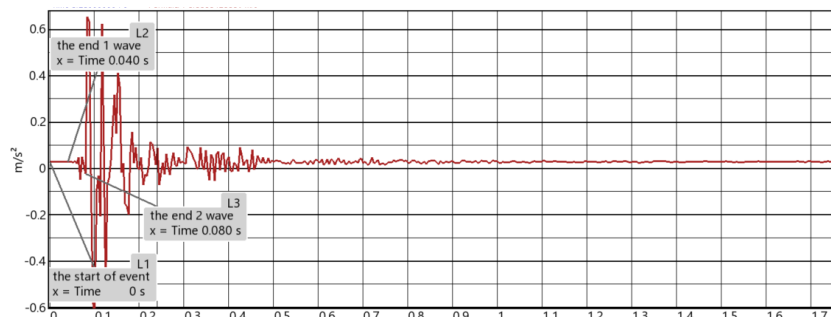


Рис.1. Характер розповсюдження коливань від динамічного впливу 0-1,7с.

При детальному вивченні (рис. 2) встановлено, що збурення конструкції відбувається хвилеподібно, зокрема встановлені чотири зони на записі. Часова реалізація динамічної хвилі, що надходить до конструкції та відповідь конструкції на зовнішнє збурення свідчить про вплив та відгук конструкції, відбивання, підсилення та затухання коливань.

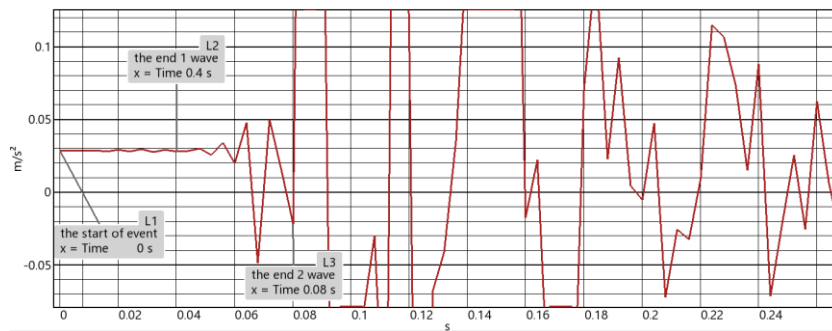


Рис.2. Характер розповсюдження коливань від динамічного впливу 0-0,25с.

Такий характер відповіді є типовим для складних систем з внутрішньою взаємодією елементів конструкції. Хоч числові значення зафіксованих впливів не виходять за межі допустимих значень. Тобто конструкція споруди сприймає багатокomпонентні коливання різної природи. Але наявність широкосмугових коливань може бути причиною виникнення близьких до резонансних явищ окремих елементів конструкцій у тому числі і оздоблюваних шарів.

При дії зовнішніх динамічних навантажень можлива поява коливальних процесів у окремих елементах оздоблення, частотні характеристики яких збігаються або наближаються до частот збурення. Така відповідність створює передумови для виникнення явищ, близьких до резонансних, що може призводити до суттєвого підсилення амплітуди коливань, прискореного зносу, пошкодження або відшарування декоративних елементів.

Для детального дослідження частотної структури таких коливань доцільно використовувати спектральну потужність та спектральну щільність потужності, які дозволяють оцінити розподіл енергії сигналу за частотами.

Такий аналіз дає змогу визначити, в яких діапазонах відбувається зосередження енергії зовнішнього збурення та чи збігаються ці діапазони з власними частотами окремих елементів конструкції.

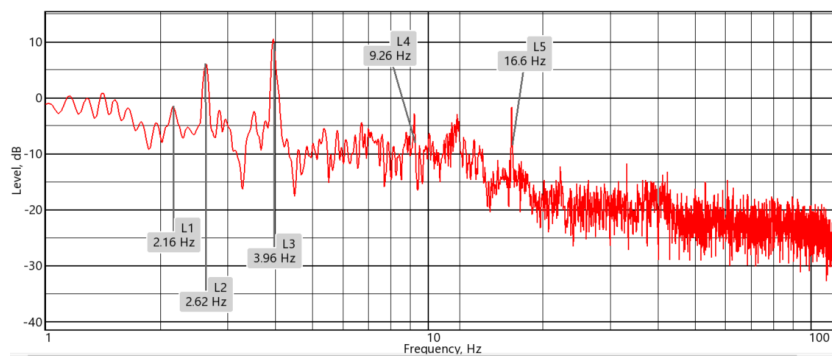


Рис.3. Спектр частот коливань

У разі такого збігу спостерігається підсилення реакції, що є ознакою можливого резонансного процесу. Аналіз спектральної щільності дозволяє виявити навіть слабкі, але енергетично насичені компоненти коливань, які при тривалій дії можуть накопичуватись і викликати локальні пошкодження конструкцій або оздоблення. За кількісними показниками такі форми коливань можуть потрапляти у діапазон експериментальних частот. Такі режим є небезпечними з точки зору виникнення хоч і короточасних, але близьких до резонансних явищ.

Обговорення. Отримані в результаті експерименту віброграми засвідчують наявність складної динамічної відповіді конструкції на зовнішній випадковий вплив. Хвильовий характер реакції конструктивної системи із чітко вираженими зонами збурення, що мають поступову зміну амплітуд, свідчить про внутрішню інерційність та багатокomпонентність системи. Виявлено, що динамічна відповідь не є миттєвою – між моментом надходження імпульсу та піковою реакцією фіксується часовий зсув, що вказує на особливості передачі енергії через конструкції.

Зіставлення спектрограм до та після впливу показує помітне зростання енергетичного

навантаження у вибраних частотних діапазонах, що свідчить про переважне збудження власних форм коливань конструкції. Це може бути потенційним критерієм для виявлення дефектів жорсткості, елементів зниженого опору чи накопиченої втоми матеріалів. Підтверджується ефективність запропонованого підходу до комплексної реєстрації та аналізу віброграм за допомогою перетворення Фур'є та спектральній щільності потужності, що дає змогу не лише фіксувати сам факт впливу, але й оцінювати характер, інтенсивність та спектральну структуру збурення. Такий підхід може бути базисом для побудови автоматизованих систем моніторингу технічного стану будівель в умовах невизначених вібраційних навантажень та визначення динамічних процесів, при дії яких в окремих елементах конструкції виникають явища близькі до резонансних.

Висновки. Розглянуті коливань несучих конструкцій при динамічному навантаженні. Визначений характер розповсюдження, який проявляється наявністю декількох хвиль, що є відгуком конструкції та проявою власних коливань досліджуваної системи.

Отримані результати досліджень можуть бути використані при розробці методики і технологій діагностування та можуть стати основою для впровадження новітніх стандартів у будівництві при дослідженні систем із складною динамікою руху за умов невизначеного зовнішнього впливу.

Список використаних джерел:

1. Sergii Skurativskiy, Oleksandr Kendzera, Sergiy Mykulyak, Yuliia Semenova, Inna Skurativska (2023). Seismic response assessment of a weakly nonlinear soil deposit. *Journal of Applied Geophysics*, Volume 211, 104970. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2023.104970>
2. Pierfrancesco Cacciola, Nataša Banjanac, Alessandro Tombari (2017). Vibration Control of an existing building through the Vibrating Barrier. *Procedia Engineering*, 199, 1598-1603. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.09.065>
3. Mobin Kavyanpoor, Saeed Shokrollahi (2019). Dynamic behaviors of a fractional order nonlinear oscillator. *Journal of King Saud University – Science*, Volume 31, Issue 1, P. 14-20. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2017.03.006>
4. Patel, V. N., Tandon, N., Pandey, R. K. (2014). Vibrations Generated by Rolling Element Bearings having Multiple Local Defects on Races. *Procedia Technology*, 14, P. 312–319. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2014.08.041>
5. Dimitrios, Giagopoulos, Alexandros, Arailopoulos, V. Dertimanis, Costas Papadimitriou, Eleni, Chatzi, Konstantinos Grompanopoulos (2017). Computational Framework for Online Estimation of Fatigue Damage using Vibration Measurements from a Limited Number of Sensors. *Procedia Engineering*, 199, P. 1906–1911. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.09.424>
6. Chun-Man Liao, Yuri Petryna (2022). Damage Assessment of Civil Structures Using Wave Propagation Analysis and Transmissibility Functions. *Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures*, P. 3–13. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-93236-7_2
7. Tong Wu, Liang Tang, Peng Du, Nian Liu, Zhixiang Zho, Xiaolei Qi (2022). Non-contact measurement method of beam vibration with laser stripe tracking based on tilt photography. *Measurement*, Volume 187, 110314. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110314>
8. Bendjama H., Bouhouche S., Boucherit M.S. (2012). Application of wavelettransform for fault diagnosis in rotating machinery. *Int. J. Mach. Learn. Comput*, 2, 1, 82–87. <http://dx.doi.org/10.7763/IJMLC.2012.V2.93>

ANALYSIS OF THE USE OF THE FRACTAL METHOD TO SOLVING THE PROBLEM OF DESTRUCTION OF SOLID MATERIALS

Ivan Nazarenko, professor, doctor of technical sciences, professor ¹ (ORCID: 0000-0002-1888-3687),
Valery Yakovenko, professor, doctor of technical sciences, professor ¹ (ORCID: 0000-0002-8759-8652),
Yevhen Mishchuk, associate professor, Ph.D., associate professor¹ (ORCID: 0000-0002-7850-0975),
¹ Kyiv National University of Civil Engineering and Architecture, Air Force Avenue 31, 03037, Ukraine

ABSTRACT. *One of the key concepts of fractals is their dimensionality and understanding how to determine the dimensionality. In general, considering the theory of fractals, we can come to the following generalizing conclusion that fractals are a geometric description of physical processes. Very often, fractals are used to describe natural phenomena. Currently, research is being conducted in the direction of describing the fracture process in solids by fractal theory. Considering various methods and approaches to the fracture process of materials, it is not difficult to separate the multilevel model. One of the features of such fractal multilevel models is that when compared with each other, they are self-similar. The paper analyzes the equation for determining the strength of the material based on the strength criterion, into which a fractal correction is introduced to take into account the roughness of the crack surface at the microlevel. The equation for determining potential energy based on Griffiths' energy law is evaluated, in which the crack length is replaced by a function describing the fractal curve.*

Keywords: fractal; surface energy; crack; gamma function; quasi-brittle fracture.

Introduction. One of the key concepts of fractals is their dimensionality and understanding how to determine the dimensionality. In general, considering the theory of fractals, we can come to the following generalizing conclusion that fractals are a geometric description of physical processes [1]. Very often, fractals are used to describe natural phenomena. Currently, research is being conducted in the direction of describing the process of fracture in solids by fractal theory. In general, the direction of using fractal theory can be divided into two parts. The first is the description of the fracture of a solid in the crushing chamber of a crushing machine [9]. The ideology itself consists in describing the fracture prism by fractal measure. The second direction, which is more studied, is the description of the propagation of a crack in a solid by fractal theory [2].

The tree-like shape of the crack is described by the coming rank. Near the top of the crack there are micro-roars, which close the building until further development. This process of removing micro-tears from the main crack indicates that it is similar to the process of crack growth. It should be noted that the description of the distribution of the tree-like structure of the crack is an urgent task in the mechanics of the vascular middle.

Analysis of literary sources. Considering different methods and approaches to the process of material failure, it is not difficult to distinguish a multilevel model. One of the features of such fractal multilevel models is that when compared with each other they are self-similar [3]. One of the methods for studying crack propagation is to consider its motion in Finsler space. When describing such a process, it was possible to approach the connection between the macroscopic and microscopic levels. However, this theory is difficult to use in engineering calculations. A feature of this theory is the proposition that failure at these structural levels has fractal properties [4].

In the source [5], a fractal model of damage accumulation in machine parts based on the Cantor fractal is considered. This model allows us to estimate the number of cycles before the main crack germinates. The peculiarities of the study include that it is considered for media with pronounced plastic properties. The process of damage accumulation with subsequent transition to the formation of a macrocrack and the germination of a main crack is described by the Paris law. The self-similarity of the structure of the medium in a certain range of scales is described by the McDonald correlation function. The disadvantages include a narrow range of processes that the model can describe and the lack of a mechanism that would combine this model with the physical properties of materials.

In works [1],[6],[7], a hypothesis was proposed about a transition layer between a crack and a continuous medium, which will have a fractal dimension. Thus, a plastic zone is formed around the crack, and a homogeneous isotropic zone is formed near the very tip of the crack. These two surface zones around the crack are taken into account by the fractal dimension. In turn, the surface energy of the material is defined as the difference between the dimension of the space surrounding the crack and the fractal

dimension of the transition zone.

In the source [8], a model of crack propagation in an ideal mono- or polycrystal is considered. The authors note that the model includes the elasticity equation and simple rules of crack propagation. The model itself is represented by a triangular lattice, and the initiation of the modeling process occurs due to the rupture of one lattice link. The disadvantage of the work is the absence of a given model that could be tested for other types of loads.

The purpose of the work. Evaluation and analysis of the method for modeling the process of cleavage formation in a material using a fractal model.

Materials and methods. The main materials for the analysis are scientific, technical and reference literature on fractal approaches to the fracture mechanics of solids. The main methods used in the work are the use of calculations based on mathematical dependencies and analytical mechanics. The main software is Microsoft Excel and Wolfram Mathematica.

Presentation of the main material. A classic example of describing physical objects with fractals is their covering with simple geometric shapes. A regular curve is measured by n straight line segments of length l_1 :

$$S = n \times l_1 \xrightarrow{l_1 \rightarrow 0} L \times l_1^0, \quad (1)$$

where n is the number of squares; L is the length of the curve.

The length of a fractal contour can be constructed using the Hausdorffs (fractal) measure, which is applied to a set in space that has a complex irregular structure. The essence of this method is that the fractal contour (crack) is covered by a set of balls (squares) of radius r . After that, the d -dimensional measure of the coverage for all elements of the coverage is summed up. Next, the limit at $r \rightarrow 0$ is calculated, which determines the d -dimensional measure of the set. In turn, the fractal dimension D is directly related to the increase in the length of the fractal contour when the measurement scale changes. At $D = 1$, we obtain a smooth crack surface, the length of which does not depend on the scale, but at $D > 1$, the crack surface is strongly cut, the length of which increases with increasing scale.

When describing a crack surface that is highly cut at the micro level, one can use the fractional Riemann-Liouville integral. For the one-dimensional case (along the x coordinate):

$$I_a^\alpha f(x) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_a^x (x-t)^{\alpha-1} f(t) dt, \quad (2)$$

where $\Gamma(n)$ is the gamma function; a is the lower limit of integration; α – is the order of integration, which corresponds to the fractal dimension.

The geometric meaning of expression (2) can be explained as follows. Let us imagine that there is a certain section of length l , in fact it can be the surface of a crack at the microlevel. In correspondence with section l , the area A of some figure is placed, which is described by the function $f(x)$. Thus, on the basis of superimposing the corresponding figure on the strongly cut surface of the crack, the cut surface of the crack is smoothed, Fig. 2.

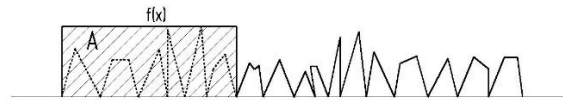


Fig. 1. Example of smoothing the fractal surface of a crack

The energy concept of the material fracture process based on the fractal approach is explained as follows. The scale factor d (resolution), i.e. the minimum scale to which a crack is detailed, is one of the parameters that determines the crack length:

$$L = \left(\frac{l}{d} \right)^D d, \quad (3)$$

In the case of fracture mechanics, d is related to the microstructural scale through the relationship:

$$d = \frac{2}{\pi} \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_c} \right)^2, \quad (4)$$

where σ_c – tensile strength; K_{Ic} – static fracture toughness for a straight crack of length $2a$.

However, on the other hand, d can be expressed in terms of fractal dimension of the form:

$$d = \frac{\pi^{D/2}}{2^D \Gamma(1+D/2) \Gamma(1+D)}, \quad (5)$$

When using the fractal approach to rock failure, the problem of damage accumulation during quasi-brittle failure is considered. For this purpose, it is necessary to introduce the parameter of the continuity of the environment.

When considering an elastic plane that is stretched in the direction of the y axis by a uniform force F , the total work on the formation of the fracture surface in the source [1] is proposed to be determined as:

$$\Delta W = \frac{2F^2 d_n d_0 (1-\nu)}{\pi G (1-\varpi)}, \quad (6)$$

where $G=E/2(1+\nu)$ - shear modulus; E – Young's modulus; ν – Poisson's ratio; d_0 – period with which a system of cracks is formed; ϖ - environmental continuity parameter.

Taking into account equations (1), (3) and (5) for the crack length in the interval $-1 \leq x \leq 1$ and the Griffiths equation for the crack surface energy, it can be written as follows:

$$\Delta \Pi = -2\gamma l = -2\gamma \frac{\pi^{D/2} l^D}{2^D \Gamma(1+D/2) \Gamma(1+D)}, \quad (6)$$

where γ – energy of formation of a new crack surface.

On fig. 2a shows a graph of the dependence of the length of a fractal crack on the fractal dimension, and Fig. 2b shows the influence of the fractal dimension on the change in the potential energy of crack growth.

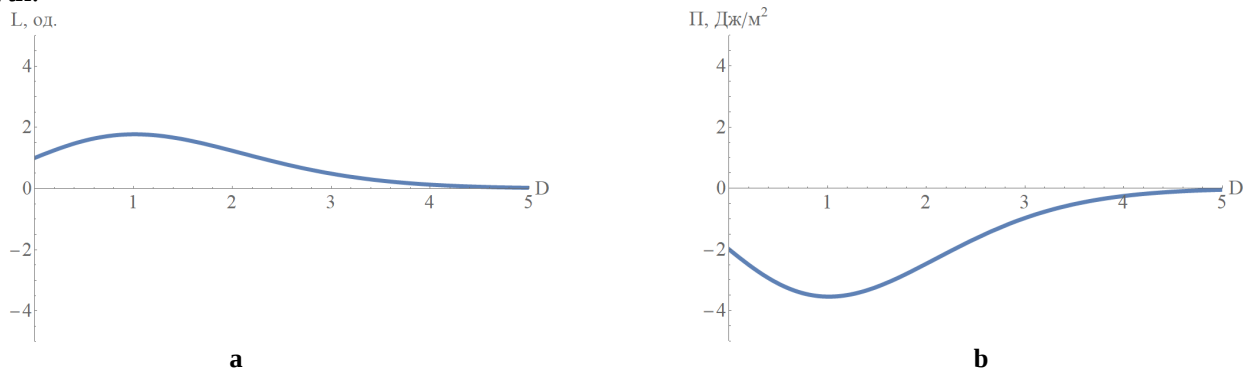


Fig. 2. Graphs of the influence of fractal dimension on the change:
a – crack length; b – change in potential energy

From the graphs in Fig. 2, we see that the length of the fractal curve and, accordingly, the change in potential energy is the largest within the range of the change in fractal dimension from 0 to 2. The source [1] states that it is desirable to take the fractal dimension within the range from 1 to 2 when describing the surface of a real crack.

Discussion. Solidification (1) is suitable for perfectly simple straight curves. If you consider real physical objects, such as a crack, in the role of the curve, you can note that with increased skin density, with care, the number n gradually increases. To describe the fractal measure in equation (5), a function is used that depends on the geometry of the coating figure and the parameter α , which corresponds to the fractal dimension. The fractal approach based on equation (2), which uses smoothing of the crack surface by the Hausdorff entropy measure, allows us to consider fractal cracks as a structure embedded in Euclidean space. The connection between the fractal curve and the dislocation curve is that the material can undergo several stages of shape change before deformation. Each stage is characterized by a certain density of dislocations. When a critical value of the dislocation density is reached, a transition to another stage of the

material shape occurs.

Conclusions. Based on the analysis, it was found that the description of the cut surface of cracks using a fractal model is a promising direction. The introduction of a function based on fractals to describe the crack length in equation (6) improves the accuracy of determining the potential energy and simplifies the calculation. However, in dependence (6) there is still an indicator of the surface energy of the definition, which hinders the wider practical use of the dependence itself. It was found that the fractal dimension D can be an indicator of the degree of microdamage and fracture energy. With a rougher crack surface ($D > 1$), the fracture energy increases due to the increased resistance to crack propagation. The results of the analysis give impetus to expanding the understanding of fractal models and the state of the newly formed crack surface.

References:

1. Shcolokova M.O. (2007) «Fractal generalization of the energy criterion for quasi-violent destruction of solid», Abstract of Ph.D. dissertation, National Academy of Sciences of Ukraine, Zaporizhia, Ukraine.
2. L. Pietronero (ed.), Fractals in Physics, Proceedings of the VI International School of Statistical Mechanics "Enrico Fermi", Varenna, Italy, 1985.
3. Li, J., & Ostoja-Starzewski, M. (2009). Fractal pattern formation at elastic-plastic transition in heterogeneous materials. arXiv preprint arXiv:0906.3351. <https://arxiv.org/abs/0906.3351>
4. Huang, D., Chang, X., Tan, Y., Fang, K., & Yin, Y. (2019). From rock microstructure to macromechanical properties based on fractal dimensions. Advances in Mechanical Engineering, 11(4), 1–12. <https://doi.org/10.1177/1687814019836363>
5. Fellah, Z. E. A., Fellah, M., Ongwen, N. O., Ogam, E., & Depollier, C. (2021). Acoustics of fractal porous material and fractional calculus. Mathematics, 9(15), 1774. <https://doi.org/10.3390/math9151774>
6. Zuo, Y.-T., & Liu, H.-J. (2020). Fractal approach to mechanical and electrical properties of graphene/SiC composites. Facta Universitatis, Series: Mechanical Engineering, 18(3), 271–284. <https://doi.org/10.22190/FUME201212003Z>
7. Charbonneau, P., Kurchan, J., Parisi, G., Urbani, P., & Zamponi, F. (2014). Fractal free energy landscapes in structural glasses. arXiv preprint arXiv:1404.6809. <https://arxiv.org/abs/1404.6809>
8. Mandelbrot, B. B. (1982). The fractal geometry of nature. W. H. Freeman and Co.
9. Mishchuk, Y. (2024). Evaluation and analysis of mounted crushing buckets. Construction Engineering, (40), 4–19. <https://doi.org/10.32347/tb.2024-40.0301>

ІМІТАЦІЯ ДІЇ СИЛ ТЕРТЯ НА ОСНОВІ МОДЕЛІ ЛУ ГРЕ

Цян Лі, викладач, доктор філософії, викладач ¹ (ORCID: 0000-0002-0175-5902),

Олександр Узунов, професор, д.т.н., професор ² (ORCID: 0000-0003-0002-1672),

¹ Тунлін Університет, Вулиця Цуйху Сілу 1335, 244061, Китай

² Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», проспект Берестейський 37, 03056, Україна

АНОТАЦІЯ. При моделюванні динамічних процесів в електрогідравлічних приводах одним із суттєвих факторів є сили тертя. Для їх врахування використовують різні математичні моделі. В роботі проведено огляд відомих моделей тертя та представлено їх особливості. Основну увагу приділено моделі тертя Лу Гре, яка дозволяє достатньо точно математично описати реальні процеси тертя в гідромеханічних компонентах. Проведене дослідження дозволило визначити вплив окремих параметрів цієї моделі на характер залежності сил тертя від відносної швидкості поверхонь тертя. Перевірено ефективність використання регулюючих параметрів моделі для налаштування моделі на задану конфігурацію залежності. Результати роботи можуть бути використані для адаптації моделі тертя Лу Гре до конкретних експериментальних даних в математичних моделях електрогідравлічних приводів.

Ключові слова: тертя; модель тертя Лу Гре; імітація моделі; вплив параметрів; електрогідравлічний привід.

Вступ. При моделюванні дії електрогідравлічних приводів тертя є важливим фактором, який має значний нелінійний вплив на динамічні характеристики, точність керування та стабільність [1]. В приводах такого типу тертя не тільки обумовлює нульову мертву зону і явище повзання при низьких швидкостях [2, 3], але також призводить до вібрацій, підвищення температури, зношування рухомих частин, скорочення терміну служби та інше [4].

Аналіз літературних джерел. Відомі моделі тертя зазвичай поділяють на два типи: статичні

та динамічні, залежно від процесів, які вони представляють [5]. Найпоширенішими статичними моделями є модель тертя Кулона [6], модель в'язкого тертя [7], модель тертя Карноппа [8] або комбінація моделей тертя Каллена та в'язкого тертя [9] тощо. Статичні моделі мають прості математичні описи, параметри яких можуть бути легко визначені, але вони не дозволяють врахувати ефекти гістерезису та динамічну поведінку сил тертя. До динамічних моделей тертя в основному відносяться модель Bliman-Sorine [10], модель Даля [11], модель щетини [12] тощо. Хоча такі моделі описують тертя як функцію відносної швидкості в динаміці, їх використання не є зручним. Основним недоліком вказаних моделей є їх складність і велика кількість впливових факторів, що створює труднощі її використання, і також призводить до великого обчислювального навантаження в процесі моделювання.

Ще одною відомою динамічною моделлю тертя, яка описує як статичні, так і динамічні характеристики, є модель Лу Гре [13]. В моделі Лу Гре використано аналог фізичного пружного елементу – щетину, а сама сила тертя представляється як середня сила її прогину під дією тангенціальної складової сили. Значний прогин щетинок призводить до ковзання. Середнє відхилення щетинок під час стаціонарного руху визначається відносною швидкістю. Така фізична інтерпретація моделі тертя Лу Гре дозволяє достатньо точно математично описати процес тертя під час пуску-зупинки або руху з дуже низькою швидкістю.

Мета роботи. Підвищення зручності використання моделі тертя Лу Гре шляхом визначення суттєвості і характеру впливу її параметрів на конфігурацію залежності сил тертя від відносної швидкості в парі тертя та підтвердження ефективності використання цієї моделі при моделюванні динамічних процесів в електрогідравлічних приводах.

Результати дослідження. Математичний опис моделі тертя Лу Гре має наступний вигляд [13]:

$$g(v) = F_C + (F_S - F_C)e^{-|v/v_s|^n};$$

$$\frac{dz}{dt} = v - \sigma_0 \frac{|v|}{g(v)} z;$$

$$F_r = \sigma_0 z + \sigma_1 \frac{dz}{dt} + \sigma_2 v,$$

де: F_r - загальна сила тертя; F_C - тертя Коломба; F_S - статичне тертя; $g(v)$ - функція кривої тертя Штрібека; v_s - швидкість Штрібека; v - відносна швидкість двох поверхонь, які контактують; σ_2 - коефіцієнт в'язкого тертя; z - середній прогин щетини; σ_1 - коефіцієнт демпфування щетини; σ_0 - жорсткість щетини; n - константа.

Для дослідження впливу параметрів моделі на характер залежності тертя від відносної швидкості рухомих частин була виконана імітація роботи моделі тертя Лу Гре. Імітація виконана в середовищі Simulink. Отримані результати дозволили оцінити вплив різних параметрів моделі на характер загальної сили тертя. Приклади (рис.1 та рис. 2) ілюструють характер залежності і кількісний вплив на неї двох вибраних параметрів моделі.

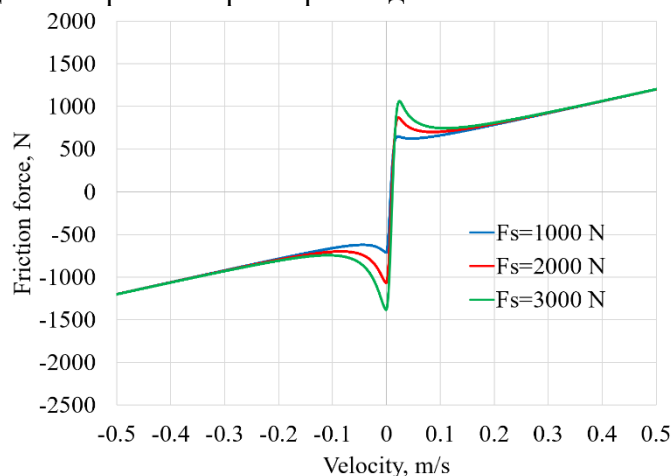


Рис. 1. Графік залежності загальної сили тертя F_r від швидкості v при різних значеннях сили статичного тертя F_s

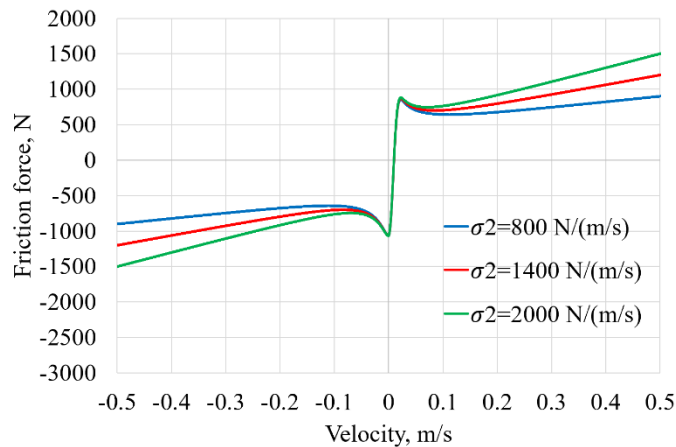


Рис. 2. Графік залежності загальної сили тертя F_f від швидкості v при різних значеннях коефіцієнта в'язкого тертя σ_2

Зі збільшенням статичного тертя F_s (рис.1), пік загальної сили тертя поблизу нульової швидкості зростає. При збільшенні швидкості більш ніж 0.15 м/с залежності співпадають, тому статичне тертя F_s впливає в основному на пік загальної сили тертя поблизу нульової швидкості. Це є логічним, однак, величина цього зростання не повторює задане значення F_s , і є меншим майже в 3 рази. З цього можна зробити висновок, що модель тертя Лу Гре на якісному рівні коректно відображає характер зміни кривої тертя в залежності від значення F_s , але при адаптації моделі до конкретної експериментальної залежності треба враховувати факт нелінійного впливу значення F_s .

Коефіцієнт в'язкого тертя σ_2 також має значний вплив на характер процесу тертя (рис.2). Кути нахилу кривих, що відповідають більшим коефіцієнтам в'язкого тертя σ_2 , збільшуються при збільшенні швидкості. Характер впливу коефіцієнту в'язкого тертя σ_2 є логічним, що підтверджує коректність моделі тертя Лу Гре, а досліджені значення 800, 1400 та 2000, показують кількісний вплив цього параметру.

Зміна значень інших параметрів моделі Лу Гре також дозволила виявити характер та ступінь їх впливу на конфігурацію залежності сили тертя від відносної швидкості в парі тертя.

Розуміння характеру і кількісного впливу параметрів моделі Лу Гре на процес тертя дозволяє ефективно використовувати їх для налаштування моделі відповідно до даних фізичного експерименту, або забезпечити типовий характер залежності при наявності лише окремих значень параметрів моделі, отриманих експериментальним шляхом. Це, в будь-якому з названих варіантів, дозволяє підвищити точність математичної моделі для моделювання процесів в електрогідрравлічних приводах.

Проведене порівняння результатів моделювання динамічних процесів в електрогідрравлічному приводі з відомими експериментальними дослідженнями показало, що при використанні моделі тертя Лу Гре, і достатньо спрощеній математичній моделі приводу, в якій тиск на вході приймався сталим, коефіцієнти витрати задавались сталими, не враховувались хвильові процеси в приєднаних трубопроводах, не враховувався теплообмін з зовнішнім середовищем, модель приводу виявилась адекватною. Оцінка точності розробленої математичної моделі була виконана за допомогою визначення середньоквадратичної похибки (RMSE) та відносної середньоквадратичної похибки (RRMSE) [14]. Порівняльні результати переміщення штока показали, що $RMSE=0.694$ мм, а $RRMSE=0.19\%$. Ці значення відповідають рівню точності моделі "відмінно". В порівняльному результаті швидкості штока встановлено, що $RMSE = 0.069$ м/с, а $RRMSE = 17.49\%$. Точність моделі по швидкості досягла рівня "добре".

Висновки. Аналіз відомих моделей тертя показує, що статичні моделі тертя не здатні описати динамічну поведінку нелінійного тертя, а відомі динамічні моделі тертя мають певні недоліки. Визначено також, що модель тертя Лу Гре є відносно простою і дозволяє достатньо точно описати процес тертя під час пуску-зупинки або руху з дуже низькою швидкістю. Виконане дослідження впливу параметрів моделі тертя Лу Гре на конфігурацію залежності сили тертя від відносної швидкості дозволяє суттєво полегшити її налаштовувати для імітації експериментальних

залежностей. Застосування моделі тертя Лу Гре для моделювання процесів в електрогідравлічному приводі підтвердило її ефективність.

Список використаних джерел:

1. Gao, B., Shen, W., Zheng, L., Zhang, W., & Zhao, H. (2022). A review of key technologies for friction nonlinearity in an electro-hydraulic servo system. *Machines*, 10(7), 568. <https://doi.org/10.3390/machines10070568>.
2. Ma, Z., Huang, D., Lu, S., Zhang, E., Wu, Y., Huang, X., ... & Yin, H. (2025). Mitigating Low-Speed Crawling and Jitter in Telescopic Hydraulic Cylinders Through Stick-Slip Dynamics Analysis and Friction Reduction Strategies. *Journal of Tribology*, 147(7). <https://doi.org/10.1115/1.4067199>.
3. Meng, Y., Xu, J., Jin, Z., Prakash, B., & Hu, Y. (2020). A review of recent advances in tribology. *Friction*, 8, 221-300. <https://doi.org/10.1007/s40544-020-0367-2>.
4. Marques, F., Flores, P., Claro, J. P., & Lankarani, H. M. (2019). Modeling and analysis of friction including rolling effects in multibody dynamics: a review. *Multibody System Dynamics*, 45, 223-244. <https://doi.org/10.1007/s11044-018-09640-6>.
5. Kang, W. S., Choi, C. K., & Yoo, H. H. (2015). Stochastic modeling of friction force and vibration analysis of a mechanical system using the model. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 29, 3645-3652. <https://doi.org/10.1007/s12206-015-0808-4>.
6. Marino, L., & Cicirello, A. (2022). Coulomb friction effect on the forced vibration of damped mass-spring systems. *Journal of Sound and Vibration*, 535, 117085. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2022.117085>.
7. Biheri, G., & Imqam, A. (2021). Settling of Spherical Particles in High Viscosity Friction Reducer Fracture Fluids. *Energies*, 14(9), 2462. <https://doi.org/10.3390/en14092462>.
8. Karnopp, D. (1985). Computer Simulation of Stick-Slip Friction in Mechanical Dynamic Systems. *ASME. J. Dyn. Sys., Meas., Control*, 107(1), 100-103. <https://doi.org/10.1115/1.3140698>.
9. Dahl, P. R. (1976). Solid friction damping of mechanical vibrations. *AIAA journal*, 14(12), 1675-1682. <https://doi.org/10.2514/3.61511>.
10. Jaiswal, S., Sopanen, J., & Mikkola, A. (2021). Efficiency comparison of various friction models of a hydraulic cylinder in the framework of multibody system dynamics. *Nonlinear Dynamics*, 104(4), 3497-3515. <https://doi.org/10.1007/s11071-021-06526-9>.
11. Pennestri, E., Valentini, P. P., & Vita, L. (2007). Multibody dynamics simulation of planar linkages with Dahl friction. *Multibody System Dynamics*, 17, 321-347. <https://doi.org/10.1007/s11044-007-9047-5>.
12. D. A. Haessig and B. Friedland. (1990). On the Modeling and Simulation of Friction. *1990 American Control Conference*, San Diego, CA, USA, pp. 1256-1261. <https://doi.org/10.23919/ACC.1990.4790944>.
13. Lu, Y., Zhang, J., Yang, S., & Li, Z. (2019). Study on improvement of LuGre dynamical model and its application in vehicle handling dynamics. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 33, 545-558. <https://doi.org/10.1007/s12206-019-0108-5>.
14. Hodson, T. O. (2022). Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE): When to use them or not. *Geoscientific Model Development Discussions*, 2022, 1-10. <https://doi.org/10.5194/gmd-15-5481-2022>.

ПЕРСПЕКТИВИ ТА РИЗИКИ ТЕХНОЛОГІЙ ВІДНОВЛЮВАНОЇ ЕНЕРГІЇ

Тетяна Кривомаз, професорка, доктор технічних наук¹,

Артем Циба, аспірант¹,

Роман Гамоцький, аспірант¹,

¹Київський національний університет будівництва та архітектури, проспект Повітряних Сил 31, 03037, Україна

АНОТАЦІЯ. *Розвиток інноваційних технологій у сфері енергетики забезпечує енергетичну незалежність, підвищення енергоефективності та зміцнення соціально-економічної стабільності України. Незважаючи на очевидну перспективність широкого впровадження відновлюваної енергії, виникають певні технологічні та інвестиційні ризики. Переривчастість сонячної та вітрової енергії викликає проблеми зі стабільністю електропостачання мережі. В певні періоди вони можуть виробляти надлишок енергії, що призводить до перевантаження системи, а в інші періоди енергії надходить менше, ніж потрібно споживачам. Для подолання проблеми періодичності постачання енергії з відновлюваних джерел застосовують системи накопичення енергії, експлуатація яких повинна супроводжуватись дотриманням заходів безпеки. Розвиток водневих технологій також не тільки відкриває нові перспективи, але й створює додаткові ризики при виробництві, транспортуванні та використанні водню. З переходом до різних джерел енергії, системи стають все більш складними, тому потребують цифрового управління, що підвищує вразливість енергосистем до кібератак. Загалом розвиток інноваційних енергетичних систем є запорукою економічного процвітання України, однак процес їх впровадження необхідно супроводжувати відповідними заходами безпеки з розробкою сталих моделей управління ризиками.*

Ключові слова: відновлювальна енергія; водневі технології; перспективи; ризики; безпека

Вступ. Міжнародне агентство IRENA прогнозує, що світова частка відновлюваної енергії досягне 36% та 3400 ГВт·год стаціонарного накопичення енергії до 2050 року. Однак, згідно зі сценарієм Energy Transformation, ці параметри повинні становити 61% та 9000 ГВт·год, щоб досягти нульових викидів вуглецю до 2050 року та обмежити підвищення глобальної температури протягом двадцять першого століття до менш ніж 2°C [1]. Країни, що підписали Паризьку угоду у 2015 році зобов'язалися скоротити викиди парникових газів до 45% ще до 2040 року і значно збільшити частку відновлюваних джерел [2]. Відновлювані джерела енергії (ВДЕ) до повномасштабного вторгнення складали понад 10% в енергобалансі України і за прогнозами приріст цих потужностей становитиме більше половини від загального обсягу до 2040 року [3].

Незважаючи на очевидну перспективність широкого впровадження відновлюваної енергії, з інвестиціями в енергетику пов'язують певні ризики. Оскільки політична нестабільність збільшує невизначеність, це може негативно вплинути на інвесторів. Недосконале правове регулювання та надмірно суворі правила також знижують успішність інвестицій в енергетику. Саме глобальна економічна невизначеність є найважливішим критерієм, тоді як зміни в політиці та регулюванні на рівні країни мають відносно невелике значення серед ризиків інвестицій в енергетику. Підвищення процентних ставок Федеральної резервної системи та торговельні війни, негативно впливають на всі сектори, в тому числі і на інвестиції в енергетику. Волатильність на ринку створює ризик для інвестицій в енергетику, тому в умовах високої інфляції невизначеність щодо майбутнього зростатиме. Іншим найбільш важливим фактором системи управління безпекою щодо ризику інвестицій в енергетику, визначають конкурентне середовище, де низька компетентність персоналу та технологічна недостатність компанії також можуть призвести до провалу інвестицій [4].

Аналіз літературних джерел. З переходом до різних джерел відновлюваної енергії, енергетичні системи стають все більш складними. Переривчастість змінної відновлюваної енергії (сонячної та вітрової) спричиняє проблеми зі стабільністю електропостачання мережі. Стабільність напруги може бути порушена зміною постачання енергії від великих сонячних фотоелектричних установок і вимагатиме компенсації реактивної потужності. Невідповідність між частотою джерела живлення, що генерується фотоелектричними системами, та частотою навантаження може викликати нестабільність. Для забезпечення надійної роботи мережі енергосистеми необхідні системи накопичення енергії в акумуляторах, а також більш складні конструкції контролерів, що призводить до додаткових витрат на експлуатацію великомасштабних сонячних електростанцій [1].

Інфраструктура інтелектуальної мережі вимагає двостороннього зв'язку в режимі реального часу та взаємодії між компонентами енергосистеми для оптимізації ефективності мережі шляхом

узгодження навантажень та розподілених джерел генерації, зокрема сонячних фотоелектричних установок із системами накопичення енергії. Такі вимоги до технологій передачі даних та зв'язку вимагають дедалі складнішого обладнання та програмного забезпечення, що створює нові небезпеки та ризики для всієї мережі розподілу електроенергії. Починаючи з 2018 року, щороку повідомляється про пожежі та вибухи в акумуляторних накопичувачах, що призводить до травм людей та втрат мільйонів доларів США при експлуатації активів та для оцінки ризиків при аналізі конструкцій безпеки в системах накопичення енергії, що використовуються в акумуляторних батареях [1].

Зі зростанням потреби в альтернативних джерелах енергії водень привертає все більше уваги завдяки своїй великій доступності, високій щільності маси енергії та екологічно чистим виробничим процесам [5]. Водень рекламується як наступний вид енергії завдяки його універсальності, оскільки він виробляється з нульовим викидом вуглекислого газу, а також здатності зберігатися у вигляді газу, рідини, абсорбуватися на наноматеріалах або у вигляді металевого гідриду [6]. Очікується, що системи зберігання водневої енергії відіграватимуть ключову роль у підтримці переходу до нульового енергоспоживання [5]. Використання відновлюваної енергії для розщеплення води на водень і кисень за допомогою електролізу є життєздатним варіантом виробництва водню з нульовим споживанням [6]. Водень є сприятливим альтернативним джерелом енергії завдяки деяким своїм унікальним властивостям, таким як діапазон займистості, горіння за низької температури, низька мінімальна енергія займання від іскри та висока швидкість горіння. Ці самі властивості водночас викликають серйозні занепокоєння щодо безпеки водню під час використання, транспортування та зберігання [6].

Використання водню як чистого палива, а також як довгострокового гнучкого варіанту зберігання енергії для резервування періодичних відновлюваних джерел стрімко зростає, однак водень також має численні проблеми безпеки [5]. Останнім часом було отримано несподівані результати, наприклад, реакції водню в умовах низької температури, коли він зберігається в рідкій формі в резервуарі з зовнішнім нагріванням [6]. Загалом небезпеки водневої технології відносно відомі і вже є досвід безпечного поводження з нею, але проблеми виникнуть, коли водень буде вироблятися, зберігатися та розповсюджуватися у великих масштабах. Коли використання водню стане таким же поширеним, як зараз природний газ, знадобляться заходи для контролю ризиків. Хоча зберігання та використання водню створює критичні ризики, сучасні конструкції систем зберігання водневої енергії в першу чергу зумовлені міркуваннями вартості для досягнення економічних вигод без врахування міркувань безпеки. Для безпеки систем зберігання водню необхідно проводити кількісну оцінку ризиків, щоб дослідити вплив параметрів конструкції систем зберігання водню, таких як розмір сховища, масова витрата, тиск зберігання та температура зберігання [5].

Незважаючи на широко відомі ризики, які слід враховувати при проектуванні безпечних систем відновлюваної енергії, наразі все ще бракує усталених схем та моделей управління ризиками накопичення енергії акумуляторами та для зберігання та використання водню [2].

Мета роботи. Пропонується оцінити перспективи та ризики впровадження технологій альтернативної енергетики для розробки сталих моделей управління.

Виклад основного матеріалу. Українські міста, які взяли участь у програмі «Pro Green Deal for Smart Cities» та впровадили муніципальні енергетичні плани, досягли скорочення кількості спожитих мегават-годин (МВт·год) до 28% [3]. Це ілюструє важливість стратегічного планування та інвестицій в енергетику для досягнення скорочення споживання енергії в різних українських містах. Впровадження муніципальних енергетичних планів у місцевих громадах допомагає зміцнити стійкість громад до зміни клімату шляхом підвищення енергетичної незалежності, підвищення енергоефективності та зміцнення соціально-економічної стабільності.

Міські проекти відновлюваної енергетики реалізуються шляхом встановлення сонячних панелей на дахах і фасадах багатоквартирних будинків, а для приватних домогосподарств програми «Енергодім» та «ГрінДІМ» від Фонду енергоефективності пропонують суттєві пом'якшення умов кредитування. В Івано-Франківській області громада скоротила споживання енергії на 30% завдяки інтеграції відновлюваних джерел енергії та модернізації енергетичної інфраструктури [6]. Це не

лише підвищило енергетичну незалежність, але й зміцнило економіку громади та соціальну стійкість. Перевагами сонячних електростанцій є економічність, екологічність, короткий строк будівництва та введення в експлуатацію. Водночас вони мають негарантований графік виробництва електричної енергії, який залежить від рівня сонячної інсоляції, що характеризується добовою та річною періодичністю. При цьому середньодобові обсяги виробництва електричної енергії у зимовий період значно нижчі за аналогічні показники у період літнього максимуму сонячної інсоляції. Найбільший дефіцит енергії виникає взимку при відключеннях внаслідок обстрілів, але саме тоді коефіцієнт корисної дії потужності сонячних станцій може знижуватись шестикратно. Зростання потужностей сонячних електростанцій без впровадження систем управління попитом та установок зберігання енергії призводить до формування профіцитів електричної енергії у денні години весняно-літнього періоду. У зв'язку з цим будівництво нових сонячних електростанцій має здійснюватися одночасно з будівництвом установок зберігання енергії та маневрової генерації для формування оптимальної структури генеруючих потужностей, що дозволить вирівняти попит на електричну енергію.

Системи накопичення енергії - це комплекс пристроїв і технологій, призначених для акумулювання, зберігання та подальшого використання електроенергії. Стандартна підключена до мережі фотоелектрична енергетична система з літій-іонним акумуляторним накопичувачем складається з таких компонентів, як фотоелектричний модуль, інверторні блоки, ізолятори, запобіжник, трансформатор (за потреби) та акумуляторні блоки. При зберіганні акумуляторних батарей необхідно захистити їх від механічних пошкоджень та зовнішнього нагрівання, щоб пом'якшити ризики вибуху та токсичності. Це вимагає встановлення резервної системи керування акумуляторами та системи аварійного відключення, які запускають відключення акумулятора через перезарядку, недозарядку, перевантаження або перегрів, що зменшує ймовірність одночасного виходу з ладу кількох модулів. Вентиляція в акумуляторному приміщенні повинна бути здатною справлятися з виділенням газів з одного елемента або модуля, за умови, що інші захисні бар'єри працюють. [2].

Роль водневих технологій у енергетичному секторі зростатиме у зв'язку з повною відмовою України від російських енергоресурсів та прискоренням цього процесу у Європейському Союзі. Наразі досліджується потенціал України щодо виробництва трьох видів водню: «блакитного» з природного газу, «зеленого» з використанням ВДЕ та «рожевого» з атомної енергії. Основою національної стратегії вибору технологій виробництва водню мають бути два основних критерії – вуглецевий слід протягом всього життєвого циклу та конкурентна вартість виробництва. Однак, виникає низка технологічних питань, що ускладнюють розвиток водневої енергетики, зокрема проблеми безпеки при виробництві, транспортуванні та використанні водню.

Хоча традиційні методи оцінки ризиків енергетичної безпеки наразі застосовуються до нових енергетичних систем, швидкі темпи технологічного розвитку створюють нові ризики. Крім того, життєвий цикл компонентів нової енергетики значно скорочується, тому не вистачає часу для ретельного проведення тестування та проектування систем, щоб зрозуміти всі потенційні небезпеки та ризики. Застосування нових технологій для цифрового управління енергосистемами також збільшує складність і підвищує вразливість системи до кібератак. Саме тому, розвиток інноваційних енергетичних систем необхідно супроводжувати відповідними заходами безпеки.

Висновки. Широке використання інноваційних джерел енергії обмежено технологічними та інвестиційними ризиками. Дискретність енергетичних потоків відновлюваних джерел обумовлює періодичність надходження енергії та змінність енергетичного потенціалу. В певні періоди вони можуть виробляти надлишок енергії, що призводить до перевантаження системи, а в інші періоди енергії надходить менше, ніж потрібно споживачам. Для подолання проблеми періодичності постачання енергії з відновлюваних джерел застосовують системи накопичення енергії, експлуатація яких повинна супроводжуватись дотриманням заходів безпеки. Розвиток водневих технологій також не тільки відкриває нові перспективи, але й створює додаткові ризики при виробництві, транспортуванні та використанні водню. Загалом розвиток інноваційних енергетичних систем є запорукою економічного процвітання України, однак процес їх впровадження необхідно супроводжувати відповідними заходами безпеки з розробкою сталих моделей управління ризиками.

Список використаних джерел:

1. Moa, E. H. Y., & Go, Y. I. (2023). Large-scale energy storage system: safety and risk assessment. *Sustainable Energy Research*, 10(1), 13. <https://link.springer.com/article/10.1186/s40807-023-00082-z>
2. Choo, B. L., & Go, Y. I. (2022). Energy storage for large scale/utility renewable energy system-An enhanced safety model and risk assessment. *Renewable Energy Focus*, 42, 79-96. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1755008422000291>
3. Loshakova, Y., Schubert, A. (2024). The Role of Municipal Energy Plans in Reducing Energy Consumption: Experiences from Participants in the Green Deal Ukraïna Pro Green Deal for Smart Cities Program. *Ukrainian analytical digest*, 9, 20-24. <https://doi.org/10.3929/ethz-b-000696570>
4. Fang, S., Zhou, P., Dinçer, H., & Yüksel, S. (2021). Assessment of safety management system on energy investment risk using house of quality based on hybrid stochastic interval-valued intuitionistic fuzzy decision-making approach. *Safety Science*, 141, 105333. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925753521001776>
5. Le, S. T., Nguyen, T. N., Linforth, S., & Ngo, T. D. (2023). Safety investigation of hydrogen energy storage systems using quantitative risk assessment. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(7), 2861-2875. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319922047280>
6. Pasman, H., Sripaul, E., Khan, F., & Fabiano, B. (2023). Energy transition technology comes with new process safety challenges and risks. *Process Safety and Environmental Protection*, 177, 765-794. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957582023006407>

FREQUENCY ANALYSIS OF STRUCTURES: SPECTROGRAM AS A MONITORING TOOL

Maksym Vabishchevych, Professor, Doctor of Technical Sciences¹ (ORCID: 0000-0002-0755-5186),

Oleg Dedov, Professor, Doctor of Technical Sciences¹ (ORCID: 0000-0001-5006-772X),

Dmytro Savchuk, Postgraduate¹ (ORCID: 0009-0006-0366-0532),

Volodymyr Vynokur, Postgraduate¹ (ORCID: 0009-0002-3218-5620),

¹ Kyiv National University of Construction and Architecture, Povitryanykh syl avenue 31, 03037, Ukraine

ABSTRACT. Frequency analysis of building structures plays an important role in ensuring their reliability and safety. One of the key methods for assessing the dynamic characteristics of structures is a spectrogram, which allows studying the change in frequency components over time. This paper considers the application of the Fourier transform to construct a spectral representation of structural vibrations, as well as an analysis of the effectiveness of spectral-temporal methods in monitoring the technical condition of structures. The main stages of constructing a spectrogram include collecting data using sensors, processing them using the Fourier transform, and visualizing the results obtained. Interpreting the spectrogram allows you to determine changes in the structure of the building, detect hidden defects, and predict possible damage. The paper also considers the advantages and disadvantages of various frequency analysis methods. The results of the study demonstrate the prospects for using spectrograms for monitoring structures. Further research can be aimed at improving signal processing algorithms and integrating frequency analysis into automated systems for assessing the condition of structures.

Keywords: frequency analysis; spectrogram; Fourier transform; monitoring of building structures.

Introduction. Monitoring the condition of building structures is one of the key tasks in the field of engineering. Maintaining their integrity and safety is critical to preventing accidents and extending the service life of structures. Traditional methods of assessing the condition of structures, such as visual inspection or static tests, have their limitations, while the use of spectral analysis allows you to get a much more detailed picture of changes in the building structure.

Frequency analysis, which is based on a spectrogram, is one of the most effective methods for assessing the dynamic characteristics of a structure. The use of the Fourier transform allows you to decompose the time signal into frequency components, which allows you to determine the natural frequencies of oscillations of the structure and study their change in time. This is especially important for detecting structural changes caused by mechanical loads or external influences.

Analysis of recent research and publications. A significant number of studies confirm the effectiveness of spectral analysis in monitoring building structures. For example, the work [1] considers spectral-temporal analysis of monitoring data based on the Fourier transform. This study demonstrates how temporal changes in frequency components can be used to assess the stability of a structure.

The study [2] considers methods for monitoring the frequency spectrum of structures that can be

adapted to assess their technical condition. The study shows that hybrid spectral analysis methods significantly increase the accuracy of assessing changes in the frequency spectrum.

In addition, the work [3] explores methods of geoinformation analysis that can be integrated into the frequency monitoring system of structures.

Research objective. The purpose of this work is to study methods for constructing spectrograms of natural frequencies of vibrations of building structures, analyze their effectiveness in monitoring the condition of structures, and evaluate the possibility of using the Fourier transform to improve the accuracy of diagnostics.

Main part. Frequency analysis is an important tool for assessing the condition of building structures. It allows determining the natural frequencies of vibrations of a structure, which is a key parameter for diagnosing its structural integrity. Natural frequencies depend on the geometry, material and operating conditions of the structure.

Main stages of constructing a spectrogram:

1. Data collection. At the first stage, it is necessary to obtain a time signal of the structure's vibrations. For this, various types of sensors are used:

- Accelerometers - measure the acceleration of the structure in response to external influences.
- Geophones - record mechanical vibrations of the soil and structures.
- Laser vibrometers - allow for contactless measurement of surface vibrations.

The obtained data are recorded in the form of time signals $x(t)$, which contain information about the change in the amplitude of the vibrations over time.

2. Data processing using the Fourier transform

To analyze the frequency composition of a signal, the Fourier transform is used, which allows you to decompose the signal into harmonic components. The Fourier transform allows us to obtain the spectrum of a signal, but it does not take into account the changes in frequency components over time. For this, the short-time Fourier transform (STFT) is used.

The basic equation of oscillations of a mechanical system has the form:

$$m \frac{\partial^2 x(t)}{\partial t^2} + c \frac{\partial x(t)}{\partial t} + kx(t) = F \quad (1)$$

where:

- m — mass of the structure,
- c — damping coefficient,
- k — stiffness of the structure,
- x — displacement,
- $F(t)$ — external force.

The natural frequencies are determined by the formula:

$$fn = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2)$$

where:

fn — the natural frequency of oscillation.

The Fourier transform is a basic mathematical tool for analyzing the frequency spectrum of signals. It allows you to decompose a time signal into its harmonic components. The Fourier transform formula is:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \exp(-i(2\pi ft)) dt \quad (3)$$

where:

- $x(t)$ — the time signal,
- $X(f)$ — the spectral representation of the signal,
- f — the frequency.

The Fourier transform allows us to obtain the signal spectrum, which is the basis for constructing a spectrogram.

A spectrogram is a graphical representation of the frequency spectrum of a signal over time. It allows you to detect changes in frequency components, which is especially important for the analysis of non-stationary processes. The formula for the short-time Fourier transform (STFT):

$$X(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) w(\tau - t) \exp(-i(2\pi f\tau)) d\tau \quad (4)$$

where:

$w(\tau - t)$ — the window function,

$X(t, f)$ — spectrogram of the signal.

3. Construction of a spectral representation

Based on STFT, a spectrogram (fig. 1) is constructed, which shows the change in frequency components over time. It is a three-dimensional graph, where:

- Y-axis – time;
- X-axis – frequency;
- Color or intensity – amplitude of the frequency component.

4. Interpretation of the obtained results

The final stage is the analysis of the obtained spectrogram. The main aspects of the interpretation:

- Change in natural frequencies - may indicate structural changes in the structure.
- The appearance of new frequency components - may indicate the appearance of cracks or weakening of joints.
- A decrease in the amplitude of oscillations - may be a sign of damping or changes in material properties.

The spectrogram is used to analyze the vibrations of bridges, high-rise buildings, and industrial structures. It allows you to detect changes in the frequency spectrum, which may indicate the appearance of cracks, weakening of joints, or changes in material properties.

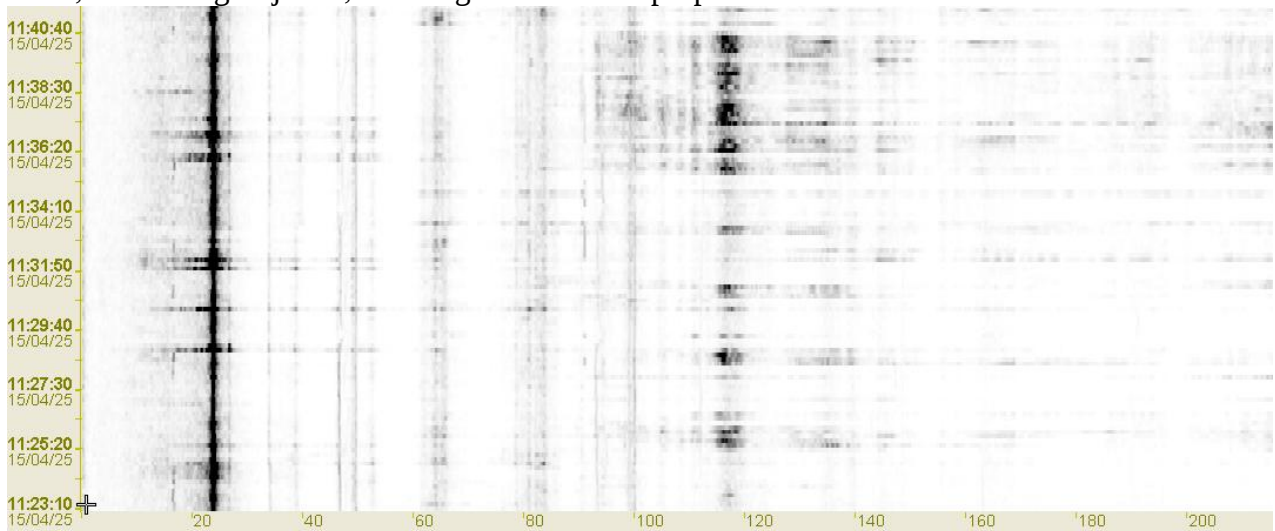


Fig. 1. Example of visualization of the spectrogram of the natural frequencies of vibrations of the structure

Conclusions. Frequency analysis of building structures, in particular the spectrogram method, is an important tool for assessing their technical condition. The use of the Fourier transform allows obtaining a spectral representation of the vibration signal, and the spectrogram adds the ability to study changes in the frequency spectrum over time. This allows you to detect potential structural changes, assess the stiffness and damping of the material, and predict possible structural damage.

Analysis of literature sources showed that spectral-temporal methods are actively used in monitoring structures. The works confirm the effectiveness of hybrid spectral analysis methods and indicate the prospects for integrating frequency analysis with geoinformation technologies.

The main stages of constructing a spectrogram include data collection, their processing using Fourier transform, construction of a spectral representation and interpretation of the obtained results. The obtained spectrogram allows to accurately assess the state of the structure and predict its behavior under the influence of mechanical loads. The results of the analysis of spectrograms of vibrations of structures showed that changes in the frequency spectrum can be a reliable criterion for assessing the state of the structure.

Thus, frequency analysis and spectrograms are a powerful tool for monitoring building structures. Further research can be aimed at improving spectral analysis algorithms, integrating machine learning

methods for automatic detection of anomalies in the spectrogram, and developing new high-precision methods for assessing the condition of structures.

References:

1. Vabishchevych M.O., Dedov O.P., Savchuk D.O. The current state of the problem of numerical investigation of metal structure refusal based on dynamic monitoring // Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-and-technical collected articles. – K.: KNUBA, 2024. – Issue. – P. 52-57. <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2024.112.52-57>
2. Soproniuk, I. I. (2024). Metody monitorynhu chastotnoho spektru dlya pidvyshchennya efektyvnosti bezprovodovykh kohnityvnykh telekomunikatsiynykh system: Kvalifikatsiyna naukova pratsya [Frequency spectrum monitoring methods to improve the efficiency of wireless cognitive telecommunication systems: Qualification scientific work]. Kharkiv: UkrSURT. [in Ukrainian].
3. Stetsyuk M. P. (2023). Heoinformatsiynyy analiz zmin lisovkrytykh ploshch Kyivs'koyi oblasti za danymy DZZ: Vypuskna atestatsiyna robota. [Geoinformation analysis of changes in forested areas of Kyiv region based on remote sensing data: Graduation attestation work] Kyiv: KAI. [in Ukrainian].

MATHEMATICAL MODELING OF THE NATURE OF LOAD CHANGES IN THE MANIPULATOR ARM DRIVE NYRIO ONE

Yaroslav Korobenko, postgraduate¹,

Dmytro Mishchuk, PhD, Ass. Prof.¹ (ORCID: 0000-0002-8263-9400),

¹Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine

ABSTRACT. *Nyrio One is a robotic platform for teaching robotics. This platform has an open architecture, which means that anyone can build such a robotic system. One of the shortcomings of the standard version of Nyrio One is the weak drive system of the manipulator arm. This place in Nyrio One is the most loaded, but due to the primitive design of the drive, large torque moments arise on the motor shaft. This leads to incorrect and inaccurate operation of this mechanism. To compensate for large loads in the arm drive of this manipulator, a torsion spring was install in parallel in its hinge. However, such a solution is not optimal. This work proposes a study that shows the patterns of load changes in the arm drive hinge. Based on the obtained research data, possibilities been proposed for upgrading the drive, which will allow using this manipulator without using an additional spring in the hinge. For comfortable operation of the boom arm drive mechanism, it is desirable to additionally use a reducer with a gear ratio of more than 2. The Lagrange equation was use for mathematical modeling of the movement of the manipulator boom. The kinetic energy of the entire mechanical system of the manipulator and the elementary work of its main moving parts were determined. Based on the obtained kinetic energy formula, the dynamic equation of motion of the manipulator was calculated. From the obtained equation, the total load of the driving torque was determined.*

Keywords: *Nyrio One; cycloid gearbox; robotics; educational platform.*

Introduction. To determine the directions of modernization of Nyrio One, the architecture of this robot was considered and analyzed in such key aspects as hardware, software and system integration.

The drive design of the first Niryo model based on the use of belt drives with a toothed pulley to drive the main arm section and rotate the arm handle. This solution poses a number of problems, which is associated with the low torque of the stepper motor Nema 17 without a gearbox, as implemented in the Niryo One drive design. To analyze the loads in the drive mechanism, the scheme of this robot was consider and its dynamic model was build (Fig. 1).

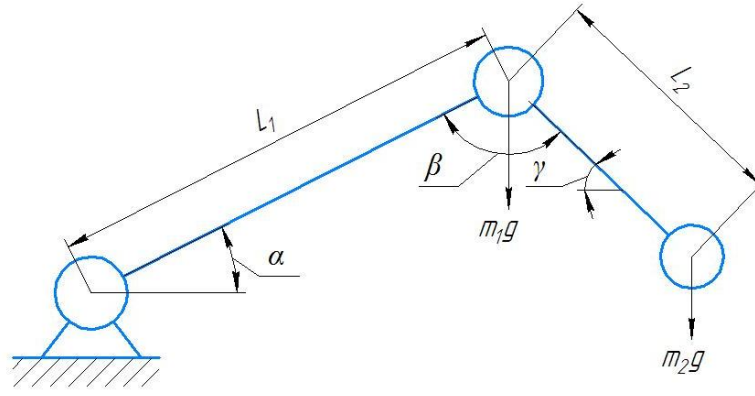


Fig. 1. Robot dynamical model

In the given dynamic model, it was assumed that the main external influence on the design of the robot arm drive created by the moving masses m_1 and m_2 . The generalized coordinates were taken to be the angles of rotation α and β .

The kinetic energy of such a system is equal to [1, 2]:

$$T = \frac{1}{2} J_1 \dot{\alpha}^2 + \frac{1}{2} J_2 \dot{\gamma}^2 + \frac{1}{2} m_2 \dot{x}_2^2 + \frac{1}{2} m_2 \dot{y}_2^2, \quad (1)$$

where $J_1 = m_1 l_1^2$ and $J_2 = m_2 l_2^2$ moments of inertia, which is determined through the parameters of the moving masses; $\gamma = \pi - \alpha - \beta$; $x_2 = l_1 \cos \alpha + l_2 \cos \gamma$; $y_2 = l_1 \sin \alpha - l_2 \sin \gamma$.

The dynamic equation of equilibrium of the moments that arise in the arm drive defined as follows:

$$J_{361} \ddot{\alpha} + J_{362} \ddot{\beta} + (2\dot{\alpha}\dot{\beta} + \dot{\beta}^2) l_1 l_2 m_2 \sin \beta = M - m_1 l_1 g \cos \alpha - m_2 g (l_1 \cos \alpha - l_2 \cos(\alpha + \beta)), \quad (2)$$

where $J_{361} = l_1^2 (m_1 + m_2) + 2m_2 l_2^2 - 2l_1 l_2 m_2 \cos \beta$.

In this way, the driving moment of the handle will be equal to:

$$M = J_{361} \ddot{\alpha} + J_{362} \ddot{\beta} + (2\dot{\alpha}\dot{\beta} + \dot{\beta}^2) l_1 l_2 m_2 \sin \beta + m_1 l_1 g \cos \alpha + m_2 g (l_1 \cos \alpha - l_2 \cos(\alpha + \beta)). \quad (3)$$

Analyzing equation (3), we note that the driving torque will consist of a static resistance torque and a dynamic torque, which will arise only in the driving mode. In this case, the dynamic moment will depend on the mode of motion of the manipulator links. Let us examine equation (3) for different modes of motion.

A typical linear mode with proportional speed change can be describe by the following equation [3, 4]:

$$\begin{cases} \dot{\alpha} = \dot{\alpha}_0 + k_1 t; \\ \dot{\beta} = \dot{\beta}_0 + k_2 t; \\ \ddot{\alpha} = k_1; \\ \ddot{\beta} = k_2, \end{cases} \quad (4)$$

where k_1 and k_2 is coefficients of proportionality of speed change.

If we assume that the mechanical system under consideration accelerates from a standstill state, then the acceleration time will be equal to t_1 and the final acceleration speed will be $\dot{\alpha}_{\max}$ and $\dot{\beta}_{\max}$. The proportionality coefficients for the system of equations (4) with the assumptions made are determined as follows: $k_1 = \dot{\alpha}_{\max} / t_1$ and $k_2 = \dot{\beta}_{\max} / t_1$.

The equations of displacement change for mode (4) in the absence of initial velocity will have the following form:

$$\begin{cases} \alpha = \alpha_0 + \frac{1}{2} k_1 t^2; \\ \beta = \beta_0 + \frac{1}{2} k_2 t^2, \end{cases} \quad (5)$$

where α_0 and β_0 is the initial coordinates from which the movement starts.

The next mode of speed change is one that creates a linear change in acceleration:

$$\begin{cases} \dot{\alpha} = \dot{\alpha}_0 t + \frac{1}{2} c_1 t^2; \\ \dot{\beta} = \dot{\beta}_0 t + \frac{1}{2} c_2 t^2; \\ \ddot{\alpha} = \ddot{\alpha}_0 + c_1 t; \\ \ddot{\beta} = \ddot{\beta}_0 + c_2 t, \end{cases} \quad (6)$$

where c_1 and c_2 is coefficients of proportionality of the change in acceleration.

If we consider only the acceleration section, then at the beginning of the movement the speed is equal to 0, and at the end of the acceleration at time t_1 the speed will be $\dot{\alpha}_{\max}$ and $\dot{\beta}_{\max}$. This means that the proportionality coefficients must have the following form:

$$\begin{cases} c_1 = \frac{2\dot{\alpha}_{\max}}{t_1^2}; \\ c_2 = \frac{2\dot{\beta}_{\max}}{t_1^2}. \end{cases} \quad (7)$$

The equations of motion for mode (6) in the absence of initial velocity will be as follows:

$$\begin{cases} \alpha = \alpha_0 + \frac{1}{6} c_1 t^3; \\ \beta = \beta_0 + \frac{1}{6} c_2 t^3. \end{cases} \quad (8)$$

where α_0 and β_0 is the initial coordinates from which the movement starts.

References:

1. Mishchuk, Y., Korobenko, Y., & Mishchuk, D. (2025). Methods for improving the Nyrio One educational robotic platform. Part I. Girnichi, budivelni, Dorozhni Ta meliorativni Mashini, (105), 51–61. <https://doi.org/10.32347/gbdmm.2025.105.0304>
2. Lovejkin V.S., Mischuk D.A. (2010). Optimizacija rezhimu pusku visuvnoi rukojati krana-manipuljatora pid chas gorizontalnogo peremishhennja vantazhu z urahuvannjam jogo kolivan [Optimization mode start sliding handle crane-manipulator during horizontal movement of cargo considering its fluctuations]. Girnichi, budivelni, dorozhni ta meliorativni mashini [Mining, construction, road and melioration machines], No. 73, 3-8.
3. Mischuk D.A. (2015) Planning trajectory of the manipulator construction robot. Proceedings of the 2rd International Conference "Ener-gysaving machinery and technology", 46-47.
4. Lovejkin V.S. Mischuk D.A. (2012). Matematichne modeljuvannja zmini vil'otu vantazhu manipuljatorom z gidroprivodom [Mathematical modeling of changes in cargo flight with hydraulic manipulator]. Girnichi, budivel-ni, dorozhni ta meliorativni mashini [Mining, construction, road and reclamation machines], No. 79, 9-15.

ОПТИМІЗАЦІЯ РОБОЧИХ РЕЖИМІВ ВІБРАЦІЙНОГО ЕЛЕКТРООСМОТИЧНОГО ЗНЕВОЛОЖУВАЧА СТОХАСТИЧНИМ МОДЕЛЮВАННЯМ

Ігор Паламарчук, професор, д.т.н., професор¹ (ORCID: 0000-0002-0441-6586),

Оксана Зозуляк, доктор філософії, асистент¹ (ORCID: 0000-0002-5024-4551),

¹ Національний університет біоресурсів і природокористування України, вул. Героїв Оборони 15, м. Київ, 03041 Україна

АНОТАЦІЯ. Процес вібровідцентрового електроосмотичного зневоложення містить комбіновану рушійну силу, що містить уякості складових знакозмінні та відцентрові навантаження, електроосмотичний тиск та термічний вплив. Такий фізико-механічний потенціал забезпечує вирішення складних завдань із зневоднення високоволової сировини, що вимагає багатопланового обґрунтування параметрів робочого режиму. У ході дослідження процесу видалення вологи із жомових відходів цукропереробного виробництва використовували стохастичне моделювання методом рототабельного центрально-композиційного планування багатofакторного експерименту. За результатами математичного аналізу одержано математичну модель у вигляді множинної регресії другого порядку, яка адекватно описує досліджуваний процес. Отримані ефективні діапазони робочих параметрів дозволили значно інтенсифікувати процес видалення вільної та умовно зв'язаної вологи за рахунок ефективної комбінації вібровідцентрових, електроосмотичних та теплообмінних важелів.

Ключові слова: вібрація; відцентрові сили; напруженість електроосмосу; процес видалення вологи; багатofакторний експеримент; рототабельне планування; жомова сировина.

Вступ. Процес зневоложення є одним із найбільш складних та енергоємних процесів переробних і харчових виробництв, які визначаються комплексною дією фізико-механічних та теплофізичних чинників. За таких умов шляхи зменшення собівартості такого процесу вимагає пошуку інноваційних технологічних та конструктивних рішень при розробці систем зневоложення [1], [2], [3], [4]. При цьому завдання ефективної обробки високо вологого харчового насіння баштанних культур до кондиційної вологості, що визначає якість оброблюваного продукту, викликають необхідність обґрунтування та оптимізації робочих режимів при реалізації розробленого способу зневоложення. Таким чином, **актуальним** є реалізація активного планування експериментальних досліджень та отримання оптимальних або ефективних механічних та фізико-механічних параметрів обробки жому.

Аналіз літературних джерел. Проведеним аналізом існуючих способів електрокінетичної обробки сировини із різними фізико-хімічними властивостями встановлено, що для видалення вологи з продуктів, найчастіше застосовується конвективний спосіб сушіння, істотним недоліком якого є високі енерговитрати процесу. Окрім того, сушильний енергоносіє, що спочатку сприяє розширенню зони випаровування всередину та утворенню у поверхневих шарах продукту збільшеного вмісту сухих речовин, у подальшому стримує процес зневоложення і погіршує випаровування вологи з глибини продукту [1], [2].

При застосуванні електроосмосу слід враховувати, що сучасні погляди на механізм електрокінетичних явищ ґрунтуються на уявленні про наявність подвійного електричного шару на межі розподілу фаз, що визначається швидкістю електродних процесів і, відповідно, переміщенням вологи всередині продукту [5], [6]. Електроосмос, як окремий випадок електрокінетичних явищ, цілеспрямовано може бути використаний для зневоложення харчових продуктів, проте високі значення напруги негативно впливають на структуру і фізико-хімічні показники продукту, що обробляється [6].

Низькочастотні коливання дозволяють реалізувати у ході досліджуваного процесу як зони ущільнення при дії електроосмосу, так і псевдорозріджений шар для забезпечення максимальної поверхні контакту хомової маси з потоком теплоносія, нівелювання дії адгезійних та сорбційних сил зчеплення вологи з матеріалом [5], [6]. Дані технологічні аспекти були виконані при використанні у якості рушійних відзначеної комбінованої структури рушійних сил досліджуваного процесу зневоложення жомової сировини.

Мета роботи. Оптимізація режимних параметрів роботи вібровідцентрового електроосмотичного зневоложувача [5] для інтенсифікації процесу вологовидалення з жому, що досягається шляхом проведення кореляційно-регресійного аналізу якісних параметрів вихідної сировини означеного процесу.

Матеріали і методи. Різноманітна фізико-механічна природа представлених складових рушійної сили, складність технологічних аспектів їх реалізації викликають значні труднощі та об'єм робіт у ході дослідження впливу перерахованих вище факторів на технологічні параметри даного процесу зневоложення, що зумовлює застосування багатофакторного активного планування експерименту. Тому при його проведенні доцільно здійснити стохастичне моделювання для отримання функціональної залежності у вигляді множинної регресії другого порядку за допомогою рототабельного центрально-композиційного планування багатофакторного експерименту [7]. Даний метод дозволяє достатньо точно отримати математичний опис розподілу даних за рахунок збільшення кількості експериментів у центральних точках матриці плану за спеціального вибору величини «зіркового значення» α .

Виклад основного матеріалу. У процесі стохастичного моделювання якісну характеристику досліджуваного процесу зневоложення представляли функцією:

$$W = f(a, U, t, E), \quad (1)$$

де W – вміст кінцевої вологи у вихідному продукті, %; a – віброприскорення, м/с^2 ; U – робоча напруга електроосмотичного генератора; t – час технологічного впливу, хв; E – коефіцієнт технологічного завантаження, %.

Очевидно, що всі фактори, які входять до функції (1), є параметрами, що мають різну розмірність та порядки. Тому для отримання поверхні відгуку цих функцій було проведено операцію кодування факторів, що являє собою лінійне перетворення факторного простору [7]. У результаті встановлено наступні значення рівнів факторів в умовному масштабі: мінімальний -1 , середній 0 , максимальний $+1$ та зіркові значення $-\alpha$; $+\alpha$.

Істинні значення факторів матриці рототабельного центрально-композиційного планування встановлені на основі проведення пошукових експериментів і наведені у табл.1.

Таблиця 1

Рівні факторів та варіювання параметрів оптимізації процесу зневоложення жому

Фактори	Рівні факторів					Інтервал варіювання
	$-\alpha$	-1	0	$+1$	$+\alpha$	
x_1 – віброприскорення, м/с^2	5	15	20	25	35	5
x_2 – робоча напруга, В	0	1000	2000	3000	4000	1000
x_3 – час обробки, хв.	45	50	55	60	65	5
x_4 – коефіцієнт технологічного завантаження, %	60	70	80	90	100	10

Для проведення рототабельного центрально-композиційного планування повнофакторного експерименту було складено матрицю планування експерименту, яку наведено у таблиці 2. Досліджувану функціональну залежність плануємо отримати у вигляді рівняння множинної регресії 2-го порядку:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i=1}^n b_{ij} x_i^2 + \sum_{i=1}^n b_{ij} x_{ij} x_{ij} \quad (2)$$

Таблиця 2

Чотирифакторна матриця для визначення оптимальних параметрів процесу зневоложення жому

№ досліджу	Фактори					Параметри				
	x_1	x_2	x_3	x_4	$F(x_1 x_2 x_3 x_4)$	$a, \text{м/с}^2$	$U, \text{В}$ $f=15\text{кГц}$	$t, \text{с}$	$E, \%$	$W, \%$
1	+	+	+	+	+	25	3000	60	90	12
2	-	+	+	+	+	15	3000	60	90	14

3	+	-	+	+	+	25	1000	60	90	16
4	-	-	+	+	+	15	1000	60	90	18
5	+	+	-	+	+	25	3000	70	90	16
6	-	+	-	+	+	15	3000	70	90	17
7	+	-	-	+	+	25	1000	70	90	16
8	-	-	-	+	+	15	1000	70	90	17
9	+	+	+	-	+	25	3000	70	70	15
10	-	+	+	-	+	15	3000	60	70	17
11	+	-	+	-	+	25	1000	60	70	16
12	-	-	+	-	+	15	1000	60	70	17
13	+	+	-	-	+	25	3000	70	70	14
14	-	+	-	-	+	15	3000	70	70	15
15	+	-	-	-	+	25	1000	70	70	14
16	-	-	-	-	+	15	1000	70	70	16
17	$+\alpha$	0	0	0	+	35	2000	55	80	12
18	$-\alpha$	0	0	0	+	5	2000	55	80	17
19	0	$+\alpha$	0	0	+	20	4000	55	80	14
20	0	$-\alpha$	0	0	+	20	0	55	80	19
21	0	0	$+\alpha$	0	+	20	2000	65	80	10
22	0	0	$-\alpha$	0	+	20	2000	45	80	13
23	0	0	0	$+\alpha$	+	20	2000	55	100	14
24	0	0	0	$-\alpha$	+	20	2000	55	60	10
25	0	0	0	0	+	20	2000	55	80	12
26	0	0	0	0	+	20	2000	55	80	12

Гіпотезу про відтворюваність дослідів перевіряли за допомогою критерія Кохрена, який показав, що на 95 % рівні довірчої ймовірності дисперсії є однорідними, так як розрахункове значення критерію менше за табличне. Перевірку значимості коефіцієнтів регресії перевірили за t - критерієм Стюдента. Для оцінки адекватності отриманих регресійних рівнянь використали аналітичний метод аналізу при застосуванні розподілу та критерію Фішера. Проведена оцінка показала, що розрахункові значення виявились значно нижчими від критичних (табл.3), тобто отримані регресійні моделі адекватно описують поверхні відгуку та їх можна використовувати для оптимізації означеного процесу.

Таблиця 3

Значення розрахункових критеріїв для отриманих регресійних моделей

Критерій оцінки	Позначення критерію	Функція відгуку
Коефіцієнт детермінації	R^2	0,31
Дисперсія адекватності	$S_{ад}$	10,94
Дисперсія відтворюваності	$S_{відт}$	4,73
Критерій Фішера	F	2,3
Критичне значення критерію Фішера, яке рівне значенню розподілу Фішера	$F_{\alpha, f1, f2}$	$2,84_{0,05;4;21}$

У результаті обробки експериментальних даних у статистичному середовищі STATISTICA 6.0 було отримано коефіцієнти комплексних рівнянь множинної регресії 2-го порядку та побудовано наступні залежності швидкості вологовіддачі продукту від віброприскорення контейнера, коефіцієнта завантаження контейнера, температури нагріву зерна та часу технологічного впливу (рис.1).

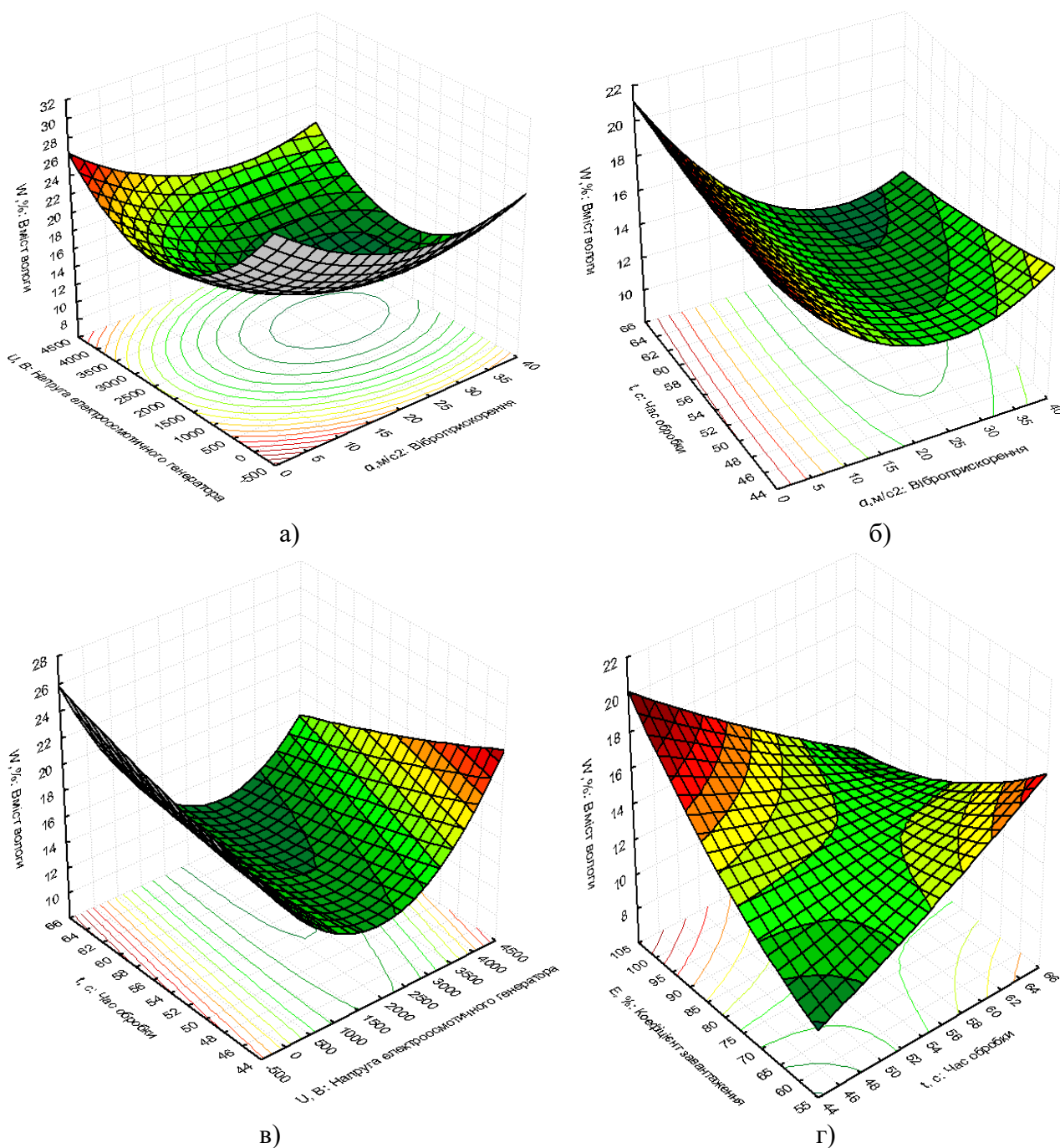


Рис. 1. Поверхні відгуків та їх проєкції для якісних параметрів процесу зневоложення жому: а) залежності між параметрами W , U , a ; б) залежності між параметрами W , t , a ; в) залежності між параметрами W , U , t ; г) залежності між параметрами W , E , t

Обговорення. Як бачимо з графічних залежностей (рис.1) мінімізація вмісту води спостерігалась при величинах напруги електроосмотичного генератора $U=2200\text{В}$ та віброприскорення низькочастотних коливань $a=27\text{м/с}^2$ (рис.1, а); часу обробки $t=50\text{--}60\text{с}$ (рис.1, б, в); коефіцієнту завантаження $E=75\%$ (рис.1, г).

За результатами представленого активного планування експерименту досліджуваного процесу вібровідцентрового електроосмотичного зневоложення на основі побудованих поверхонь відгуку досліджуваних процесів було визначено оптимальні технологічні параметри його роботи (табл. 4), компромісне значення яких було отримано методом Крамера в математичному середовищі «Mathcad 14».

$$W = f(a, U, t, E) = -42 - 0,3a + 0,01a^2 + 0,002U + 1,17t + 0,64E + 0,002E^2 - 0,005at - 0,015tE \quad (3)$$

Оптимальні технологічні параметри досліджуваного процесу зневоложення жому

Технологічний параметр	Раціональне значення
Віброприскорення, м/с^2	20-22
Робоча напруга електроосмотичного генератора, кВ	2-2,5
Час технологічного впливу, хв	60-66
Коефіцієнт технологічного завантаження, %	60-65

Висновки. За результатами багатофакторного експерименту одержано математичну модель у вигляді множинної регресії другого порядку, що є залежністю між такими параметрами досліджуваного процесу вібровідцентрового електроосмотичного зневоложення жомової сировини, як віброприскорення низькочастотних коливань, коефіцієнт завантаження контейнера, час технологічної обробки. Даний математичний алгоритм адекватно описує досліджуваний процес, що підтверджено при допомозі критерію Фішера.

Аналіз отриманої стохастичної моделі дозволив отримати ефективні діапазони основних технологічні параметри роботи вібровідцентрового електроосмотичного зневоложувача: віброприскорення низькочастотних коливань у межах 20-22 м/с^2 ; робоча напруга електроосмотичного генератора 2-2,5 кВ; коефіцієнт завантаження оброблюваного матеріалу 60-65 %; час технологічного впливу 60-65 хв. За таких характеристиках робочого режиму вміст кінцевої вологи у жомовій сировині становить 10 %.

Список використаних джерел:

1. Snezhkin, Y.F., Shapar', R.A., Gusarova, E.V. (2022): Theoretical and Experimental Studies of Convective Dehydration of Spicy-Aromatic Raw Materials. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 95(6), 1366–1373.
2. Petrova, Z.A., Slobodyanyuk, E.S. (2019): Energy-Efficient Modes of Drying of Colloidal Capillary-Porous Materials. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 92(5), 1231–1238.
3. Burdo, O., Bezbah, I., Kepin, N., Zykov, A., Yarovyi I., Gavrilov A., Bandura, V., Mazurenko, I. (2019): Studying the operation of innovative equipment for thermomechanical treatment and dehydration of food raw materials. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 5(11-101), 24–32.
4. Yaroshevich N.P., Lanets O.S., Yaroshevych O.M. (2022). Slow Oscillations in Systems with Inertial Vibration Exciters. *Mechanisms and Machine Science*, 116, 29–42. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-96603-4_3
5. Pat. na korysnostey model № 80873 Ukrayiny, MPK F26B17/30. Vibrovvidtsentrova susharka / Palamarchuk Ihor Pavlovych, Yanovych Vitaliy Petrovych, Zozulyak Ihor Anatoliyovych, Zozulyak Oksana Volodymyrivna. - Vlasnyk Vinnytskyy natsionalnyy ahrarnyy universytet.; opubl. 10.06.2013, Byul. № 11. [in Ukrainian].
6. Palamarchuk, I., Zozulyak, O., Mushtruk, M., Petrychenko, I., Slobodyanyuk, N., Domin, Î., Udodov, S., Semenova, O., Karpovych, I., & Blishch, R. (2022). The intensification of dehydration process of pectin-containing raw materials. In *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences* (Vol. 16, pp. 15–26). HACCP Consulting. <https://doi.org/10.5219/1711>
7. Bondar A. G. Planirovaniye eksperimenta pri optimizatsii protsessov khimicheskoy tekhnologii (algoritmy i primery): ucheb. posobiye / Bondar A. G., Statyukha G. A., Potyazhenko I. A. - M.: Vyssh. shkola, 1980. - 264 s. [in Ukrainian].

КОМПЛЕКСНИЙ МОНІТОРИНГ СИСТЕМ ЧЕРЕЗ ПРИЗМУ ТРЕЙСІВ, МЕТРИК ТА ЛОГІВ

Владислав Сусідко, здобувач ступеня вищої освіти магістр¹ (ORCID: 0009-0002-8652-8393),

Нікіта Панагода, здобувач ступеня вищої освіти магістр¹ (ORCID: 0009-0005-0174-900X),

Юлія Рябчун, доцент кафедри інформаційних технологій¹ (ORCID: 0000-0002-8320-4038),

Володимир Хроленко, доцент кафедри інформаційних технологій¹ (ORCID: 0009-0007-2157-2023),

Наталія Попович, доцент кафедри інформаційних технологій¹ (ORCID: 0000-0002-0485-8464),

¹ Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних сил 31, 03037, Україна

АНОТАЦІЯ. У роботі досліджено концепцію комплексного моніторингу сучасних інформаційних систем із застосуванням трейсів, метрик та логів. Проаналізовано особливості кожного з підходів, їхні переваги й обмеження. Розкрито принципи інтеграції трьох рівнів моніторингу для досягнення цілісного бачення стану системи. Представлено порівняльний огляд актуальних інструментів збору, агрегації та аналізу даних (Prometheus, Grafana, OpenTelemetry тощо). Акцентовано на перевагах синергетичного використання даних для вчасного виявлення аномалій, аналізу продуктивності й підвищення надійності розподілених систем. Робота містить практичні рекомендації щодо впровадження ефективних стратегій моніторингу у складних IT-інфраструктурах.

Ключові слова: моніторинг, трейси, метрики, логи, розподілені системи, аналіз даних.

Вступ. Сучасні розподілені інформаційні системи характеризуються високою складністю, що вимагає застосування ефективних методів моніторингу для забезпечення їх стабільної роботи. Традиційні підходи, що базуються на окремому аналізі логів, метрик або трейсів, часто не дають повної картини стану системи. Саме тому інтеграція різних джерел даних дозволяє отримати більш комплексне уявлення про роботу систем, своєчасно виявляти збої та аномалії, оптимізувати процеси відновлення та забезпечувати високий рівень надійності.

Аналіз літературних джерел. У наукових і прикладних роботах останніх років (зокрема в рамках OpenTelemetry, Grafana Labs, Google SRE-ініціатив) активно досліджуються аспекти збору та уніфікації моніторингових даних. Однак більшість підходів зосереджуються на вдосконаленні окремих інструментів або типів даних, залишаючи поза увагою системну інтеграцію трьох основних компонентів: логів, метрик та трейсів [1, 2].

Аналіз [3] показує відсутність уніфікованих практик для реалізації комплексного моніторингу, що водночас є гнучким, масштабованим і адаптивним до особливостей конкретних розподілених середовищ. Також бракує порівняльної оцінки ефективності різних конфігурацій збору та обробки даних у реальних кейсах.

Мета роботи. Метою дослідження є розробка та аналіз комплексного підходу до моніторингу систем, що базується на синергії трейсів, метрик та логів. Основними завданнями є:

- визначення ролі кожного з компонентів моніторингу;
- оцінка переваг інтегрованого підходу порівняно з традиційними методами;

розробка рекомендацій щодо впровадження комплексних систем моніторингу у розподілених середовищах.

Виклад основного матеріалу. Трейсінг — це метод спостереження за виконанням запитів або процесів у розподілених системах, який дозволяє відстежити шлях окремої операції через усі сервіси, компоненти та залежності [4, 5]. На відміну від метрик чи логів, трейсінг надає деталізовану інформацію про те, як саме запит проходить через систему, які вузли він зачіпає, скільки часу витрачається на кожен етап і де виникають затримки чи помилки. Це особливо важливо для мікросервісних архітектур, де один запит може проходити через десятки чи сотні різних сервісів, і без трейсінгу зрозуміти причину проблеми або повільної роботи стає майже неможливо.

Для реалізації трейсінгу використовуються спеціалізовані інструменти та фреймворки, які забезпечують збір, передачу, зберігання й візуалізацію трейсів. Одним із найпоширеніших рішень є Jaeger – відкрите програмне забезпечення, розроблене компанією Uber. Він дозволяє збирати дані про трасування в режимі реального часу, зручно будувати графи викликів і шукати вузькі місця в системі (рис.1).

Метрики відображають стан та поведінку системи у певний момент часу або на протязі певного періоду [6]. Вони є однією з ключових складових комплексного моніторингу, оскільки дозволяють кількісно оцінювати продуктивність, навантаження та загальне здоров'я інфраструктури чи окремих компонентів. За допомогою метрик можна відстежувати такі параметри, як завантаження процесора, використання оперативної пам'яті, кількість запитів до бази даних або час відповіді сервісу. Регулярний збір та аналіз метрик допомагає виявляти аномалії, прогнозувати можливі збої та оптимізувати роботу системи (рис.2).

Для збору, зберігання та візуалізації метрик у сучасних інженерних практиках активно використовуються різноманітні інструменти. Одним із найпоширеніших рішень є Prometheus — система збору метрик із потужною мовою запитів PromQL, яка дозволяє гнучко обробляти та аналізувати дані. Prometheus часто інтегрується з Grafana — платформою для візуалізації, яка надає зручні дашборди для наочного відображення стану системи в реальному часі.

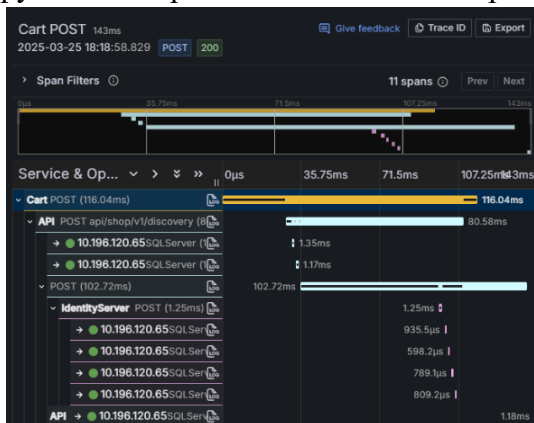


Рис.1. Трейс у розподіленій системі

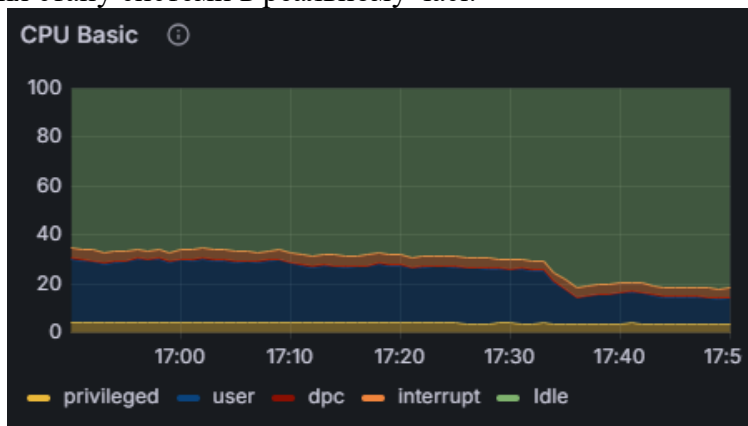


Рис. 2. Метрика використання центрального процесору сервером

У сучасних розподілених системах для збору, агрегації та аналізу логів використовують потужні інструменти та сервіси. Одним із найпоширеніших рішень є Elasticsearch у поєднанні з Logstash і Kibana, відомий як стек ELK. Ця зв'язка дозволяє централізовано зберігати великі обсяги логів, зручно шукати потрібні записи та візуалізувати їх для подальшого аналізу (рис.3). Іншим популярним рішенням став Loki від Grafana Labs, який оптимізований для роботи з великими потоками логів, підтримує зручну інтеграцію з панелями Grafana і орієнтований на ефективне зберігання логів без зайвої індексації.



Рис. 3. Логи веб-сервісу

Комплексний моніторинг систем передбачає інтеграцію даних трейсингу, метрик та логів у єдину аналітичну платформу. Це дозволяє отримати синергетичний ефект: підвищується точність діагностики, скорочується час на виявлення причин збоїв та оптимізуються процеси реагування. Системи, що використовують інтегрований підхід, демонструють вищу ефективність при вирішенні проблем у розподілених середовищах, оскільки забезпечують більш глибокий аналіз та крос-

кореляцію даних.

Сучасні інструменти, такі як Grafana, відіграють важливу роль у цьому процесі, оскільки забезпечують зручну платформу для централізованої візуалізації метрик, перегляду логів та аналізу трейсів, що дає змогу значно спростити пошук і усунення проблем, а також оптимізувати роботу системи в режимі реального часу.

Результат. Проведений аналіз показав, що інтеграція трейсів, метрик та логів дозволяє:

- Забезпечити повну видимість роботи системи у реальному часі.
- Скоротити час виявлення та усунення збоїв.
- Оптимізувати використання ресурсів за рахунок точного моніторингу навантаження.
- Підвищити ефективність роботи розподілених систем за рахунок синергії різних підходів моніторингу.

Результати дослідження підтверджують, що комплексний моніторинг є оптимальним рішенням для сучасних інформаційних систем, забезпечуючи їх стабільну роботу та високий рівень безпеки.

Висновки. Інтеграція трейсів, метрик та логів дає змогу отримати повну картину роботи розподілених систем, що суттєво покращує процеси виявлення та усунення проблем. Вибір конкретних інструментів залежить від специфіки застосування, але комплексний підхід завжди дозволяє підвищити надійність системи та швидкість реагування на збої. Рекомендації, розроблені у даній роботі, можуть бути використані для побудови сучасних систем моніторингу, що відповідають вимогам високонавантажених та критичних до стабільності сервісів.

Список використаних джерел:

1. Frank Buschmann, Regine Meunier, Hans Rohnert, Peter Sommerlad, Michael Stal — *Pattern-Oriented Software Architecture, Volume 1: A System of Patterns*. 2000. – 634 pp.
2. Hohpe G., Woolf B. *Enterprise Integration Patterns: Designing, Building, and Deploying Messaging Solutions*. Addison-Wesley, 2004.
3. Nygard M. *Release It!: Design and Deploy Production-Ready Software*. Pragmatic Bookshelf, 2007.
4. Prometheus Authors. Prometheus: Monitoring system & time series database. URL: <https://prometheus.io>, Accessed 2024.
5. Jaeger Authors. Jaeger – A Distributed Tracing System. URL: <https://www.jaegertracing.io>, Accessed 2024.
6. Elasticsearch Authors. ELK Stack – Elasticsearch, Logstash, Kibana. URL: <https://www.elastic.co/what-is/elk-stack>, Accessed 2024.

ОБҐРУНТУВАННЯ СХЕМ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ З МЕХАНІЧНИМ ВІБРОЗБУДЖУВАЧЕМ

Ігор Паламарчук, професор, д.т.н., професор¹ (ORCID: 0000-0002-0441-6586),

Денис Науменко, здобувач¹,

¹ Національний університет біоресурсів і природокористування України, вул. Героїв Оборони 15, м. Київ, 03041 Україна

АНОТАЦІЯ. Застосування вібротехнологій зумовлене потребою в підвищенні ефективності технологічних процесів, покращенні їх якісних характеристик, а також у деяких випадках — забезпеченні можливості реалізації самих процесів. Завдяки особливим властивостям вібраційного впливу стає можливим успішне виконання таких операцій, як поділ матеріалів (сепарація), змішування, транспортування за допомогою вібрації в складних умовах експлуатації, гомогенізація, фільтрація, сушіння, насичення середовищ необхідними компонентами та інші технологічні дії. Саме ці переваги зумовлюють широке впровадження вібраційного обладнання в промисловості та сільському господарстві.

Ключові слова: вібраційна сушарка; механічний віброзбуджувач; інтенсифікація сушіння; тепломасообмін; відцентрові сили.

Вступ. Сушіння сипких матеріалів відіграє важливу роль у багатьох галузях промисловості, зокрема в харчовій, хімічній і будівельній. Одним із ефективних способів підвищення інтенсивності процесів сушіння та видалення вологи є застосування низькочастотних механічних коливань [1], [2]. Вібраційна дія має значний вплив на технологічні процеси, оскільки дозволяє ефективно керувати динамікою оброблюваної сировини. Це досягається шляхом передачі значної енергії при невеликій амплітуді руху робочих елементів, активного оновлення зон взаємодії технологічних середовищ, посилення процесів конвективного переносу вологи та зниження загальних енерговитрат. Успішність сушіння значною мірою визначається рівномірним нагріванням матеріалу та забезпеченням його інтенсивного перемішування [1], [2], [3]. Введення в конструкцію сушарки механічного віброзбуджувача дозволяє активізувати процес завдяки коливальному руху, що значно покращує умови тепломасообміну та прискорює сушіння.

Аналіз літературних джерел. При проведенні аналізу конструкцій існуючих контейнерних вібросушарок, було виокремлено різні динаміки руху виконавчих органів: механічного, кінематичного та перспективного наразі комбінованого віброзбудження.

Мета роботи. Обґрунтування технологічної схеми контейнерної вібраційної сушарки, що функціонує при використанні вібраційних та хвильових ефектів шляхом дослідження тенденцій розвитку такого обладнання, конструкційних та технологічних схем їх реалізації.

Виклад основного матеріалу. Для реалізації процесів сушіння з вібраційною інтенсифікацією тепломасообмінної рушійної дії у робочому контейнері можна відзначити наступні.

Вібраційна двоконтейнерна машина [3] оснащена робочою ємністю U-подібної форми, яка поділена на дві секції. Коливання контейнера створюється завдяки обертанню інерційних дебалансів 8, що приводяться в дію електродвигуном 6. Така двоконтейнерна конструкція забезпечує безперервне переміщення сипкої маси з однієї секції в іншу після досягнення необхідного рівня вологості. Крім того, дана конструкція дозволяє чергувати режими нагрівання і депресії під час тепломасообмінної обробки, що сприяє підвищенню ефективності сушіння шляхом зміни градієнтів тепла і вологості. Для точного керування кінематикою контейнера і формування необхідної траєкторії руху сипкого матеріалу всередині, установка обладнана нерухомим двовальним віброприводом. Регулюючи параметри незрівноваженості коливальної системи — що технічно нескладно при наявності двох приводних механізмів — можна забезпечити оптимальну швидкість просування матеріалу в робочій зоні, точно визначити його траєкторію та розрахувати тривалість теплового впливу.

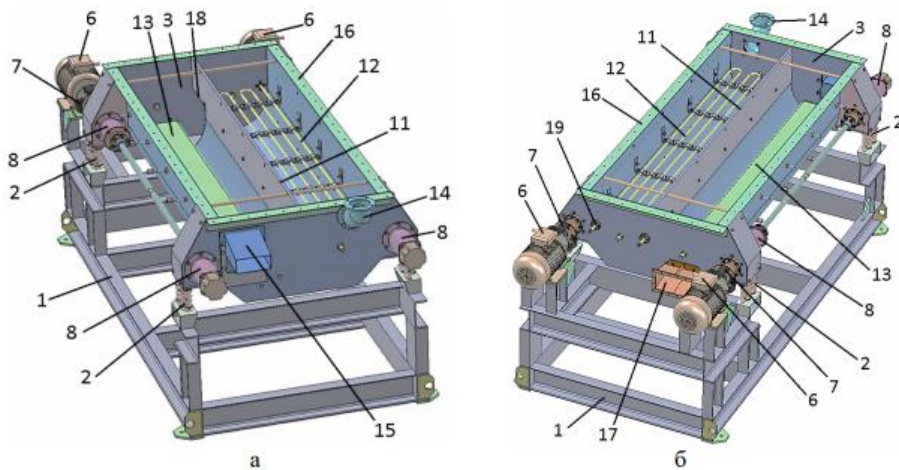


Рис. 1. Двоконтейнерна сушарка з віброприводом та адаптивним регулюванням параметрів процесу сушіння:

а – вигляд зі сторони завантажувальної та розвантажувальної горловини; б – вигляд зі сторони розміщення електродвигунів: 1 – несуча рама; 2 – амортизаційна підвіска; 3 – основний корпус; 6 – електропривод; 7 – еластична муфта; 8 – інерційний елемент з дебалансом; 11 – бічна стінка; 12 – інфрачервоні нагрівачі; 13 – патрубок; 14 – завантажувальний отвір; 15 – вивантажувальний отвір; 16 – механізм фіксації кришки; 17 – пневматична система; 18 – з’єднання між секціями-контейнерами; 19 – електричні контакти нагрівального елемента.

Гунтер В. Балз із США розробив вібраційну машину з двокамерною конструкцією та замкненим контуром робочої зони [4]. У цій моделі два ідентичні контейнери 6 (див. рис. 2) закріплюються на стаціонарній платформі за допомогою амортизаційних елементів. Кожен контейнер обладнаний власним віброзбуджувачем 4, перевантажувальним жолобом та сепарувальним вібрототком 2. У середині робочої частини передбачено шнеки, які забезпечують поступальний рух матеріалу вздовж контейнерів. Такий тип обладнання вирізняється компактними розмірами та відносною простотою виконання конструкції.

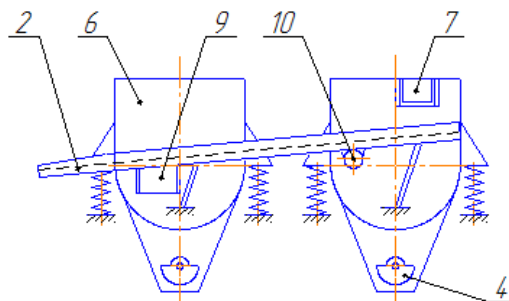


Рис. 2. Двоконтейнерна машина безперервної дії з перехідними лотками та віброприводом

У вібраційній машині безперервного типу, оснащентій перехідними жолобами (рис. 3) [5], контейнери 1 і 2 мають окремі вібраційні жолоби 3 і 4, які забезпечують переміщення оброблюваного матеріалу з однієї секції в іншу. Завдяки тому, що рівень технологічного завантаження в одному з контейнерів перевищує висоту днища відповідного віброжолоба, частина продукції, що пройшла первинну обробку, разом із наповнювачем спрямовується у другий контейнер. Після завершення наступного етапу обробки, матеріал подається далі через ще один вібраційний жолоб. У випадку, коли потрібно продовжити час обробки, мрешітчаста пластина 5 може бути піднята, що дозволяє повернути завантаження по днищу віброжолоба назад до першої робочої камери.

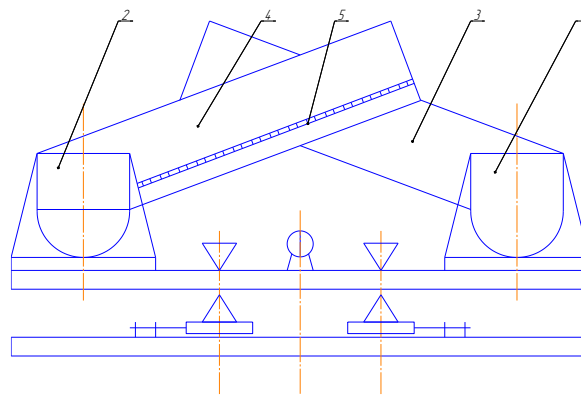


Рис. 3. Конструктивна схема двоконтейнерної вібраційної машини безперервної дії з перехідними віброжолобами

У багатопозиційних вібраційних установках робочі ємності розміщуються таким чином, що можуть переміщуватися відносно джерела коливань — віброзбуджувача. Змінюючи відстань між вібратором і осями робочих камер, можна досягти різної амплітуди коливань для кожного віброконтейнера. Переміщення однієї з камер на монтажній плиті змінює інерційний момент усієї системи, що, у свою чергу, впливає на амплітуду коливань в іншій ємності. Такий жорсткий взаємозв'язок між камерами ускладнює індивідуальне регулювання параметрів вібраційного режиму для кожної з них.

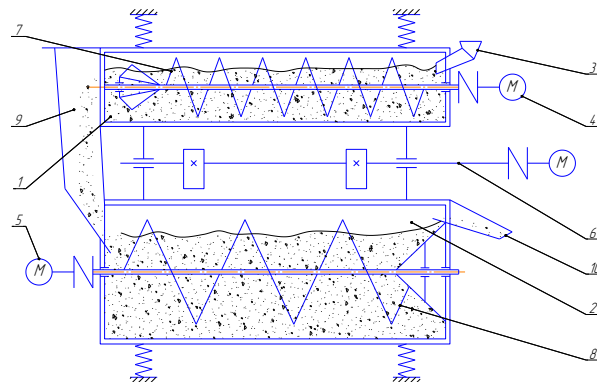


Рис. 4. Конструктивна схема двокамерної машини безперервної дії з шнековим механізмом транспортування технологічного завантаження та віброприводом

1, 2 – робочі камери; 3 – подаючий бункер; 4, 5 – приводи шнекових механізмів; 6 – вібропривод; 7, 8 – шнекові механізми; 9 – перехідний лоток; 10 – вихідний лоток.

Конструкція вібраційної машини дозволяє забезпечити кожній з робочих камер 1 і 2 (рис. 4) індивідуальні коливання з необхідною амплітудою. Це досягається за рахунок відмінностей у жорсткості амортизаційних опор, на яких закріплені контейнери, що й зумовлює різні характеристики коливань.

Перспективним рішенням у конструкції є впровадження комбінованої системи віброзбудження, що об'єднує кінематичний тип коливань із пружно-опорною системою та механізмом балансування стаціонарних мас. На основі цього принципу розроблено конструктивну схему вібраційної контейнерної сушарки (рис. 5). При однаковій величині збуджуючої сили, споживана потужність динамічного приводу виявилась на 11,7% меншою, ніж у комбінованого приводу зі статичним балансуванням, і на 13,5% меншою порівняно з приводом без компенсації стаціонарних мас. Це свідчить про вищу енергоефективність дебалансного збудження. До того ж, при однаковій амплітуді коливань контейнера, комбінований привід зі статичним балансуванням потребував у 1,5 рази менше збуджуючої потужності та в 1,8 рази менше загальної потужності, ніж дебалансний привід, що підкреслює його кращі динамічні характеристики в експериментальних умовах.

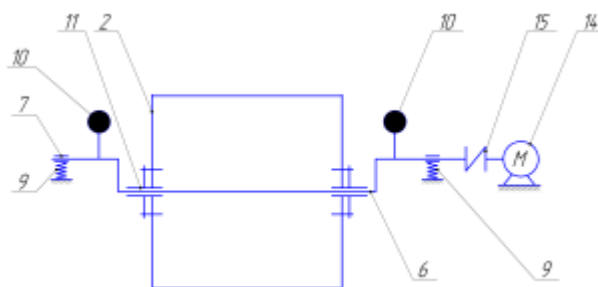


Рис. 5. Схема механічного віброзбудження робочого контейнера експериментальної установки для сушіння:
2-контейнер; 6-опорний вал; 7,6- підшипники; 9-амортизуюча ланка; 10-противаги; 11-опорний підшипник контейнера; 14-електродвигун; 15-гнучка муфта.

Висновки. У результаті проведення аналізу конструкцій контейнерних вібросушарок, було виявлено різні динаміки руху виконавчих органів, а саме, механічного та кінематичного віброзбудження, для реалізації якого представлено конструктивну схему приводу експериментальної вібраційної контейнерної сушарки.

Конструктивне виконання вібраційного приводу поєднує кінематичне віброзбудження з наявністю пружної системи опорних вузлів і системи урівноваження стаціонарних мас, що дозволяє реалізувати збіг динамічної і статичної осей та створити умови для зменшення коливних мас та відповідно енерговитрат на коливальний рух.

Список використаних джерел:

1. Palamarchuk, I., Mushtruk, M., Stadnyk, I., Derkach, A., Boyko, Y. Heat. Exchange Optimization in Transport and Technological Machines Using Vibromechanical Intensification Lecture Notes in Mechanical Engineering, 2025, pp.792–805. <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57208018791>
2. Palamarchuk, I., Mushtruk, M., Vasylyv, V., ...Karpovych, I., Pushanko, N. Modelling the centrifugal mixing process of minced meat to optimise the production of chopped meat semi-finished products. *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences*This link is disabled., 2024, 18, pp. 297–312. <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57208018791>
3. Palamarchuk, I., Zozulyak, O., Mushtruk, M., Petrychenko, I., Slobodyanyuk, N., Domin, Ľ., Udodov, S., Semenova, O., Karpovych, I., & Blishch, R. (2022). The intensification of dehydration process of pectin-containing raw materials. In *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences* (Vol. 16, pp. 15–26). HACCP Consulting. <https://doi.org/10.5219/1711>
4. Palamarchuk, I., Palamarchuk, V., Zheplinska, M. (2024). Evaluation of the energy characteristics of the infrared drying process of rapeseed and soybeans with a vibrating wave driver | Ocena charakterystyki energetycznej procesu suszenia podczerwienią nasion rzepaku i soi przy użyciu wirnika wibracyjnego. *Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Srodowiska*, 14(2), 42–46.<http://doi.org/10.35784/iapgos.5846>
<https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57208018791>
5. Palamarchuk, I., Zheplinska, M., Vasylyv, V., ...Zubar, N., Martyniv, O. Evaluation of the Energy Efficiency of the Process of Vibratory Mixing of Multicomponent Bulk Raw Material of Food Industries | Ocena efektywności energetycznej procesu mieszania wibracyjnego wieloskładnikowego surowca sypkiego przemysłu spożywczego. *Przegląd Elektrotechniczny*This link is disabled., 2024, (6), pp. 112–115. doi:10.15199/48.2024.06.21
<https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57208018791>

АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ЧИСЛОВОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПОШИРЕННЯ ТЕПЛОВИХ СТАЦІОНАРНИХ ПОТОКІВ В БАГАТОШАРОВИХ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЯХ

Ілля Мартинов, студент магістратури ПЦБ¹,

Валерій Андрухов, доцент к.т.н., доцент¹ (ORCID: 0000-0002-4749-8569),

¹Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Хмельницьке шосе 95, 21021, Україна

Анотація. Результатом представлених досліджень є висновки за результати чисельного моделювання перенесення теплової енергії в багатошарових цегляних зовнішніх стінах в багатопверхових житлових будівлях перших масових серій забудови. Презентовано та проаналізовано отримані топологію ізоліній температурних полів, встановлено величини температур на зовнішній та внутрішній поверхні стін, вплив товщини утеплювача на характер розподілу теплової енергії в товщі захисної цегляної стіни. За результатами дослідження зроблено висновки. А також констатовано, про можливість використання проекту повторного використання з товщиною утеплювача 150 мм, з дотриманням виконання вимог ДБН з термомодернізації 2021 р. Рекомендовано, в проектах з капітального ремонту спрямованого на термомодернізацію, орієнтуватися на досягнення класу енергоефективності «С».

Ключові слова: термомодернізація; енергоефективні заходи; числове моделювання; житловий будинок; ізополя температур; програмний комплекс; тепла енергія; проект повторного використання; державні будівельні норми; приведений термічний опір.

Вступ. В складі нинішнього житлового фонду України налічується біля 70,0 млн. кв. м, як великопанельних, так і цегляних житлових п'яти та дев'ятиповерхових будинків перших масових серій забудови, зведених в різні періоди, починаючи з 60-х років минулого сторіччя. На час свого зведення, ці будівлі вирішували важливе державне питання – забезпечення індивідуальним безкоштовним житлом. Але масштабність та нагальність питання на той час, змушувала йти по шляху певного спрощення, в тому числі і типізації. Ці будівлі, на даний час, активно експлуатуються, не зважаючи на те, що мають ряд суттєвих конструктивних та архітектурних недоліків та не відповідають сучасним вимогам енергозбереження, а тому потребують нагального впровадження комплексу заходів з утеплення будівлі та модернізації інженерних систем із метою приведення у відповідність до сучасних вимог з енергоефективності [1-3].

ПОСТАНОВОЮ КМУ від 29 грудня 2023 р. № 1228-р затверджено ОПЕРАЦІЙНИЙ ПЛАН заходів з реалізації у 2024—2026 роках Довгострокової стратегії термомодернізації будівель на період до 2050 року. Даним ОПЕРАЦІЙНИМ ПЛАНОМ передбачено розробку та затверджено планів реалізації проектів комплексної термомодернізації будівель в рамках середньострокових планів та узгодження довгострокового планування здійснення енергоефективних заходів у будівлях із середньостроковим бюджетним плануванням та виконання місцевих енергетичних планів. Також даним ДОКУМЕНТОМ передбачено формування відкритої бази проектів повторного використання для термомодернізації багатоквартирних житлових будинків та громадських будівель типових серій будівництва та оприлюднення проектної документації щодо здійснення термомодернізації та звітів щодо її верифікації, зокрема щодо проектів термомодернізації будівель типових серій. Згадана ПОСТАНОВА КМУ передбачає визначення механізму стимулювання термомодернізації груп житлових будинків і громадських будівель та модернізації теплових мереж у межах частин міських теплових мереж (“модернізація кварталів”) та для реалізації її передбачено забезпечення співпраці профільних закладів вищої освіти з органами місцевого самоврядування для прийняття обґрунтованих організаційних, інвестиційних рішень на місцевому рівні щодо визначення будівель з найвищим питомим енергоспоживанням та відповідних пріоритетних мікрорайонів для термомодернізації будівель (комплексної реконструкції житлових кварталів/мікрорайонів).

В рамках кафедрального плану виконання науково-дослідницької діяльності виконуються дослідження за даною тематикою. Дане дослідження є продовженням досліджень результати якого представлено в [5].

Задачі дослідження:

1. Ознайомитись з існуючим інженерним досвідом чисельного моделювання теплових потоків в багатошарових будівельних конструкціях.

2. Уточнити методику для моделювання процесів перенесення теплової енергії в ПК «LIRA SAPR» та напрацювати практичний досвід в цьому напрямку.
3. На основі числових моделювань для зовнішньої стіни із силікатної цегляної для житлової багатоповерхової будівлі встановити вплив наявності утеплювача із пінополістиролу та його товщини на:
 - на температуру внутрішньої поверхні зовнішньої огорожувальної стіни;
 - на температуру зовнішньої поверхні зовнішньої огорожувальної стіни;
 - встановити глибину нормативного прогріву стіни.
4. Дослідити на основі числового моделювання, вплив металевих арматурних сіток на картину теплового поля (ізополя поширення теплової енергії) для багатошарової конструкції зовнішньої цегляної стіни;
5. Розробити висновки за результатами числових моделювань перенесення теплової енергії в багатошаровій конструкції зовнішній цегляній стіні;
6. На основі результатів числового моделювання зробити оцінку доцільності та ефективності існуючих практик конструктивного рішення утеплення;
7. Розробити рекомендації щодо конструктивних рішень утеплення зовнішніх цегляних стін житлових та громадських будівель перших масових серій житлової забудови.

В числовому моделюванні процес переносу теплової енергії моделювався для зовнішніх контурів житлової багатоповерхової будівлі, а також деяких інженерно-конструктивних рішень з утеплення зовнішньої оболонки.

Числове моделювання тепломасопереносу виконувалось для слідуючих умов: температура внутрішнього повітря $t_e = 20^\circ \text{C}$; температура найбільш холодної доби $t_z = -23^\circ \text{C}$.

За результатами дослідженнями інтенсивності температурних полів у зовнішній несуче-огорожувальній стіні отримано наступне:

Варіант без утеплювача: температура на внутрішній поверхні стіни $t_e = 13,5^\circ \text{C}$, на зовнішній поверхні стіни $t_z = -20,6^\circ \text{C}$.

Варіант з утеплювачем, товщиною 10,0 см за нормами 2021 р.: температура на внутрішній поверхні стіни $t_e = 18,3^\circ \text{C}$, на зовнішній поверхні стіни $t_z = 9,2^\circ \text{C}$. Прогрів стіни та штукатурки до температури $16,0^\circ \text{C}$ на глибину 13,0 см.

Варіант з утеплювачем, товщиною 15,0 см за нормами 2016 р.: температура на внутрішній поверхні стіни $t_e = 18,8^\circ \text{C}$, на зовнішній поверхні стіни $t_z = 12,0^\circ \text{C}$. Прогрів стіни до температури $16,0^\circ \text{C}$ та штукатурки на глибину 22,0 см.

Варіант з утеплювачем, товщиною 15,0 см за нормами 2021 р.: температура на внутрішній поверхні стіни $t_e = 18,5^\circ \text{C}$, на зовнішній поверхні стіни $t_z = 12,0^\circ \text{C}$. Прогрів стіни та штукатурки до температури $16,0^\circ \text{C}$ на глибину 21,0 см.

Варіант з утеплювачем, товщиною 20,0 см за нормами 2021 р.: температура на внутрішній поверхні стіни $t_e = 19,0^\circ \text{C}$, на зовнішній поверхні стіни $t_z = 13,8^\circ \text{C}$. Прогрів стіни та штукатурки до температури $16,0^\circ \text{C}$ на глибину 31,0 см.

Варіант перебування ділянки з утеплювачем, товщиною 15,0 см за нормами 2021 р. та ділянки без утеплювача. Результати числового моделювання дивись таблицю нижче.

Таблиця 1

Результати числового моделювання поширення температурних полів в багатошарових будівельних конструкціях.

№ варіанту	Характеристика варіанту	Температура внутрішньої поверхні стіни, °C	Температура зовнішньої поверхні стіни, °C	Епюра розподілу теплової енергії по товщині несучо-огороджуючої конструкції	Загальна товщина стіни	Наявність впливу арматурних сіток на температурне поле.
1	Цегляна стіна без утеплювача.	+13.4	-20.5		530	+
2	Те ж з утеплювачем 10 см	+18.3	-22.3		630	-
3	Те ж з утеплювачем 15 см, (ДБН 2016 р.)	+18.8	-22.5		680	-
4	З утеплювачем 15 см	+18.5	-22.5		680	-
5	З утеплювачем 20 см	+19.0	-22.6		730	-
6	Температурні поля на ділянці без утеплювача та по межах з ділянкою з утеплювачем, 15 см.	+13.6; +15.3; +18.1.	-20.54; -22.8/-13.7; -22.6.		530 680	

Для вдалого проведення заходів з підвищення енергетичної ефективності житлових будівель масових серій забудови важливим та складним є визначення пріоритетного напрямку вдосконалення кожного будинку окремо, адже вони є індивідуальними, виходячи з існуючого стану конструктивних особливостей будинків та їх нагальних потреб в термомодернізації [1-2]. Тому заходи з термомодернізації, їх ефективність, також підходи до їх розробки мають бути універсальними, щоб досягти максимального результату термомодернізації для будівель масових серій забудови.

Висновки.

1. Було виконано пошук та ознайомлення з доступною інформацією стосовно досвіду числового моделювання поширення потоків теплової енергії в багатошарових цегляних стінах багатоповерхових житлово-громадських будівель.
2. Уточнено та верифіковано методику виконання числових моделювань розповсюдження теплових потоків в багатошарових цегляних стінах в середовищі програмного комплексу «LIRA SAPR».
3. На основі числового моделювання перенесення теплової енергії в багатошаровій зовнішній цегляній стіні багатоповерхового житлового будинку розташованого в м. Чернігів встановлено наступне:
 - ✓ при відсутності утеплювача, температура внутрішньої поверхні зовнішньої огорожувальної стіни менше мінімально допустимої за вимогами [4];
 - ✓ при відсутності утеплювача, температура зовнішньої поверхні зовнішньої огорожувальної стіни є найменшою за абсолютною величиною, а ніж в розглянутих варіантах з наявністю утеплювача, тобто має місце витрата теплової енергії в навколишнє середовище;
 - ✓ в розглянутих варіантах, з наявністю утеплювача товщиною 10,0; 15,0 та 20,0 см, вся товща цегляної стінки є в зоні з плюсовою температурою;
 - ✓ температура внутрішньої поверхні зовнішньої огорожувальної стіни зростає зі збільшенням товщини утеплювача, та має найбільше значення +19,0 °C при товщині утеплювача 20,0 см;
 - ✓ зовнішня огорожувальна стіна має температуру мін. необхідну за вимогами [10] (+ 16,0 °C) на товщину 13,0 см при утеплювачі товщиною 10,0 см, 23,0 см при утеплювачі товщиною 15,0 см 31,0 см при утеплювачі товщиною 20,0 см,
4. Відчутний вплив на картину теплового поля, армувальні металеві сітки в цегляному муруванні проявляють у випадках, коли ці сітки мають безпосередній контакт з середовищем з від'ємною температурою.
5. При виконанні робіт з капітального ремонту для будівель житлового та громадського призначення оптимальним слід вважати товщину утеплювача 15,0 см, а клас енергетичної ефективності «С».
6. За наявності локальних зон утеплення зовнішньої поверхні будівлі, на ділянках контактних межувань таких ділянок, виникають умови за яких точки «роси» будуть відмінними від системних рішень за наявності або відсутності утеплення.
7. Представлений на сайті «Держенергоефективності» проект повторного використання для термомодернізації будівель перших масових серій житлової забудови розроблений на основі вимог ДБН 2016 р. може задовольняти і вимоги ДБН 2021 р. за умови дотримання вимог п. 5.2.2 [4].

Список використаних джерел:

1. Thermal modernization of housing: first steps. (2015). <https://www.pay.vn.ua/articles/86>.
2. EnergoDIM Program of the Energy Efficiency Fund. (2020). <https://eefund.org.ua/energodim/>.
3. The best way to save on energy and utility bills is to carry out a comprehensive thermal modernization of the house. (2016). <https://saee.gov.ua/news/naikrashhii-sposib-zaoshhaditi-na-energonosiiakh-ta-komunalnix-platezax-provesti-kompleksnu-termomodernizaciiu-budinku> .

4. Ministry of Community and Territorial Development of Ukraine. (2022). Thermal insulation and energy efficiency of buildings: DBN V.2.6-31:2021.
5. Ivanyniuk O. M., Slivinskyi V. V. & Andrukhov V. M. (2024-2025). International scientific and practical Internet conference. Youth in science: research, problems, prospects (MN-2025). <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2025/paper/viewFile/22984/18968>

РОЗРОБКА МОДЕЛІ ПРОГНОЗНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ТА РЕМОНТУ МАШИН І СПЕЦТЕХНІКИ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ТЕЛЕМАТИЧНИХ ДАНИХ

Дмитро Альбещенко, студент¹,

Микола Клименко, к.т.н., доцент ¹ (ORCID: 0000-0002-8263-9400),

¹ Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних сил 31, 03037, Україна

АНОТАЦІЯ. Акцент зроблено на важливості використання сучасних технологічних машин з високим рівнем автоматизації у таких галузях, як промисловість, транспорт, будівництво. Визначено основні обмеження традиційних методів технічного обслуговування, які базуються на регламентних підходах і не враховують динамічні внутрішні та зовнішні фактори, що впливають на технічний стан машин. Запропоновано використання телематичних технологій, які забезпечують безперервний збір, передачу та аналіз даних у режимі реального часу, що дає змогу реалізувати превентивне та прогнозне обслуговування.

Ключові слова: телематичні дані; прогнозне обслуговування; надійність; моніторинг.

Вступ. Одним із найбільш відчутних викликів для України в умовах війни є дефіцит робочої сили. Дефіцит кадрів відчувається у багатьох секторах економіки та є серйозною перешкодою роботи більшості промислових підприємств. Згідно з результатами досліджень «Оцінка ринку праці України 2024-2025» найгостріше кадрову кризу відчувають в промисловій, транспортній, будівельній, енергетичній та аграрній галузях економіки. Використання імпортої техніки та технологічних машин, які мають високий рівень автоматизації, є важливим аспектом для роботи будь-якої з перелічених вище галузей економіки, адже це дозволяє виконувати поставлені завдання з мінімальним втручанням оператора. У світі технологічних машин, що стрімко розвиваються, обслуговування та ремонт є ключовим аспектом, який впливає на безпеку, надійність, а головне – ефективність. Однак традиційні підходи до обслуговування часто не здатні своєчасно виявити потенційні проблеми, що призводить до несподіваних поломок, дорогого ремонту та несвоєчасних простоїв. Активне використання сучасних технологій збору, передачі, обробки та аналітики даних дозволяє впровадити превентивне (попереджувальне) та предикативне (прогнозне) обслуговування.

Мета роботи. Опис телематичних систем та їх ключових елементів, які використовуються в сучасних машинах та спецтехніці. Сценарії застосування даних зібраних телематичною системою. Переваги та недоліки прогностичного обслуговування.

Матеріали і методи. Основними матеріалами для аналізу є науково-технічна та довідкова література, наукові статті.

Виклад основного матеріалу.

Сучасні машини та спецтехніка є складними технологічними механізмами, які об'єднують в собі велику кількість взаємопов'язаних вузлів та компонентів. Кожен з цих елементів потребує постійного моніторингу, а відмова навіть одного з них може привести до зупини машини або виникнення аварійної ситуації.

Традиційні методи технічного обслуговування, засновані на регламентних або планових роботах, в умовах сучасної експлуатації машин і спецтехніки дедалі частіше демонструють свою низьку ефективність, обслуговування виконується за фіксованим графіком, незалежно від реального технічного стану вузлів та агрегатів. Класичні підходи не враховують впливу широкого спектра як внутрішніх (температура технічних рідин, напруження мотогодин, стан фільтрів та якість технічних рідин, навантаження на механізми, стиль управління оператором), так і зовнішніх факторів (кліматичні умови та сезонність, інтенсивність та тривалість робіт, вплив агресивних

середовищ). Внаслідок цього зростають витрати на обслуговування, збільшується кількість аварійних відмов і простоїв, що негативно впливає на продуктивність та безпеку. Саме інтеграція телематичних технологій дозволяє автоматично фіксувати параметри роботи техніки, аналізувати їх зміну в онлайн режимі та формувати рішення щодо технічного стану машини в реальному часі та прогнозувати необхідність технічного обслуговування та/або ремонту.

Телематична система – це сукупність апаратно-програмних засобів збору, передачі та зберігання, аналізу та візуалізації даних техніки.

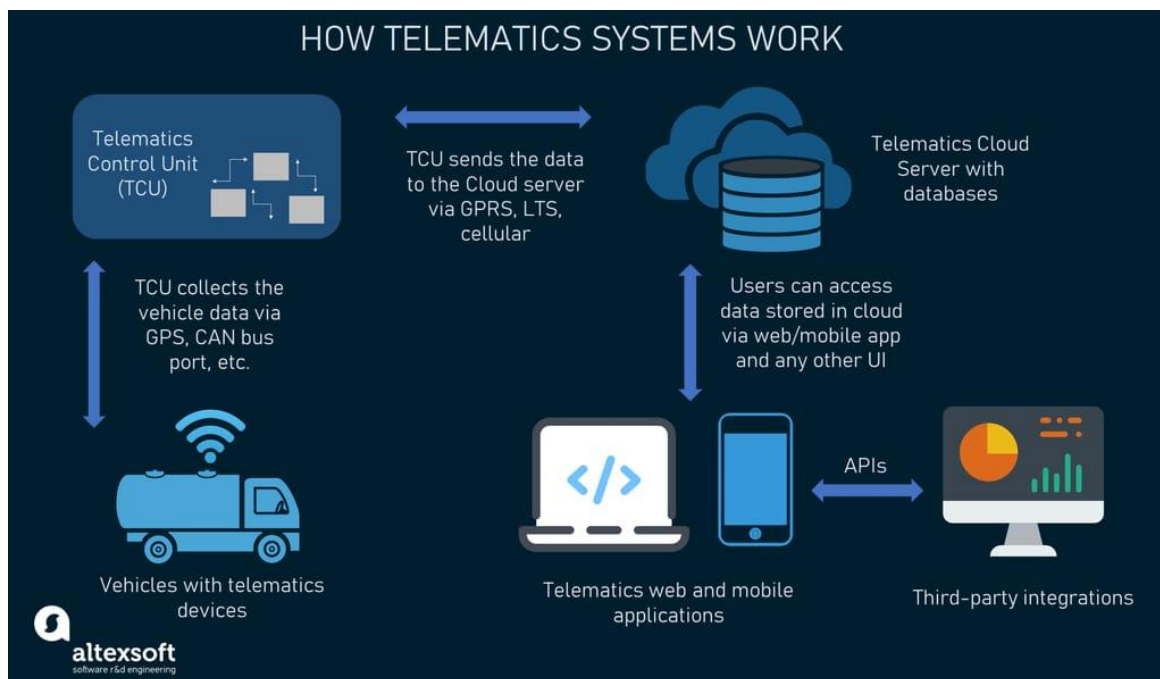


Рис.1. Принцип роботи систем телематики

Телематична система складається з наступних ключових елементів:

1) Telematics Control Unit (термінал) – це пристрій для збору даних вбудований до внутрішньої цифрової мережі машини. Він отримує ключову інформацію напряму:

- безпосередньо з датчиків (наприклад, тиску, температури, пального);
- від електронних блоків керування вузлами машини (двигуном, гальмівною системою, трансмісією тощо).

Сучасні термінали в своїй більшості містять наступні елементи:

- вбудований GPS-приймач – для визначення координат і маршруту руху;
- SIM-картку (фізичну або eSIM) – для мобільного зв'язку;
- GPRS/4G/5G/LTE-модуль – для передачі даних у хмару через мобільну мережу.

2) Хмарний сервер телематичної системи – це ключова ланка в архітектурі телематичних систем що забезпечує обробку, зберігання, аналітику та надання користувачам доступу до даних, які надходять у режимі реального часу з терміналів встановлених на техніці. Така інфраструктура є основою для впровадження систем моніторингу, прогнозової аналітики технічного обслуговування та контролю експлуатаційних процесів. Більшість хмарних сервісів розподілені на ключові блоки:

- серверна частина (бекенд) – відповідає за приймання даних від телематичних пристроїв та виконує базову перевірку, фільтрацію й підготовку даних до обробки;
- база даних – забезпечує зберігання як поточних параметрів, так і історичних телематичних даних, необхідних для аналізу тенденцій у динаміці, порівняння ефективності та підготовки звітів;

- аналітичний модуль – реалізує функції обробки, агрегації та аналізу даних, формує інформативні звіти, дозволяє виявляти відхилення, закономірності та будувати прогнозні моделі;
- API-шлюз – забезпечує інтеграцію телематичної платформи з іншими цифровими системами, такими як CRM, ERP, бухгалтерськими програмами та системами керування автопарком.

3) Інтерфейси взаємодії з кінцевим користувачем є фінальним компонентом телематичної системи, які забезпечують оперативний доступ до даних, візуалізацію інформації, керування параметрами системи та прийняття рішень у режимі реального часу. Доступ реалізується через вебпортали або мобільні застосунки. Вебпортал є основним інструментом для операторів, інженерів з технічного обслуговування та керівників підприємств та надає користувачу доступ до перегляду поточного розташування техніки в реальному часі, аналізу роботи та отримання сповіщень. Для зручності дані зазвичай формуються в автоматизовані звіти. Мобільний застосунок орієнтований на експлуатантів або сервісних працівників та надає доступ до завдань, пуш-сповіщень та двостороннього зв'язку з сервісом. Автоматичні сповіщення та звіти, які надсилаються користувачу у випадку настання певних подій.

Телематичні системи знаходять широке застосування і одним з найпоширеніших сценаріїв їх застосування є моніторинг роботи, управління техніком та звісно прогнозним технічним обслуговуванням.

Обговорення. Впровадження телематичних систем у сучасні машини та спецтехніку відкриває нові можливості для підвищення ефективності експлуатації, зниження витрат на технічне обслуговування і покращення безпеки. Завдяки автоматичному збору та аналізу даних у режимі реального часу, сервісні служби отримують інструменти для превентивного та прогнозного обслуговування, що дозволяє уникнути аварійних ситуацій та зменшити простої техніки. Однак, впровадження таких систем потребує комплексного підходу до вибору даних, котрі враховують вплив зовнішніх і внутрішніх факторів та впливають на технічний стан машини, та розробки зручних користувальцьких інтерфейсів.

Висновок. Телематичні системи є майбутнім цифрової трансформації промисловості в Україні, особливо в умовах гострого дефіциту кваліфікованої робочої сили. Вони дозволяють здійснювати безперервний моніторинг технічного стану машин, своєчасно виявляти відхилення та предикативно планувати технічне обслуговування з можливими ремонтами. Впровадження таких систем є перспективним напрямом розвитку для підприємств різних галузей, які прагнуть оптимізувати робочі процеси і забезпечити стабільність виробництва в складних умовах. Для максимальної ефективності необхідно враховувати особливості конкретного завдання, забезпечувати надійність каналів зв'язку, а також створювати зручні і функціональні інтерфейси для кінцевих користувачів.

Список використаних джерел:

1. Мінекономіки України. Оцінка ринку праці України 2024–2025: аналітичний звіт [Електронний ресурс]. – Київ, 2024. – Режим доступу: <https://www.me.gov.ua/>
2. Telematics Explained – What Is Telematics and How Does It Work? [Електронний ресурс]. – Geotab, 2023. – Режим доступу: <https://www.geotab.com/blog/what-is-telematics>
3. Telematics Systems: How Streaming Data Is Used in Transportation [Електронний ресурс]. – AltexSoft, 2021. - Режим доступу: [Telematics Systems and Streaming Data in Transportation](#)
4. Harnessing data to optimize maintenance [Електронний ресурс]. – Equipment journal, 2024 – Режим доступу: [Harnessing data to optimize maintenance - Equipment Journal](#)

СЕКЦІЯ 4

«ВИКОРИСТАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ ТА ЕНЕРГООЩАДНИХ ТЕХНОЛОГІЙ В ПРОЦЕСАХ ОБРОБКИ ТА СТВОРЕННЯ МАТЕРІАЛІВ»

ОЦІНКА КОНСТРУКЦІЇ РОБОЧИХ ОРГАНІВ ВЕРТИКАЛЬНИХ ВАЛКОВИХ МЛИНІВ ДЛЯ ПОМЕЛУ ЦЕМЕНТІВ ТА ГРАНУЛЬОВАНИХ ШЛАКІВ

Микола Клименко, к.т.н., доцент ¹ (ORCID: 0000-0002-6166-8966),

Василь Марач, аспірант ¹ (ORCID: 0009-0003-9457-6042),

Михайло Губчик, аспірант ¹ (ORCID: 0009-0008-4760-3884),

¹ Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних сил 31, 03037, Україна

АНОТАЦІЯ. здійснено техніко-аналітичне дослідження конструктивної будови та принципів роботи вертикальних валкових млинів, призначених для високоефективного тонкого помелу портландцементу й гранульованих доменних шлаків. Детально проаналізовано функціональне навантаження та інженерно-конструкційні параметри ключових вузлів млинового агрегату, зокрема помольних валків, робочого (помольного) столу, приводних систем, а також механізмів, що забезпечують динамічне регулювання процесу подрібнення й стабілізацію режимів роботи. Особливу увагу приділено еволюції технічних рішень у сфері проєктування млинів, які формувались у відповідь на потребу зростання питомої продуктивності, енергоефективності, технологічної стабільності та зниження експлуатаційних витрат обладнання. У контексті вдосконалення конструкцій розглянуто сучасні інженерні підходи, орієнтовані на забезпечення рівномірного розподілу навантаження по помольній зоні, інтенсифікацію дробильно-стирання дії валків, а також підвищення ресурсу зносостійких елементів. Проведено порівняльну оцінку ефективності роботи вертикальних валкових млинів у зіставленні з традиційними типами помольного обладнання (наприклад, кульовими млинами), з акцентуванням на їх перевагах у сучасних технологічних схемах виробництва цементу та шлакових в'язучих, включаючи зниження питомих витрат енергії, підвищення рівня автоматизації процесу та екологічну доцільність застосування..

Ключові слова: вертикальні валкові млини, гранульований шлак, продуктивність, енергоефективність.

Вступ. Вертикальні валкові млини являють собою складні високотехнологічні агрегати, що є основою сучасних технологічних процесів у цементній, гірничодобувній, металургійній та енергетичній галузях. Завдяки своїм функціональним можливостям і високій ефективності, вони широко застосовуються для інтенсивного подрібнення твердих сипких матеріалів різної природи, серед яких особливе місце займають гранульовані доменні шлаки. У виробництві цементу вертикальні валкові млини стали базовими одиницями технологічного обладнання, оскільки шлакові цемента, виготовлені з їх використанням, демонструють підвищені міцнісні характеристики, високу стійкість до хімічно агресивних середовищ, знижену усадку та підвищену довговічність, що робить їх незамінними у сучасному будівництві, особливо при реалізації проєктів з підвищеними експлуатаційними вимогами.

На сучасному етапі розвитку будівельної індустрії спостерігається стійка тенденція до зростання вимог щодо енергоефективності та ресурсоощадності виробничих процесів, зокрема на етапі фінішного подрібнення цементного клінкеру та вторинної переробки гранульованих шлаків. У зв'язку з цим одним із ключових векторів наукових досліджень і технічного вдосконалення є модернізація конструкцій помольного обладнання, здатного забезпечувати підвищені техніко-економічні показники, зокрема високу питому продуктивність при мінімальному питомому енергоспоживанні. Енергоощадність процесу тонкого помелу є критичним фактором у зниженні собівартості продукції та досягненні стратегічних цілей декарбонізації промисловості.

Зростання одиничної потужності помольних агрегатів, розширення номенклатури сировинних матеріалів та ускладнення умов експлуатації обумовлюють необхідність переходу до нових принципів конструювання робочих елементів млина - таких як помельні ролики, шліфувальний стіл, напрямні та сепараційні пристрої. Сучасні дослідження зосереджуються на оптимізації геометрії елементів зони подрібнення, поліпшенні кінематичних схем та вдосконаленні приводних

механізмів. У цьому контексті зростає значення інтеграції цифрових технологій, включно з інтелектуальними системами управління, які забезпечують адаптивну оптимізацію режимів роботи залежно від властивостей матеріалу та стану обладнання.

Умови експлуатації робочих органів млина характеризуються значним абразивним і ударним навантаженням, що веде до інтенсивного зношування поверхонь контакту. Це зумовлює жорсткі вимоги до матеріалів конструктивних елементів, насамперед у частині забезпечення їх високої зносостійкості, термостабільності та тривалої надійності. Одним із пріоритетних завдань сучасного машинобудування є впровадження інженерних рішень із застосуванням високолегованих сталей, композиційних зносостійких сплавів, поверхнево-зміцнених шарів та інноваційних антикорозійних і протиерозійних покриттів. Водночас актуальною проблемою залишається вібраційна дестабілізація роботи млина, яка може знижувати експлуатаційний ресурс обладнання, викликати розбалансування та порушення рівномірності процесу помелу. У зв'язку з цим розробка віброізолюючих систем, демпферних компонентів і конструктивних заходів щодо мінімізації динамічних навантажень набуває особливого значення.

Аналіз літературних джерел. Сучасні вертикальні валкові млини, що активно застосовуються з початку XX століття, зарекомендували себе як високоефективне обладнання для подрібнення та одночасної сушки широкого спектра матеріалів - від цементної сировини та вугілля до фосфатів і металургійних шлаків. Їхня універсальність обумовлена можливістю обробки як м'яких, так і високоабразивних матеріалів.

На відміну від кульових млинів, вертикальні валкові млини забезпечують зниження енерговитрат на 25–35% залежно від властивостей сировини [1], що робить їх особливо актуальними в умовах зростання енергетичних витрат, обмеженості водних ресурсів і посилення екологічних стандартів. Дослідження, проведені Bouchard J. [2] та іншими авторами, підкреслюють переваги технології сухого помелу у вертикальних валкових млинах, що поєднує енергоефективність із високою продуктивністю. Проблематика зношування є ключовою в забезпеченні довговічності млина. Lucas R.D. Jensen та співавтори [3] здійснили комплексний аналіз механізмів зношування зносостійких елементів вертикальних валкових млинів, використовуючи прозорі моделі валків і столів. Основним механізмом виявлено двокорпусне абразивне стирання в зонах інтенсивного навантаження, що призводить до глибоких мікротріщин і відшарування поверхневих шарів.

Jung O. у своїй роботі [4] акцентує увагу на важливості правильного вибору зносостійких матеріалів (наприклад, легованого чавуну), оптимізації геометрії деталей і зменшенні вмісту абразивних домішок, що дозволяє суттєво подовжити ресурс елементів, що зношуються. Аналогічно, дослідження Kalyagina N. [5] показало, що перевищення граничних циклічних напружень через знос і зміщення валкових секторів призводить до накопичення втомних пошкоджень, тріщиноутворення та зниження надійності вузлів.

Вивчення динаміки подрібнення у вертикальних валкових млинах за допомогою моделей балансу завантаження (Maruf Hasan, Sam Palaniandy) [6] показало залежність функцій вибору та руйнування часток від розміру середовища, швидкості обертання і концентрації твердої фази. Встановлено, що підвищення швидкості обертання і зменшення розміру середовища сприяють покращенню якості помелу.

Мета роботи. Вдосконалення конструкцій вертикальних валкових млинів для підвищення ефективності помелу цементу та шлаків шляхом оптимізації робочих органів і зниження енерговитрат.

Матеріали і методи. Основними матеріалами для аналізу є науково-технічна та довідкова література про вітчизняні та зарубіжні зразки сучасного дробильного обладнання. Основними методами, що використовуються в роботі є використання розрахунків на основі математичних залежностей та аналітичної механіки.

Виклад основного матеріалу. Як відомо, процес помелу у вертикальних валкових млинах базується на поєднанні механізмів стиснення та зсуву в шарі оброблюваного матеріалу, що знаходиться між робочими елементами. При цьому реалізується багатofакторний вплив контактних напружень, який призводить до утворення мікротріщин у структурі зерен матеріалу. Такий підхід

забезпечує ефективну передачу механічної енергії до об'єкта подрібнення і, як наслідок, значно підвищує енергетичну ефективність процесу в порівнянні з традиційними барабанными млинами, в яких реалізується переважно ударне подрібнення.

На рисунку 1 наведено узагальнені принципові схеми конструктивного виконання та просторового взаємного розташування основних помольних елементів середньохідних вертикальних валкових млинів. Конструктивні особливості таких млинів можуть суттєво варіюватися залежно від виробника обладнання. Зокрема, мають місце відмінності у геометричних параметрах і конфігурації помольного (поротного) столу, конструкції і кількості валків (роликів), а також у типах пристроїв, що забезпечують необхідне притискне зусилля між роликами та столом - гідравлічні, пневматичні або комбіновані механізми.

Основними елементами розмелювального вузла (див. рис. 1) є обертовий помольний стіл 2, поверхня якого зазвичай захищена зносостійким бронюванням 3, та ролики 1 або сферичні тіла кочення (кулі) 7, які здійснюють обертальний або кочувальний рух по робочій поверхні столу. Орієнтація поверхні помольного столу й роликів може бути різною залежно від конструктивної схеми млина: горизонтальною (рис. 1, а, г, д, е), похилою з малим кутом нахилу (рис. 1, б) або круто похилою (рис. 1, в). Крім того, спостерігається варіативність геометрії контактної поверхні помольних тіл: вона може бути гладкою (рис. 1, а, б, в, д) або мати тороїдальний профіль (рис. 1, е), що впливає на умови розподілу тиску та інтенсивність зношування. Найбільш поширеною є плоска або слабопохилена поверхня з радіальними канавками або проточками, які сприяють рівномірному розподілу матеріалу під роликами. У крутопохилих столах (рис. 1, в) досягається додаткове гравітаційне прискорення транспортування продукту до периферії, що покращує умови сепарації. Тороїдальна форма столу забезпечує підвищений контактний тиск у центральній зоні, що може бути доцільно при необхідності інтенсивного подрібнення жорстких частинок.

Для забезпечення транспортування продукту помелу та підтримання необхідних аеродинамічних умов у зоні подрібнення передбачена подача повітря. Повітря подається крізь напрямні сопла 4, які можуть бути встановлені як на стаціонарному корпусі 5 млина (рис. 1, а, б, в, г, е), так і безпосередньо інтегровані у конструкцію обертового помольного столу 2. Така конфігурація сприяє інтенсифікації процесу сепарації матеріалу та його виносу з робочої зони, що є важливою умовою ефективного функціонування вертикального валкового млина.

Конструктивна різноманітність роликів і помольних столів у вертикальних валкових млинах зумовлена як технічними вимогами до процесу подрібнення, так і прагненням виробників оптимізувати ресурсозбереження, зносостійкість і ефективність роботи агрегатів. Ролики (або валки) можуть мати циліндричну, конічну, сферичну або тороїдальну форму, що визначає характер їх контакту з помольним столом і відповідно впливає на розподіл навантаження в зоні подрібнення.

Циліндричні ролики забезпечують рівномірний контакт з плоскою поверхнею столу, що є характерним для стандартних конфігурацій млинів. У таких системах досягається стабільний процес стиснення шару матеріалу. Конічні ролики застосовуються для компенсації зсувних зусиль і покращення сходження подрібненого матеріалу до зони подачі повітря або сепарації. Сферичні та тороїдальні ролики (рис. 2, е) забезпечують змінний контактний тиск, що дозволяє більш гнучко регулювати глибину проникнення ролика в шар матеріалу, особливо при обробці матеріалів з різними механічними характеристиками (цементний клінкер, гранульований шлак тощо).

Поверхня роликів може бути як гладкою, так і профільованою (рифленою, зубчастою або канавчастою). Профілювання дозволяє покращити умови захоплення і транспортування матеріалу у зоні подрібнення, а також зменшує ймовірність його ковзання між робочими поверхнями. У деяких модифікаціях передбачено використання знімних бронепластин або сегментних зносостійких накладок, що значно полегшує обслуговування і ремонт.

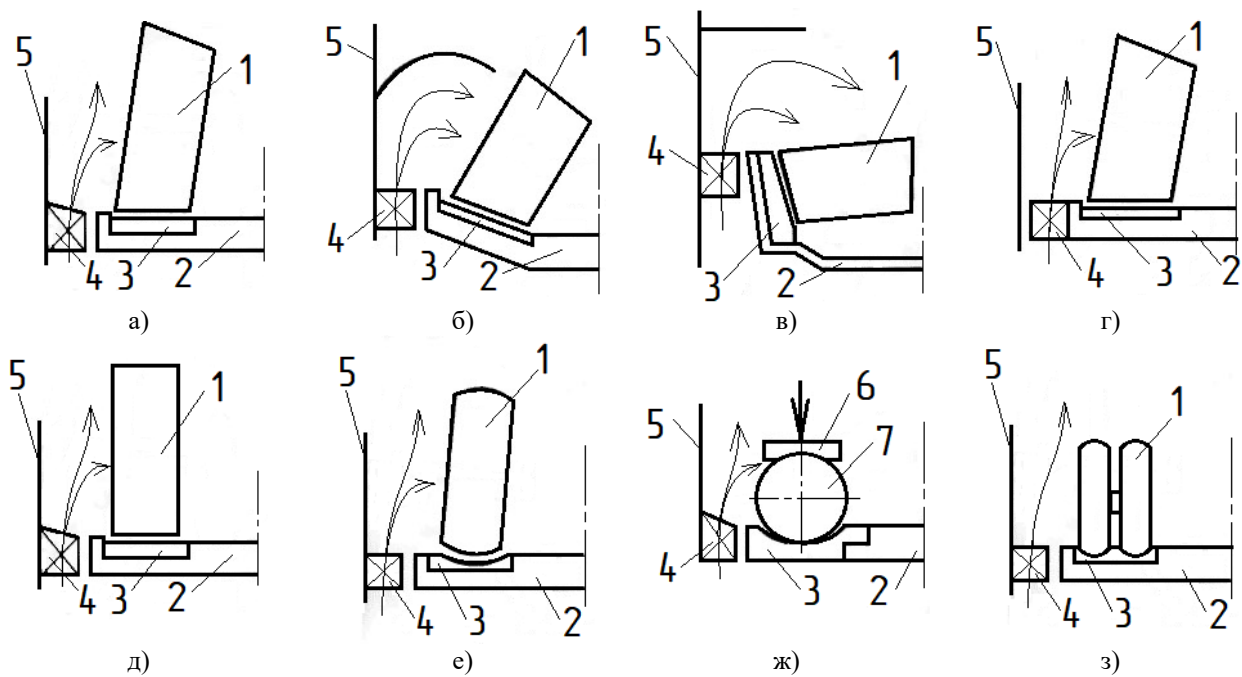


Рис. 1. Основні схеми розташування робочих елементів у вертикальних валкових млинах:

1 – валок; 2 – помольний стіл; 3 – бронеплита; 4 – пристрій подачі повітря; 5 – корпус млина; 6 - напірне кільце; 7 – кулі.

Матеріал виготовлення столу та роликів, як правило, представлений високолегованими сталями з нанесеним зносостійким напиленням або наплавним покриттям. Це дозволяє забезпечити необхідну зносостійкість при високих питомих навантаженнях і абразивному зношуванню в умовах безперервної експлуатації.

Окремо слід зазначити, що в сучасних млинах застосовуються як фіксовані, так і плаваючі конструкції роликів, які дозволяють компенсувати нерівномірність навантаження та адаптуватися до змінних властивостей матеріалу, що подрібнюється. Гідравлічні системи натискання роликів можуть включати датчики тиску і автоматизовані приводи, що дає змогу підтримувати оптимальні параметри подрібнення в реальному часі.

Таким чином, сучасні конструктивні рішення у проектуванні роликів і помольних столів вертикальних валкових млинів є результатом глибокого інженерного аналізу та врахування особливостей оброблюваних матеріалів, що забезпечує не лише ефективність помелу, а й довговічність та надійність експлуатації обладнання.

Таблиця 1 ілюструє сучасні підходи до інженерного проектування млинів для тонкого помелу цементу та шлаків. Використання різних конфігурацій та технічних рішень дає змогу адаптувати млини до специфіки вихідної сировини, необхідної продуктивності, енергоефективності та цільової дисперсності продукту.

Сучасні вертикальні валкові млини для помелу цементу та гранульованих доменних шлаків комплектуються високотехнологічними комплексами автоматизованого керування, в основі яких лежить застосування алгоритмів штучного інтелекту та передових методів машинного навчання. Ці інтелектуальні системи забезпечують інтеграцію з технологічним процесом на рівні цифрового виробництва (Industry 4.0) та дозволяють в режимі реального часу проводити глибоку аналітику експлуатаційних даних, адаптивно регулюючи робочі параметри обладнання. Зокрема, такі системи дають змогу оперативно змінювати тиск на валки, швидкість обертання столу, температуру і витрати повітря, виходячи з властивостей сировини та поточних умов помелу, що сприяє досягненню максимальної продуктивності, підвищенню енергоефективності та забезпеченню стабільної якості готового продукту.

Конструктивні підходи, які реалізуються у новітніх моделях млинів, базуються на принципах екологічної стійкості та енергозбереження. Особлива увага приділяється зниженню питомого енергоспоживання під час подрібнення та мінімізації вуглецевого сліду шляхом впровадження

інноваційних теплотехнічних рішень. Зокрема, використання систем рекуперації теплоти з технологічного газового потоку дозволяє істотно зменшити енергетичні втрати та оптимізувати тепловий баланс млина. Конструкції корпусу млина вдосконалюються з урахуванням вимог до шумо- та віброзахисту, що досягається шляхом застосування багатошарових віброізоляційних елементів та демпфувальних структур. Такі технічні рішення розширюють сферу використання млинів у межах урбанізованих чи екологічно чутливих територій.

Таблиця 1 – Типові конструктивні конфігурації вертикальних валкових млинів провідних виробників

Виробник	Модель (серія)	Кількість роликів	Тип роликів	Тип помольного столу	Система натискання	Діаметр столу, мм	Особливості конструкції
LOESCHE (Німеччина)	LM 46.2+2C / LM 56.3+3C	2 + 2 або 3 + 3	Конічні / тороїдальні	Горизонталь- ний з канавками	Гідравлічна	до 5600	Можливість подвійного режиму роботи: основні + допоміжні ролики
Gebr. Pfeiffer (Німеччина)	MVR 5000 C-4 / MVR 6000 C-6	4 або 6	Циліндричні / сферичні	Похилений з бронюванням	Механо- гідравлічна	до 6000	Незалежні приводи для кожного ролика, активне регулювання навантаження
FLSmidth (Данія)	OK™ 42-4 / OK™ 56-6	4 або 6	Сферичні	Гладкий, горизонтальний	Гідравлічна	до 5600	Висока енергоефективність, інтегрована сепарація матеріалу
Ube Machinery (Японія)	UM43.6 / UM48.4	4	Циліндричні	Радіально рифлений	Гідравлічна	до 4800	Комбінований привід столу, зміщений центр подачі матеріалу
ThyssenKrupp Polysius (Німеччина)	QUADROPOL QMC ²	4	Конічні	Тороїдальна поверхня	Електро- гідравлічна	до 5000	Роздільне регулювання кожного ролика, мінімізоване зношування

Додатковою перевагою є модульність конструкції, яка передбачає стандартизоване компонування вузлів та робочих елементів. Це значно спрощує технічне обслуговування, скорочує час простою агрегату під час ремонту або профілактики та забезпечує гнучке переналаштування обладнання під конкретні характеристики оброблюваного матеріалу - такі як твердість, абразивність, вологість чи гранулометричний склад.

З огляду на зростаючі технологічні вимоги, особливо у процесах помелу високотвердої та абразивної сировини, були кардинально переглянуті принципи навантаження валків. Традиційні пружинні системи, які створювали симетричне зусилля на обидва валки одночасно, виявилися недостатніми за рівнем точності та адаптивності. Натомість, сучасні млини оснащуються незалежними гідравлічними приводами, які дозволяють індивідуально налаштовувати зусилля притискання кожного валка окремо. Це відкриває можливості точного узгодження параметрів тиску з поточними властивостями подрібнюваного матеріалу та покращує ефективність подрібнення.

Перехід від м'яких, легкопомольних матеріалів (зокрема вугілля) до високоміцних та абразивних компонентів, як-от гранульовані шлаки, зумовив істотне зростання навантажень у зоні помелу, що відповідно призвело до прискореного зношування функціональних елементів, передусім поверхонь валків та помольного столу. Якщо при подрібненні вугілля була достатньою твердість поверхні валків на рівні HRC 52 за хвилястості 2,5–3 мм і товщини зносостійкого шару близько 6,5 мм, то для обробки шлаків потрібні нові підходи до вибору матеріалів та методів поверхневого зміцнення. У відповідь на ці виклики впроваджуються прогресивні технології наплавлення та облицювання, які забезпечують значне підвищення зносостійкості та

термостійкості, зокрема шляхом використання хромо-молібденових сплавів, карбідів та наноструктурованих покриттів.

За умов інтенсивного абразивного зношування, особливо при подрібненні матеріалів з підвищеним вмістом кремнезему, доменного гранульованого шлаку, а також інших твердих мінеральних включень, робочі елементи вертикального валкового млина зазнають суттєвих механічних та контактних навантажень. Зокрема, поверхні валків, що виконують функцію основних подрібнювальних органів, перебувають під постійним впливом зношувальних факторів, що призводить до поступової втрати геометричних параметрів і технологічної ефективності процесу подрібнення. Надмірний знос обмежує глибину подрібнення сировини, викликає нерівномірність процесу та суттєво підвищує питомі витрати електроенергії, що безпосередньо впливає на собівартість готової продукції та загальні експлуатаційні витрати підприємства.

Окрему увагу необхідно зосередити на стані футерувальних плит помольного столу (рис. 2), які відіграють критичну роль у забезпеченні стабільності роботи вузла подрібнення. Їх зношування або механічна деградація призводять до порушення рівномірності розподілу навантаження, що викликає збільшення вібраційних коливань у всій системі млина. Таке підвищене динамічне навантаження спричиняє додаткове навантаження на підшипники, редуктори, гідравлічні системи та інші ключові вузли, істотно знижуючи загальний експлуатаційний ресурс обладнання й збільшуючи частоту ремонтних втручань.



Рис.2. Характер зношування поверхні помольного столу

Таким чином, інтенсивне зношування робочих органів вертикальних валкових млинів - зокрема, валків і поверхні помольного столу - слід розглядати як один з провідних факторів, що визначають експлуатаційну ефективність, технологічну надійність та готовність млина до стабільної роботи в умовах промислового навантаження. Робоче середовище цих елементів характеризується комбінованою дією абразивного зносу, значних контактних напружень, локальних термічних впливів та періодичних ударних навантажень. Це вимагає використання сучасних зносостійких матеріалів, оптимізації конструкції з урахуванням умов теплового і механічного навантаження, а також впровадження систем моніторингу технічного стану для прогнозування залишкового ресурсу й мінімізації аварійних зупинок.

Обговорення. Як бачимо, вертикальні валкові млини виявляють значний потенціал для подальшого вдосконалення, зумовлений їхньою підвищеною енергоефективністю, екологічною безпечністю та універсальністю щодо переробки широкого спектра подрібнюваних матеріалів, зокрема цементної сировини та гранульованих доменних шлаків. Високий рівень адаптивності цих млинів до змін фізико-механічних властивостей матеріалу забезпечується завдяки впровадженню сучасних засобів автоматизації та інтелектуальних систем управління технологічними параметрами процесу помелу. Застосування цифрового моніторингу та систем регулювання дозволяє гнучко змінювати робочі режими, оптимізуючи енергоспоживання та мінімізуючи негативний техногенний вплив на навколишнє середовище.

Висновки. Використання інноваційних конструкційних матеріалів, зокрема високозносостійких легованих сплавів, жароміцних композицій та матеріалів, у поєднанні з модульною архітектурою вузлів млина сприяє істотному підвищенню загальної експлуатаційної надійності обладнання. Такий підхід дозволяє спростити процедури технічного обслуговування, скоротити тривалість і трудомісткість ремонтних операцій, а також знизити витрати на проведення регламентних і відновлювальних робіт.

Завдяки високій технологічній адаптивності, зниженому рівню експлуатаційних витрат, тривалому ресурсу основних конструктивних елементів та здатності до безперервної роботи в умовах інтенсивного навантаження, вертикальні валкові млини займають стратегічно важливе місце як базове технологічне обладнання в цементній, металургійній та вугільній галузях промисловості. Їх широке впровадження забезпечує стабільне, ефективне й енергоощадне здійснення процесів тонкодисперсного помелу матеріалів, що особливо актуально в умовах зростання вимог до якості продукції та підвищення енергоекономічної ефективності виробництва.

Список використаних джерел:

1. Schaefer H.V. (2001). Loesche vertical roller mills for the comminution of ores and minerals, *Minerals Engineering*, 14, 10, 1155-1160.
2. Bouchard, J, et al. (2019). Breaking Down Energy Consumption in Industry Grinding Mills.. 4, s.l.: CIM Journal, Vol. 10, pp. 157-164.
3. Lucas R.D. Jensen, Erling Fundal, Per Møller. (2011). Wear mechanism of abrasion resistant wear parts in raw material vertical roller mills/ *Wear* 271. 2707-2719
4. Jung O. (2000). Wear protection in vertical roller mills. *ZKG International*;31(9):252–261.
5. Kalyagina N.V., et al. (2020). *Journal of Engineering Researches*;21(3):181–188.
6. Maruf Hasan, Sam Palaniandy, Marko Hilden, Malcolm Powell (2017) Calculating breakage parameters of a batch vertical stirred mill. *Minerals Engineering* 111 229–237.

ВДОСКОНАЛЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ МАШИН ДЛЯ УЩІЛЬНЕННЯ БУДІВЕЛЬНИХ СУМІШЕЙ

Володимир Слюсар, асистент ¹ (ORCID: 0000-0003-4332-3144),

¹ Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних сил 31, 03037, Україна

АНОТАЦІЯ. У роботі досліджено енергоефективність ущільнення будівельних сумішей із використанням вібраційних технологій. Проведено аналіз конструкцій та параметрів вібраційних і безвібраційних машин, обґрунтовано перевагу перших за критерієм енергоспоживання. Розроблено аналітичну модель системи «вібромайданчик – бетонна суміш», яка враховує кінематичну невизначеність та сили опору середовища. Отримано рівняння руху з чотирма складовими, що характеризують власні та вимушені коливання. Експериментальні дослідження на спеціально спроектованій установці дозволили зафіксувати віброграми в різних режимах роботи. Порівняння з теоретичними розрахунками підтвердило адекватність моделі з похибкою в межах 10–15%. Наведено графіки та формули для визначення амплітуди, частоти та енергії коливань. Запропоновано алгоритми розрахунку раціональних режимів ущільнення для бетонних сумішей різного складу з мінімізацією енерговитрат.

Ключові слова: вібраційна машина; бетонна суміш; вдосконалення; енергетичні показники; дискретна модель; континуальна модель; рівняння руху; режими; параметри; амплітуда; частота; потужність; критерії; розрахунки; методика; алгоритм.

Вступ. Сучасні вимоги будівельної галузі потребують забезпечення мінімізації витрат енергії із реалізацією високої якості виконання технологічного процесу при формуванні бетонних та залізобетонних виробів. Основною умовою забезпечення ефективних режимів і параметрів є застосування розрахункових моделей, які адекватно відображають реальний процес вібраційного ущільнення, який найбільше використовується в заводській практиці виготовлення виробів. Разом з тим, на практиці повне досягнення такої умови не досягається внаслідок розбіжностей розрахункових і реальних параметрів та значних витрат енергії на протікання технологічного процесу. Обумовлено це складністю процесів, що протікають в ущільнюючій суміші та вимушеного

застосування, як наслідок, емпіричних формул, які не відображають закономірностей і при застосуванні є достовірними виключно в рамках тих передумов і допущень за яких здійснені такі дослідження. Одним із напрямків вирішення проблеми є дослідження енергетики процесів ущільнення на основі застосування дискретно–континуальних моделей для аналізу та синтезу та розглядом спільного цілого направлено руху вібраційної системи. Такий підхід відкриває можливості встановити закономірності руху вібраційної системи, запропонувати вдосконалені рішення із забезпеченням наперед заданих раціональних режимів і параметрів та мінімізації енергетичних витрат.

Аналіз літературних джерел. В роботі [1] приведені методика та аналітичні залежності для різного класу вібраційної техніки. В розвиток цієї роботи виконані дослідження системи: «вібромайданчик – бетонна суміш» [2,3]. Дані дослідження є продовженням згаданих робіт, метою яких є визначення раціональних параметрів та енергетичних показників, використання яких забезпечить мінімізацію витрат енергії на процеси ущільнення та підвищення якості бетонних сумішей при формуванні бетонних та залізобетонних виробів.

Мета роботи. Встановлення енергетичних показників, використання яких забезпечить мінімізацію витрат енергії на процеси ущільнення та підвищення якості бетонних та залізобетонних виробів.

Матеріали і методи. Основними матеріалами для аналізу є науково-технічна та довідкова література про вітчизняні та зарубіжні зразки сучасного вібраційного обладнання. Основними методами, що використовуються в роботі є використання розрахунків на основі математичних залежностей та аналітичної механіки. Для виконання розрахунків та побудови графіків використовується програмне забезпечення jupyter lab.

Виклад основного матеріалу. Аналітичне дослідження системи «вібромайданчик – бетонна суміш», здійснено для дискретної системи без урахування сили опору ущільнюючого середовища (1) так і із урахуванням сил опору (2). Рівняння руху дискретної системи (1) і (2) включає чотири складові: два доданки, що описують власні коливання, третій – супутні коливання від початкового руху, а четвертий – вимушені коливання за законом зміни зовнішньої сили:

$$x(t) = x_0 \cos \omega_0 t + \frac{\dot{x}_0}{\omega_0} \sin \omega_0 t - \frac{F_0}{m(\omega_0^2 - \omega^2)} \cos \omega_0 t + \frac{F_0}{m(\omega_0^2 - \omega^2)} \cos \omega t, \quad (1)$$

Рух вібраційної системи «машина-середовище» із урахуванням сил опору (2)

$$x(t) = e^{-ht} \left(x_0 \cos \omega_1 t + \frac{x_0 h + \dot{x}_0}{\omega_1} \sin \omega_1 t \right) - \frac{F_0 e^{-ht}}{m \left[(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4h^2 k_0^2 \right]} \times \\ \times \left[(\omega_0^2 - \omega^2) \cos \omega_1 t + \frac{h}{\omega_1} (\omega_0^2 + \omega^2) \sin \omega_1 t \right] + \frac{F_0 \cos(\omega t - \varphi)}{m \sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4h^2 \omega^2}}. \quad (2)$$

В результаті теоретичних досліджень дискретно – континуальної системи «вібромайданчик – бетонна суміш», отримано формулу (3) для визначення амплітуди коливань з урахуванням реактивної та активної складових опору(4), а також формула (5) для визначення енергії, що витрачається на ущільнення бетонної суміші:

$$X_0 = \frac{F_0}{\sqrt{\left[(C_e - m_e \omega^2) - m_e \omega^2 a_1 \right]^2 + (m_e \omega^2 d_1)^2}} \quad (3)$$

де a_1, d_1 - коефіцієнтів опору ущільнюючого середовища:

$$a_1 = \frac{\alpha sh 2\alpha h + \beta \sin 2\beta h}{h(\alpha^2 + \beta^2)(ch 2\alpha h + \cos 2\beta h)}; d_1 = \frac{\alpha \sin 2\beta h - \beta sh 2\alpha h}{h(\alpha^2 + \beta^2)(ch 2\alpha h + \cos 2\beta h)}. \quad (4)$$

$$E_k = \pi m_0 x_0^2 \omega^3 \left[\frac{\alpha \sin 2\beta h - \beta \operatorname{sh} 2\alpha h}{h(\alpha^2 + \beta^2)(\operatorname{ch} 2\alpha h + \cos 2\beta h)} \right] \quad (5)$$

Встановлено, що амплітуда коливань (рис.1) залежить від коефіцієнтів опору (рис.2) ущільнюючого середовища, а також енергії, що витрачається на ущільнення бетонної суміші

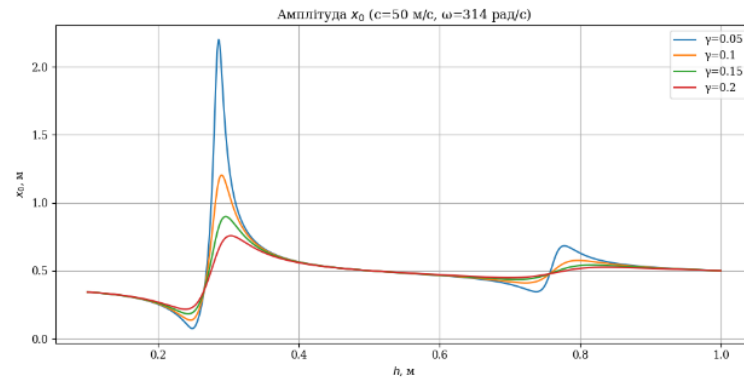


Рис.1. Амплітуди коливання від висоти виробу при значеннях:
 $\gamma = 0.05; 0.1; 0.15; 0.2$, $c = 50 \text{ м/с}$, $\omega = 314 \text{ рад/с}$

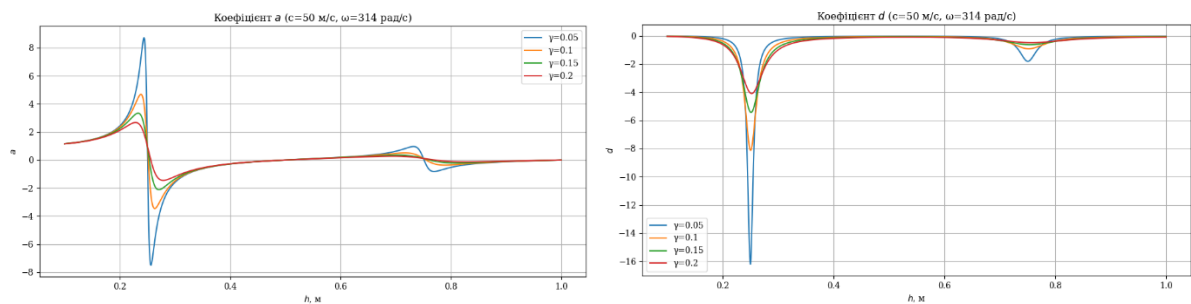


Рис.2. Залежність коефіцієнтів a_1 , d_1 від висоти виробу при значеннях
 $\gamma = 0.05; 0.1; 0.15; 0.2$, $c = 50 \text{ м/с}$, $\omega = 314 \text{ рад/с}$

Наведені графіки зміни енергії (рис.3) на ущільнення бетонної суміші в залежності від висоти суміші дозволили запропонувати відповідні розрахункові параметри, реалізація яких дозволить мінімізувати витрати енергії.

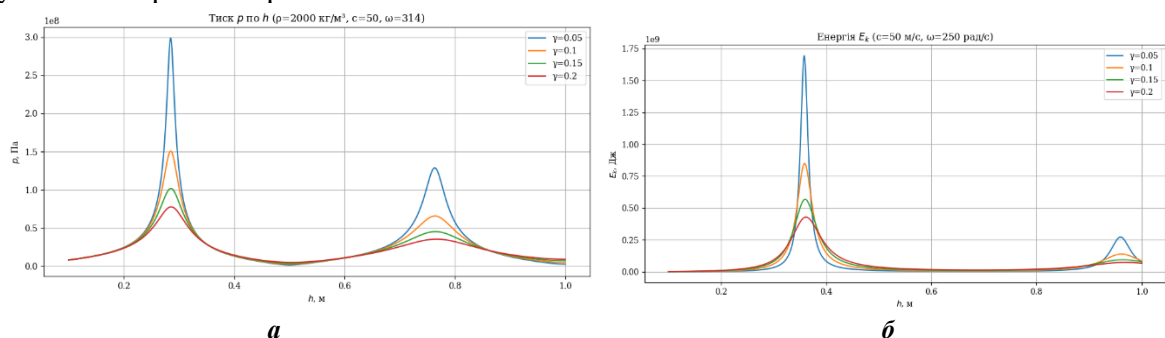


Рис.3. Графік зміни енергії, що витрачається на ущільнення бетонної суміші при її різній висоті:
 а) $\gamma = 0.05; 0.1; 0.15; 0.2$, $c = 50 \text{ м/с}$, $\omega = 314 \text{ рад/с}$
 б) $\gamma = 0.05; 0.1; 0.15; 0.2$, $c = 50 \text{ м/с}$, $\omega = 250 \text{ рад/с}$

Графічні залежності дозволили виявити характер змін енергетичних показників у до-, при- та за-резонансних режимах при різних заданих параметрів та розробити методику досліджень

Експериментальні дослідження проведені на спеціально створеній лабораторній установці із вимірювальними датчиками та реєстрацією параметрів на екрані комп'ютера.

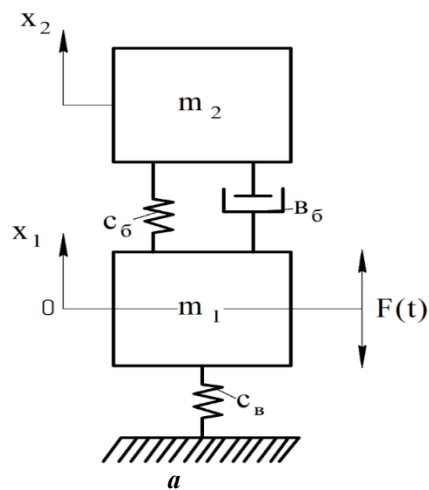


Рис.4. Розрахункова схема (а) та вібраційна установка (б) для проведення експериментальних досліджень робочого процесу ущільнення бетонної суміші.

Дослідження параметрів і режимів здійснювали при змінній висоті стовпа бетонної суміші, а також за незмінної висоти при зміні маси навантаження (рис.4). На екрані комп'ютера реєстрували віброграми, в результаті обробки яких в таблицях фіксували відповідні значення параметрів в перехідному, сталому та вільному коливальному режимах.

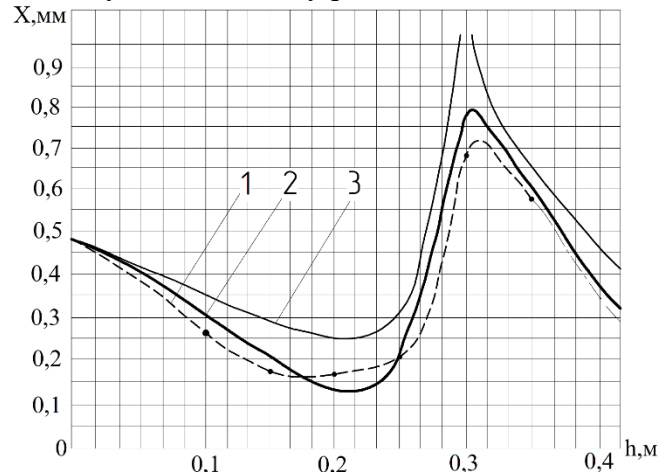


Рис.5. Криві зміни амплітуди коливань вібромайданчика в залежності від висоти: 1 – експеримент; 2 – по формулі (3); 3 – по формулі (3) без урахування дисипації

Результати експериментів порівнювалися з аналітичними розрахунками (рис.5): розбіжність в до- та за-резонансних режимах не перевищує 12 %, у резонансній зоні – до 15 %, що підтверджує достовірність обраної теоретичної моделі за виключенням моделі (крива 3), що не враховує дисипацію.

Обговорення. Проведені теоретичні та експериментальні дослідження підтвердили, що і змінність опору ущільнюючого середовища істотно впливають на енергетичні показники роботи вібраційного майданчика. Виявлено, що моделі зосереджених параметрів придатні лише в обмежених діапазонах технологічних умов, а врахування дисипативних і реактивних сил у континуальних моделях дозволяє точніше прогнозувати витрати енергії. Отримані графічні та числові залежності дозволяють виявити діапазони параметрів, за яких процес ущільнення є енергоефективним і стабільним. Узагальнення результатів дозволило розробити алгоритм вибору параметрів вібромайданчика залежно від характеристик бетонної суміші.

Висновки

1. Отримані аналітичні залежності та результати експериментів підтверджують істотний вплив параметрів бетонної суміші на амплітуду, частоту та потужність коливань.
2. Розроблена та виготовлена експериментальна установка із вимірювальними датчиками та

реєстрацією параметрів на екрані комп'ютера дали можливість встановити закономірність руху системи: «вібромайданчик–бетонна суміш»

3. Розроблено алгоритми розрахунку оптимальних параметрів роботи вібраційного майданчика із урахуванням взаємодії з бетонною сумішшю.

Список використаних джерел:

1. Назаренко І.І. Прикладні задачі теорії вібраційних систем. Навчальний посібник(2 –е видання). –К.: Видавничий Дім «Слово»,2010. – 440 с
2. Volodymyr Sliusar. Methodology for experimental research on the distribution of energy in the elements of the «vibration machine –compacting concrete mixture» system. Техніка будівництва. 2024. № 41. С. 40–46. <https://doi.org/10.32347/tb.2024–41.0404>
3. Володимир Слюсар. Методика експериментального дослідження розподілу енергії в елементах системи «вібраційна машина – ущільнювана бетонна суміш». V Міжнародна науково-практична конференція «Енергоощадні машини і технології». Київ, КНУБА, 2024, С. 22–24

ГЕНЕРУВАННЯ ПРЯМОЛІНІЙНИХ, КОЛОВИХ ТА ЕЛІПТИЧНИХ ТРАЄКТОРІЙ КОЛИВАНЬ ОДНОМАСОВОЇ ВІБРАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ З КРИВОШИПНО-ПОВЗУННИМ ВІБРОЗБУДНИКОМ

Віталій Корендій, доцент, к.т.н., завідувач кафедри ¹ (ORCID: 0000-0002-6025-3013),

Тарас Вільчинський, аспірант ¹ (ORCID: 0009-0007-9537-9242),

Владислав Киричук, аспірант ¹ (ORCID: 0000-0002-9925-809X),

Олександр Янів, аспірант ¹ (ORCID: 0009-0001-2491-5278),

¹ Національний університет «Львівська політехніка», вул. С. Бандери 12, Львів, 79013, Україна

АНОТАЦІЯ. Дана робота присвячена дослідженню актуальної задачі генерування прямолінійних, колових та еліптичних траєкторій коливань одномасової вібраційної системи, що приводиться в рух кривошипно-повзунним віброзбудником. Метою роботи є встановлення умов та закономірностей формування зазначених типів траєкторій робочого органу для оптимізації вібраційних технологічних процесів. Для досягнення поставленої мети розроблено математичну модель динаміки одномасової коливальної системи з урахуванням параметрів кривошипно-повзунного механізму, що базується на рівняннях Ейлера-Лагранжа. На основі цієї моделі проведено серію обчислювальних експериментів у програмному середовищі Wolfram Mathematica. При моделюванні використовувалися конкретні набори геометричних параметрів віброзбудника (довжин ланок та кута нахилу напрямної повзуна), частково обґрунтовані в попередніх дослідженнях, для кожного типу траєкторії. Результати чисельного моделювання підтвердили принципову можливість ефективного генерування лінійних, колових та еліптичних коливань робочого органу шляхом цілеспрямованої зміни конструктивних параметрів кривошипно-повзунного віброзбудника. Для розглянутих випадків, зокрема при резонансній частоті збудження 25 Гц та співвідношенні активної маси до збурювальної 10:1, отримано розмах коливань близько 3 мм для всіх типів траєкторій. Отримані дані можуть бути використані під час проектування вібраційних машин з керованим характером руху робочого органу, що дозволяє підвищити ефективність різних технологічних операцій, наприклад, транспортування, сортування, сепарування чи ущільнення матеріалів.

Ключові слова: вібраційна система; кривошипно-повзунний віброзбудник; траєкторія коливань; рівняння Ейлера-Лагранжа; прямолінійні коливання; колові коливання; еліптичні коливання; математична модель; чисельне моделювання; динаміка системи.

Вступ та постановка проблеми. Вібраційні процеси та машини відіграють ключову роль у багатьох галузях сучасної промисловості, забезпечуючи ефективне виконання таких технологічних операцій, як транспортування, сортування, сепарація, ущільнення сипких та кускових матеріалів, вібраційна обробка та інше. Для приведення в рух робочих органів вібраційних машин широко використовуються різноманітні віброзбудники, серед яких важливе місце займають механічні (кінематичні) приводи на основі кривошипних механізмів. Кривошипно-повзунні механізми, як класичний приклад перетворення обертового руху в коливальний (або зворотно-поступальний), знаходять застосування у вібраційній техніці завдяки своїй відносній простоті, надійності та можливості забезпечення значних амплітуд коливань [1]. Характер руху робочого органу вібраційної машини, зокрема форма його траєкторії, суттєво впливає на ефективність

технологічного процесу. Для різних завдань оптимальними можуть бути прямолінійні (наприклад, для спрямованого транспортування), колові (для сепарації чи змішування) або еліптичні (для комбінованих процесів, таких як сортування з одночасним переміщенням) траєкторії коливань.

Незважаючи на широке вивчення динаміки вібраційних систем та кривошипних механізмів окремо, задача цілеспрямованого генерування коливань робочого органу за заданими траєкторіями (прямолінійною, коловою, еліптичною) за допомогою одного кривошипно-повзунного віброзбудника, що діє на одномасову коливальну систему, залишається актуальною. Виникає потреба у глибшому розумінні зв'язку між конструктивними та кінематичними параметрами самого кривошипно-повзунного механізму (довжини ланок, кут нахилу напрямної повзуна, положення точки приєднання до маси) та результуючою формою, розмірами та орієнтацією траєкторії коливань робочої маси. Проблема даного дослідження полягає у визначенні умов збурення та геометричних параметрів кривошипно-повзунного віброзбудника, які дозволяють реалізувати зазначені типи траєкторій (прямолінійну, колову, еліптичну) для одномасової коливальної системи.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз науково-технічної літератури свідчить про значний інтерес дослідників до розробки та вдосконалення вібраційних збудників для промислового технологічного обладнання. У недавніх оглядових роботах розглядаються нові концепції та конструкції інерційних віброзбудників [2]. Значна увага приділяється аналізу можливостей використання різних типів механізмів, зокрема плоских важільних та зубчастих, у приводах вібраційних машин [4], а також обґрунтуванню їх структурних схем для ефективного збудження коливань [3]. Серед різноманіття механічних приводів, кривошипно-повзунні механізми розглядаються як перспективні для застосування в інерційних віброзбудниках. Особливий інтерес становить робота [1], в якій представлена методика синтезу кривошипно-повзунного механізму, орієнтована на отримання заданої траєкторії руху точки на шатуні, в якій потенційно може розміщуватися незрівноважена маса. Цей підхід дозволяє визначати геометричні параметри механізму, виходячи з вимог до форми траєкторії коливань, що є безпосередньо пов'язаним із завданням даної статті.

Формулювання невирішених частин загальної проблеми. Таким чином, останні публікації охоплюють як загальні огляди та аналіз структурних схем віброзбудників [2, 3, 4], так і конкретні методики синтезу кривошипно-повзунних механізмів за критерієм траєкторії [1]. Однак, комплексне дослідження умов формування саме прямолінійних, колових та еліптичних траєкторій для одномасової системи з кривошипно-повзунним збудником, з детальним аналізом відповідних динамічних характеристик та стійкості руху, потребує подальшого вивчення. Дана робота спрямована на поглиблення досліджень у цьому напрямку, спираючись на результати синтезу [1] та аналізуючи динаміку системи в різних режимах генерування траєкторій.

Цілі роботи та постановка задач дослідження. Метою даної роботи є встановлення закономірностей та умов генерування прямолінійних, колових та еліптичних траєкторій коливань одномасової вібраційної системи за допомогою кривошипно-повзунного віброзбудника, а також аналіз динамічної поведінки та стійкості системи при реалізації цих траєкторій. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі дослідження: 1) розробити уточнену математичну модель динаміки просторових коливань одномасової вібраційної системи, що враховує кінематичні та динамічні параметри кривошипно-повзунного віброзбудника; 2) визначити аналітичні або числові співвідношення між конструктивними параметрами кривошипно-повзунного механізму (довжини ланок, кут нахилу напрямної повзуна) та умовами формування переважно прямолінійних, колових та еліптичних траєкторій руху робочої маси; 3) провести комп'ютерне моделювання руху системи на основі розробленої математичної моделі для візуалізації траєкторій та отримання кінематичних характеристик коливань (переміщень, швидкостей, прискорень) для різних типів траєкторій.

Динамічна схема та математична модель системи. Узагальнена динамічна схема досліджуваної одномасової коливальної системи наведена на рис. 1. Центральним елементом є робочий орган, представлений масою m_1 , яка має можливість здійснювати плоский коливальний рух, що описується горизонтальним (x) та вертикальним (y) переміщеннями. Ця маса опирається на пружно-дисипативну основу. Пружні властивості основи моделюються за допомогою

горизонтальних та вертикальних пружин з коефіцієнтами жорсткості k_{1x} та k_{1y} , відповідно, які забезпечують генерування відновлювальних сил при відхиленні робочого органу від положення рівноваги. Дисипативні властивості, що відповідають за розсіювання енергії коливань, представлені демпферами з коефіцієнтами в'язкого опору c_{1x} та c_{1y} .

Збудження коливань маси m_1 здійснюється за допомогою кривошипно-повзунного механізму. Цей механізм складається з кривошипа OA довжиною l_1 , що обертається навколо нерухомої точки O з кутовою координатою $\varphi(t)$, яка є керованою та залежить від часу. Кривошип шарнірно з'єднаний у точці A з шатуном AB загальною довжиною $(l_2 + l_3)$. На шатуні, на відстані l_2 від точки A , може бути розташована додаткова незрівноважена маса m_2 (точка M). Інший кінець шатуна (точка B) шарнірно з'єднаний з повзуном, який рухається вздовж нерухомої напрямної, нахиленої під кутом α до горизонтальної осі. При аналізі динаміки системи приймається припущення, що маси ланок кривошипно-повзунного механізму є малими порівняно з масою робочого органу m_1 та незрівноваженою масою m_2 .

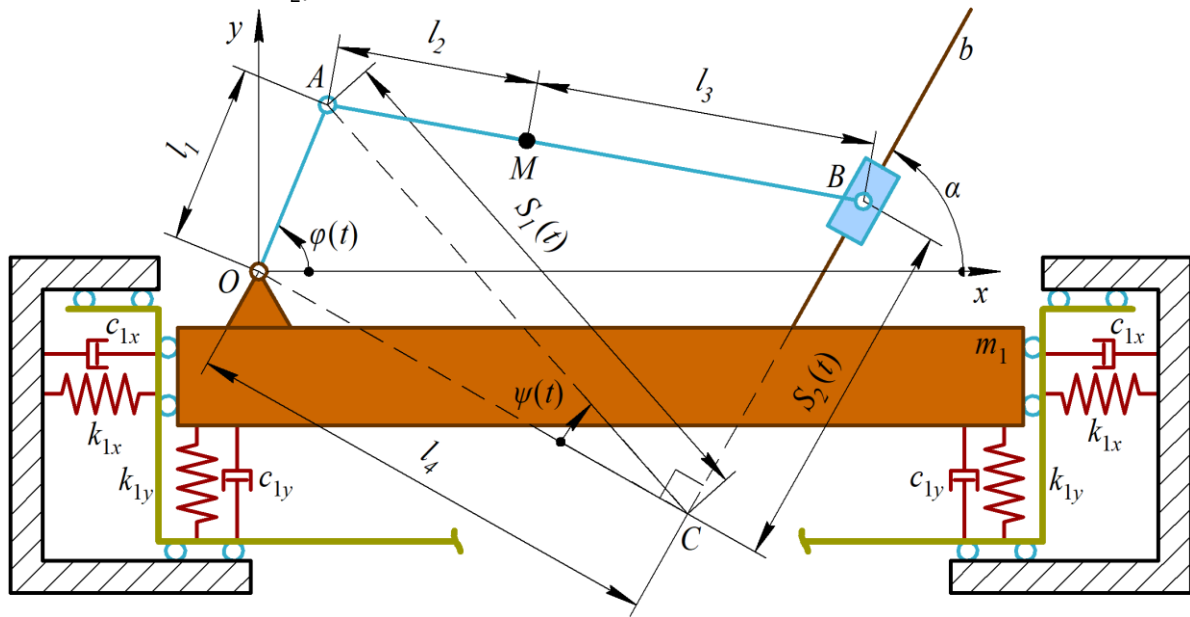


Рис. 1. Узагальнена динамічна схема одномасової вібраційної системи з кривошипно-повзунним віброзбудником

На основі принципів Ейлера-Лагранжа виведемо диференціальні рівняння, що описують рух системи:

$$m_1 \cdot \ddot{x}(t) + m_2 \cdot (\ddot{x}(t) + \ddot{x}_M(t)) + k_{1x} \cdot x(t) + c_{1x} \cdot \dot{x}(t) = 0; \quad (1)$$

$$m_1 \cdot \ddot{y}(t) + m_2 \cdot (\ddot{y}(t) + \ddot{y}_M(t)) + k_{1y} \cdot y(t) + c_{1y} \cdot \dot{y}(t) = 0, \quad (2)$$

де координати $x_M(t)$ та $y_M(t)$ незбалансованої маси m_2 у неінерціальній системі відліку, пов'язаній з робочим органом (масою m_1), визначаються наступними рівняннями:

$$x_M(t) = \frac{l_1 \cdot l_2 \cdot \cos(\alpha - \varphi(t)) \cdot \cos(\alpha) + l_1 \cdot l_3 \cdot \cos(\varphi(t)) + \sqrt{(l_2 + l_3 - l_4) \cdot (l_2 + l_3 + l_4) - l_1^2 + l_2 \cdot l_4 \cdot \sin(\alpha) + l_2 \cdot \cos(\alpha) \cdot \left(l_1 \cdot (\cos(\alpha - \varphi(t)))^2 + 2 \cdot l_4 \cdot \sin(\alpha - \varphi(t)) \right)}}{l_2 + l_3}; \quad (3)$$

$$y_M(t) = \frac{\left(l_1 \cdot l_2 \cdot \cos(\alpha - \varphi(t)) \cdot \sin(\alpha) - l_2 \cdot l_4 \cdot \cos(\alpha) + \right.}{l_2 + l_3} \sqrt{\left(l_2 + l_3 - l_4 \right) \cdot \left(l_2 + l_3 + l_4 \right) - l_1^2 +} + l_1 \cdot l_3 \cdot \sin(\varphi(t)) + l_2 \cdot \sin(\alpha) \cdot \left(l_1 \cdot \left(\cos(\alpha - \varphi(t)) \right)^2 + 2 \cdot l_4 \cdot \sin(\alpha - \varphi(t)) \right) \quad (4)$$

При подальшому чисельному моделюванні розглянемо можливості генерування прямолінійних, еліптичних та колових коливань робочого органу (маси m_1) за різних геометричних параметрів досліджуваного кривошипно-повзунного віброзбудника.

Чисельне моделювання руху системи. Розглянемо далі ті ж геометричні параметри кривошипно-повзунного механізму, що й наведені в [1]: $l_1 = 10$ мм; $l_4 = 50$ мм. Для генерування прямолінійних коливань під кутами нахилу $\beta = 20^\circ$ (160°) до горизонтальної осі, використаємо наступні параметри, обґрунтовані в [1]: $l_2 = 502$ мм, $l_3 = 0$ мм, $\alpha = 20^\circ$ (160°). Якщо необхідно згенерувати колові коливання, приймемо наступні параметри [1]: $l_2 = 0$ мм, $l_3 = 61$ мм, $\alpha = 0 \dots 180^\circ$. Розглядаючи можливості генерування еліптичної траєкторії коливань робочого органу, проаналізуємо також два випадки [1]: велика вісь еліпса нахилена під кутами $\beta = 20^\circ$ (160°) до горизонтальної осі, де $l_2 = 234$ мм, $l_3 = 156$ мм, $\alpha = 22.9^\circ$ (162.9°). У процесі чисельного моделювання приймемо резонансний режим роботи вібраційної системи, при якому відповідні коефіцієнти жорсткості та демпфування в горизонтальному та вертикальному напрямках є рівними ($k_{1x} = k_{1y} = 2,5 \cdot 10^5$ Н/м, $c_{1x} = c_{1y} = 10^3$ Н·с/м), співвідношення активної маси m_1 до збурювальної маси m_2 дорівнює 10: ($m_1 = 10$ кг, $m_2 = 1$ кг), а необхідна частота вимушених коливань $f_f = 25$ Гц.

Моделювання виконувалося у програмному продукті Wolfram Mathematica шляхом розв'язання системи диференціальних рівнянь (1) та (2) (з урахуванням аналітичних залежностей (3) і (4)) за допомогою методів Рунге-Кутти п'ятого порядку. На верхніх графіках рис. 2 показано часові залежності $x(t)$ та $y(t)$ горизонтальних та вертикальних переміщень робочого органу, відповідно. У всіх розглянутих випадках горизонтальне переміщення змінюється в діапазоні приблизно від $-1,5$ мм до $1,5$ мм, тоді як вертикальне переміщення залежить від траєкторій руху робочого органу, представлених на нижніх графіках. Як показано на рис. 2, робочий орган може генерувати лінійні, колові та еліптичні коливання за різних геометричних параметрів кривошипно-повзунного механізму віброзбудника, розглянутих вище та обґрунтованих в роботі [1]. У всіх досліджуваних випадках наближене значення розмаху коливань (подвоєної амплітуди) становить 3 мм: для лінійної траєкторії – це довжина відрізка, що з'єднує кінцеві точки траєкторії; для колової траєкторії – це діаметр кола; для еліптичної траєкторії – це довжина великої осі еліпса.

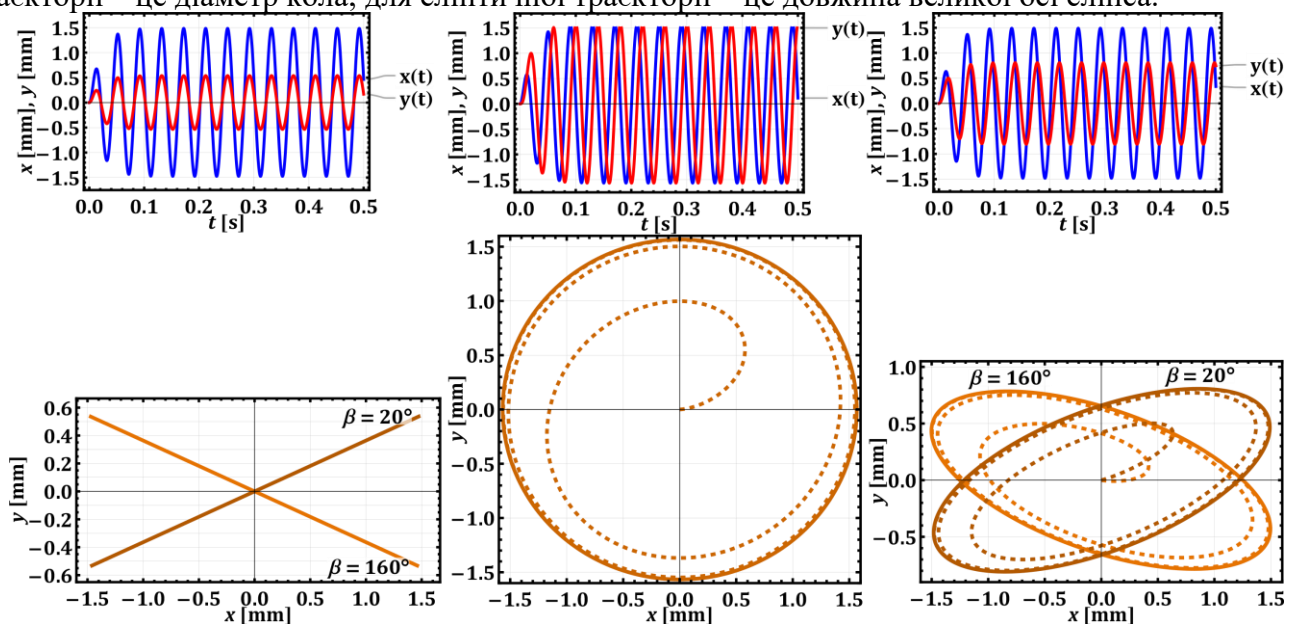


Рис. 2. Узагальнена динамічна схема одномасової вібраційної системи з кривошипно-повзунним віброзбудником

Обговорення отриманих результатів та загальні висновки. У представленій роботі успішно вирішено актуальну науково-технічну задачу, що полягає у дослідженні та обґрунтуванні можливостей цілеспрямованого генерування коливань одномасової вібраційної системи за різними типами траєкторій – прямолінійними, коловими та еліптичними – з використанням одного кривошипно-повзунного віброзбудника інерційного типу. Досягнення поставленої мети стало можливим завдяки розробці відповідної математичної моделі та проведенню серії обчислювальних експериментів.

Ключовим етапом дослідження стала розробка математичної моделі динаміки одномасової коливальної системи, що приводиться в рух кривошипно-повзунним механізмом. Модель, побудована на основі рівнянь Ейлера-Лагранжа, адекватно враховує основні кінематичні та динамічні параметри віброзбудника, зокрема довжини його ланок та кут нахилу напрямної повзуна, а також інерційні характеристики системи (масу робочого органу та масу незбалансованого тіла на шатуні). Для аналізу рівнянь руху (1) та (2) було отримано аналітичні залежності (3) і (4) для координат незбалансованої маси.

За допомогою чисельного моделювання, реалізованого в програмному середовищі Wolfram Mathematica, було продемонстровано можливість формування заданих траєкторій коливань робочого органу. Встановлено, що шляхом цілеспрямованого підбору геометричних параметрів кривошипно-повзунного віброзбудника, таких як довжини шатунних ланок (l_2 , l_3) та кут нахилу повзуна (α), згідно з методиками, частково обґрунтованими в роботі [1], система здатна генерувати прямолінійні, колові та еліптичні траєкторії коливань. У всіх розглянутих випадках при резонансному режимі роботи (збудуючій частоті $f_f = 25$ Гц) та співвідношенні активної маси до збудовувальної 10:1 ($m_1 = 10$ кг, $m_2 = 1$ кг) було досягнуто розмаху коливань робочого органу приблизно 3 мм.

Отримані результати мають важливе практичне значення для проєктування вібраційного обладнання різного технологічного призначення. Показана можливість генерування траєкторій різної форми за допомогою варіації конструктивних параметрів одного й того ж типу механічного віброзбудника відкриває шлях до створення більш універсальних та адаптивних вібраційних машин. Це дозволяє оптимізувати технологічні процеси, такі як транспортування, сортування, сепарування чи ущільнення матеріалів, шляхом вибору найбільш ефективної траєкторії руху робочого органу для конкретних умов експлуатації та властивостей оброблюваного середовища.

Незважаючи на успішне досягнення основних цілей щодо демонстрації генерування заданих траєкторій, подальші дослідження доцільно зосередити на більш глибокому аналізі динамічних характеристик системи в ширшому діапазоні робочих частот та параметрів системи, зокрема, дослідження амплітудно-частотних характеристик. Окремої уваги потребує детальний аналіз стійкості коливальних режимів для різних типів траєкторій та різних значень коефіцієнтів демпфування, що було однією із заявлених задач дослідження. Також перспективним напрямком є експериментальна верифікація отриманих теоретичних результатів на фізичній моделі вібраційної системи з кривошипно-повзунним віброзбудником, що дозволить підтвердити адекватність розробленої математичної моделі та уточнить практичні рекомендації щодо проєктування такого обладнання.

Список використаних джерел:

1. Korendiy, V., Vilchynskiy, T., Lozynskyy, V., Kachmar, R., Porokhovskiy, Y., & Litvin, R. (2024). Trajectory-based synthesis of a slider-crank mechanism for applications in inertial vibration exciters. *Vibroengineering Procedia*, 56, 176–182. <https://doi.org/10.21595/vp.2024.24578>
2. Korendiy, V., Augousti, A., Lanets, O., Vilchynskiy, T., Kyrychuk, V., Yaniv, O., & Protasov, R. (2024). Novel concepts and designs of inertial vibration exciters for industrial vibratory equipment: A review. *Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Materials Science*, 10(4), 17–33. <https://doi.org/10.23939/ujmeme2024.04.017>
3. Korendiy, V. M., Parashchyn, O. Ya., Vilchynskiy, T. R., Kyrychuk, V. V., & Yaniv, O. M. (2025). Obgruntuvannya strukturnykh skhem mekhanizmiv dlia zburennia kolyvan vibratsiynoho tekhnolohichnogo obladdnannia [Justification of structural schemes of mechanisms for inducing vibrations in vibration technological equipment]. *Prohresyvnii tekhnolohii v mashynobuduvanni: zbirnyk naukovykh prats XIII Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii, Lviv–Zveniv*, 18 liutoho – 21 liutoho 2025 roku [Progressive technologies in mechanical engineering: collection of scientific papers of the

XIII International Scientific and Practical Conference, Lviv–Zveniv, February 18 – February 21, 2025] (pp. 73–76). [in Ukrainian].

4. Korendiy, V. M., Parashchyn, O. Ya., Yaniv, O. M., Kyrychuk, V. V., & Vilchynskyi, T. R. (2025). Analiz mozhlyvosti vykorystannia ploskykh vazhilnykh i zubchastykh mekhanizmiv u pryvodakh vibratsiinykh tekhnologichnykh mashyn [Analysis of the possibilities of using flat lever and gear mechanisms in drives of vibration technological machines]. *Moloda nauka - robotyzatsiia i nano-tekhnologii suchasnoho mashynobuduvannia: zbirnyk naukovykh prats Mizhnarodnoi molodizhnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii*, 16–18 kvitnia 2025 r. [Young Science - Robotics and Nanotechnology of Modern Mechanical Engineering: Collection of scientific papers of the International Youth Scientific and Technical Conference, April 16-18, 2025] (pp. 191–198). [in Ukrainian].

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІ МАТЕРІАЛИ ТА КОНСТРУКЦІЇ, ОТРИМАНІ З ВИКОРИСТАННЯМ ДЕРЕВИНИ ТА ПРОДУКТІВ ЇЇ ПЕРЕРОБКИ

Катерина Пушкарьова, професор, д.т.н., завідувачка кафедри будівельних матеріалів ¹ (ORCID: 0000-0001-7640-8625),
Ольга Кривенко, професор, д.т.н., професор ¹ (ORCID: 0000-0002-8949-0944),
Марина Кочевих, доцент, к.т.н., доцент ¹ (ORCID: 0000-0002-6201-3507),
Ольга Гончар, доцент, к.т.н., доцент ¹ (ORCID: 0000-0002-1071-7553),

¹ Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних сил 31, 03037, Україна

АНОТАЦІЯ. Розглянуто переваги отримання та використання сучасних енергоефективних матеріалів та конструкцій на їх основі, що дозволяє знизити витрати енергії не тільки на їх виробництво, але й експлуатацію протягом тривалого часу з урахуванням необхідних методів захисту від дії вологи, вогню та впливу анізотропії макроструктури. Показана енергоефективність матеріалів для створення клеєних дерев'яних конструкцій, CLT панелей та дерев'яно-гібридних конструкцій при зведенні великопрогонових споруд та багатопверхових будівель, які відіграють важливу роль у біоциркулярній економіці, допомагаючи оптимізувати використання природних ресурсів і зменшити вуглецевий слід будівництва.

Ключові слова: енергоефективність; клеєні дерев'яні конструкції; крос-ламінована деревина (CLT); дерев'яно-гібридні конструкції; продукти переробки деревини.

Вступ. Деревина – універсальна і єдина відносно швидко відновлювана сировина для будівельних матеріалів та конструкцій, особливо в умовах необхідності дотримання принципів сталого розвитку. Витрати енергії на виробництво товарних пиломатеріалів (деревини) для створення конструкцій є низькими, їх можна порівняти з аналогічними показниками для отримання багатьох сипких матеріалів. На підготовку деревини, отримання бруса і повітряну сушку сумарно використовується не більше 500 МДж/т, навіть при відносно енергоємному сушінні у печах (на сушку припадає 80...90 % всієї витраченої теплової енергії) сумарний показник може сягати 3,5 ГДж/т (якщо включати різку та стругання) для отримання таких розповсюджених пиломатеріалів як брус, що застосовується у будівництві каркасів житлових будинків. Низькі енерговитрати на переробку деревини становлять менше 5 % енерговитрат на усю продукцію, що виготовляється [1]. Існують обмеження використання деревини в будівництві, зокрема з характеристик міцності, вогнестійкості та стабільності розмірів, що спонукає до пошуку нових технічних рішень при створенні на її основі конструкцій. Ці рішення передбачають використання деревини разом з іншими конструкційними матеріалами, які компенсують її недоліки. Такий підхід відкриває нові можливості для інноваційних архітектурних рішень. Матеріалознавчий підхід дозволяє змінити або вдосконалити деревину для використання в конструкційних елементах: крім термообробки та ацетилювання (просочення оцтовою кислотою) деревину просочують фурфурольним спиртом, використовують композитну арматуру, карбонові волокна та полімерні смоли. Особливе місце займає використання гідрофобних покриттів для зменшення водопоглинання та підвищення терміну служби. Останніми технічними інноваціями щодо термічної модифікації можна назвати отримання більш міцного матеріалу при жорстких режимах обробки – це ступінчаста пароподача; обробка в середовищі з постійною рівномірною вологістю (компанія «FirmoLin», Нідерланди); ущільнення матеріалу у вакуумному пресі (компанія «SmartHeat», Нідерланди) [1, 2].

Виклад основного матеріалу. Сучасні конструкційні матеріали та вироби (середня густина яких більша 1200 кг/м^3) представлені різними видами клеєного бруса, деякими видами фанери. Застосування продуктів переробки деревини для отримання енергоефективних будівельних матеріалів (плити МДФ, ОСП, ЦСП) сприяє вирішенню екологічних проблем, знижує енерговитрати під час виготовлення, монтажу та експлуатації матеріалів як конструкційних, так і конструкційно-теплоізоляційних. 1 м^3 відходів, що застосовують для виробництва деревностружкових або деревноволокнистих плит дозволяє зекономити близько $2,2 \text{ м}^3$ ділової деревини. За останні 15 років виробництво ДСП дало змогу заощадити 50 млн м^3 високоякісної деревини, а ДВП – 55 млн м^3 . На одну тону ДСП (з середньою густиною від 660 до 700 кг/м^3) витрачається 3...7 ГДж, проте майже 60 % всієї енергії припадає на сушіння стружки, 20 % – на гаряче пресування. Коефіцієнти теплопровідності матеріалів та виробів на основі деревини (від 0,12 до $0,3 \text{ Вт/(м·К)}$) дозволяють віднести їх до енергоефективних за рахунок зменшення енерговитрат на експлуатацію будівель і споруд протягом року [2].

Отримання якісних дерев'яних клеєних конструкцій (ДКК) передбачає врахуванням характеристик деревини, виду клею та захисних речовин, а також технологічних умов та кваліфікації персоналу. Серед параметрів конструкцій пріоритетне значення мають критичні експлуатаційні показники міцності і стійкості клейових з'єднань, що визначають при інших рівних умовах безпеку і довговічність будівельних конструкцій на основі ДКК. Енерговитрати на отримання виробів залежать від ступеня їх обробки. Виготовлення клеєної деревини потребує витрат енергії від 5 до 12 ГДж на тону готової продукції. До енергоефективних і екологічних матеріалів для стін відносять деревину, яку в сьогоденних умовах захищають від вогню, дії грибків та комах спеціальними хімічними речовинами.

Клеєна деревина є більш міцною, зберігає форму і розміри, дає мінімальну усадку (1...2 %), при правильній обробці добре протистоїть гниттю. Якісний клеєний брус забезпечує кращу герметичність стиків і не розтріскується, тому стіни з нього мають меншу теплопровідність, ніж з колоди. Коефіцієнт теплопровідності клеєного бруса майже вдвічі менше за аналогічний показник для звичайного бруса ($0,1$ проти $0,18 \text{ Вт/(м·К)}$). Досвід застосування клеєних дерев'яних конструкцій свідчить, що порівняно з традиційними рішеннями вони мають значні переваги: металомісткість будівель зменшується у 3 рази, маса – у 2...3. рази, трудомісткість монтажу – до 2,5 рази. Дерев'яні конструкції добре чинять опір агресивному середовищу, в якому сталь і бетон руйнуються. У певних умовах клеєні дерев'яні конструкції є більш економічними, ніж залізобетонні, крім того коефіцієнт теплопровідності клеєних дерев'яних конструкцій є значно нижчим порівняно з аналогами з залізобетону або сталі. Наприклад, клеєний брус, який застосовується для створення несучих конструкцій характеризується коефіцієнтом теплопровідності $0,12...0,18 \text{ Вт/(м·К)}$, в той час як аналогічні показники для залізобетону – $1,51 \text{ Вт/(м·К)}$, а для сталі – 58 Вт/(м·К) [1, 2]. Для зведення енергоефективних будинків рекомендовано застосовувати клеєні дерев'яні панелі: герметичні стики сприяють теплозбереженню, а висока теплоємність деревини – забезпеченню стабільного температурного режиму у приміщенні протягом дня. Теплоізоляційні властивості багатошарових клеєних дерев'яних панелей аналогічні відповідним властивостям деревини, з якої вони виготовлені. Наприклад, багатошарова панель товщиною 65 мм забезпечує таку саму теплоізоляцію, як пінобетонний виріб товщиною 100 мм. Теплоємність панелей становить $2,0 \text{ КДж/(кг·К)}$, що більше ніж у 2 рази перевищує теплоємність бетону і цегли ($0,88$ та $0,84$ відповідно) [2].

Багатошарові клеєні дерев'яні панелі CLT (Cross-Laminated Timber) – унікальні будівельні вироби, що впевнено конкурують зі сталлю та бетоном, придатні для будівництва не тільки приватних будинків, але і багатоповерхових будівель. Завдяки технології перехресного склеювання в них відсутні містки холоду і місця втрати тепла, вони мають теплозахисні характеристики на 35% кращі, ніж колода чи брус. CLT-панелі при середній густини 500 кг/м^3 характеризуються коефіцієнтом теплопровідності $0,13 \text{ Вт/(м·К)}$, що у 3...5 разів нижче, ніж аналогічні показники для цегляних та бетонних стін. CLT-панелі порівняно з бетоном мають у 2...3 рази більшу теплоємність (теплову інерцію) – зазвичай вона становить близько $2100 \text{ Дж/кг·}^\circ\text{C}$. Важливим є те, що застосування таких виробів підтримує концепцію «зелених технологій». Маса CLT-панелі у 4...5

разів менше маси залізобетонного елемента, що дозволяє економити на підйомних механізмах та транспортуванні [3, 4].

Інженерні дерев'яні вироби, виготовлені з клеєної деревини (Glulam), а також крос-ламінована деревина (CLT), відіграють ключову роль у біоциркулярній економіці. Сучасна технологія виробництва багатошарових дерев'яних конструкцій розглядається як реальна альтернатива існуючим технологіям залізобетону (наприклад у великопрогонних конструкціях, покриття досягають 100..250 м), що покликана очистити атмосферу, скоротити енергоспоживання і створити здоровий мікроклімат у приміщеннях. Також застосування клеєно-дерев'яних конструкцій знімає проблему обмеження сортаменту матеріалів з деревини, впливу анізотропії будови деревини [1, 4]. В країнах ЄС на основі нових нормативних вимог зводять багатоповерхові будівлі з несучими дерев'яними каркасами, які завдяки використанню нових поєднань матеріалів і технічних рішень забезпечують таку ж пожежну безпеку, як у будинках з інших матеріалів, що дозволяє застосовувати їх при зведенні висотних будівель. Аналіз сучасних підходів до проектування зумовив впровадження гібридних дерев'яних конструкцій з урахуванням їх енергоефективності, довговічності, безпеки та потенціалу для масового застосування у будівництві. Дерев'яно-гібридні конструкції поєднують деревину з іншими матеріалами, такими як бетон, сталь, скло для створення більш міцних, довговічних та екологічно стійких будівель. Цей підхід дозволяє використовувати переваги деревини: її низький вуглецевий слід, легкість і природну теплоізоляцію, в поєднанні з міцністю та стабільністю інших матеріалів. Такий тип конструкції є оптимальним для багатоповерхових будівлях і може забезпечувати високу ефективність як під час будівництва, так і в експлуатації. Дерев'яно-гібридні будівлі також відповідають сучасним вимогам до екологічної стійкості. Гібридні системи активно застосовуються у перекриттях, де дерев'яні балки можуть комбінуватися з бетонними плитами, що дозволяє знизити масу конструкції і полегшити монтаж. Наприклад активно застосовуються клеєні дерев'яні арки з інтегрованими металевими стержнями. Це дозволяє збільшити прольоти до 30-40 м без проміжних опор [5]. У дахових конструкціях ефективно використовуються сендвіч-панелі з деревини та полімерного утеплювача. Будинки, зведені з використанням SIP-панелей (Structural Insulated Panels) відносяться до категорії «Green Building». Такі споруди відзначаються високою енергоефективністю за рахунок низької теплопровідності складових, що допомагає утримувати тепло всередині будинку взимку і прохолоду влітку, зменшує місткість холоду, а також сприяє зниженню споживання енергії для опалення взимку та охолодження влітку будівлі. Коефіцієнт теплопровідності SIP панелей становить близько $0,03 \text{ Вт/м}^2$, тоді як у традиційних цегляних будинків без утеплення він становить близько $0,8 \text{ Вт/м}^2$. Це означає, що SIP панелі у 26 разів ефективніше утримують тепло, ніж цегла [2]. Дерев'яно-гібридні конструкції є оптимальним варіантом як для інженерних конструкцій (наприклад, мостів), так й для багатоповерхових будівель і можуть забезпечувати високу ефективність як під час будівництва, так і в експлуатації. При будівництві автомобільного моста в Нідерландах (компанією Schaffitzel Holzindustrie), довжиною 40 м (прольоти довжиною 16 і 24 м) витрачено 112 м^3 клеєної деревини і 66 м^3 бетону. Це гібридна конструкція, в якій клеєні дерев'яні балки (кожна шириною 1400 мм) працюють як єдине ціле з монолітною залізобетонною плитою полотна проїжджої частини. Вдалим прикладом є застосування гібридних конструкцій при зведенні еталонної будівлі LifeCycle Tower (LCT ONE) площею 2500 м^2 / 8 поверхів у м. Дорнборн, Австрія. Високоєфективна гібридна збірна система з дерева та бетону є не тільки нейтральною до CO_2 , а також ресурсозберігаючою – її маса складає всього 42% від аналогічної традиційної конструкції з бетону, а енергоефективність відповідає стандарту Passive House. Основними перевагами таких будівель є можливість виготовлення виробів та елементів конструкцій в заводських умовах з високою точністю і якістю, скорочення термінів будівництва, екологічність (підпорядкованість біоциркулярній економіці, зменшення вуглецевого сліду), естетичність при збереженні механічних властивостей [2, 5].

Пожежна безпека є критично важливою для легалізації дерев'яного будівництва у багатьох країнах. Завдяки методам інкапсуляції, активних вогнезахисних систем та обвуглення деревини вдається досягти високого рівня пожежостійкості. Наприклад, крос-ламінована деревина (CLT) може витримати вогонь до 120 хвилин. Стандарти типу Eurocode 5 передбачають детальні методики

розрахунку залишкової несучої здатності після обвуглення шару деревини. Комбінування дерев'яних конструкцій з негорючими матеріалами – бетон, гіпс, вогнезахисні лаки – підвищує рівень безпеки до рівня, прийнятного у громадських спорудах. Таким чином гібридні системи дають змогу проектувати конструкції, які відповідають стандартам пасивного будинку. Поєднання деревини з теплоізоляційними матеріалами дозволяє зменшити товщину стін без втрати ефективності. Використання деревини у гібридних системах відкриває перспективи сталого урбанізму та зниження вуглецевого сліду будівельної галузі. Технологічна гнучкість, можливість індустріалізації та екологічність роблять дерев'яні гібридні конструкції важливим елементом майбутнього архітектури. Враховуючи особливості деревини, як природного матеріалу, можна зробити висновки щодо ефективного її використання з урахуванням сучасних методів захисту від впливу вогню, вологи, анізотропії макроструктури із забезпеченням необхідної жорсткості і твердості при використанні клеєних, перехресно-дощато-клеєних конструкційних матеріалів а також у складі гібридних конструкцій.

Список використаних джерел:

1. Jozef Švajlenka, Mária Kozlovská (2022) Analysis and Evaluation of a Selected Modern Method of Wood-Based Construction in Comparison with the Traditional Construction System of Construction in the Context of Sustainability and Efficiency: A Case Study / In book: Efficient and Sustainable Wood-based Constructions, pp.67-87 doi:[10.1007/978-3-030-87575-6_6](https://doi.org/10.1007/978-3-030-87575-6_6)
2. Плоский В.О., Пушкарьова К.К., Кривенко О.В. та ін. Енергоефективні матеріали та конструкції в сучасній архітектурі: Навчально-методичний посібник ч.1. (Energy-efficient materials and structures in modern architecture: educational and methodological manual . Part 1) .Київ: Видавництво Ліра –К, 2024, 328 с.
3. Ploskyi V.O., Pushkarova K.K., Kryvenko O.V. ta in. Enerhoefektyvni materialy ta konstruktsii v suchasni arkhitekturi: Navchalno-metodychnyi posibnyk ch.1. (Energy-efficient materials and structures in modern architecture: educational and methodological manual . Part 1) .Kyiv: Vydavnytstvo Lira –K, 2024, 328 s. . [in Ukrainian]
4. Михаловський Д., Комар М., Склярова Т. ін. Застосування клеєної та поперечно-клеєної деревини при реконструкції та новому будівництві Будівельні конструкції. Теорія та практика,(15), 54–65
5. Mykhailovskyi D., Komar M., Skliarova T. ta in. (2024). Zastosuvannia kleienoi ta poperechno-kleienoi derevyny pry rekonstruktsii ta novomu budivnytstvi. (The use of glued and cross-laminated timber in reconstruction and new construction *Budivelni konstruktsii. Teoriia i praktyka*), (15), 54–65. <https://doi.org/10.32347/2522-4182.15.2024.54-65> [in Ukrainian]
6. Brandner, R., Flatscher, G., Ringhofer, A., Schickhofer, G., & Thiel, A.(2016).3.Cross laminated timber (CLT): overview and development.*European Journal of Wood and Wood Products*, 74(3).<https://doi.org/10.1007/s00107-015-0999-5>
7. Iqbal, A. (2021). Developments in Tall Wood and Hybrid Buildings and Environmental Impacts.*Sustainability*, 13(21), 11881. <https://doi.org/10.3390/su132111881>

ЕНЕРГЕТИКА ПРОЦЕСУ РУХУ ВІБРАЦІЙНОЇ ПЛИТИ ПРИ УЩІЛЬНЕННІ БУДІВЕЛЬНИХ СУМІШЕЙ

Андрій Запривода, доцент, к.т.н., доцент ¹ (ORCID: 0000-0001-9171-9325),

¹ Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних сил 31, 03037, Україна

АНОТАЦІЯ. Приведено результати дослідження енергетики вібраційних машин і процесів поверхневого ущільнення бетонних виробів та будівництва доріг. Розроблено математичні моделі та методики розрахунку основних параметрів і режимів роботи поверхневих машин на основі теорії коливань дискретних та континуальних систем. Досліджено процеси та визначені раціональні параметри статичного і вібраційного ущільнення сумішей вібраційними плитами. Встановлено залежності для визначення енергетичних параметрів процесів ущільнення сумішей при поверхневому формуванні виробів.

Ключові слова: вібрація; ущільнення; енергетика процесу; параметри; віброплита

Вступ В сучасному будівництві значними темпами розвивається технологія створення різних об'єктів, яка потребує високого рівня продуктивності та необхідність отримання високої якості виконання процесів. Значна доля у споруджених об'єктах належить формуванню поверхневих горизонтальних поверхонь, які сягають в деяких випадках 30- 50% від загального об'єму будівельних робіт. До них відносяться перекриття, підземні технологічні приміщення, паркінги, дорожнє полотно. Технологія улаштування цих і подібних формоутворень потребує виконання таких технологічних операцій, як транспортування, укладання будівельних сумішей, їх ущільнення та загладжування. Існуюче обладнання для ущільнення не в повній мірі відповідають сучасним вимогам. Обумовлюється це тим, що досягнення заданої якості потребує відповідного вибору параметрів машин для ущільнення. Рішення проблеми є актуальною задачею і полягає в дослідженні енергетики поверхневих вібраційних плит для реалізації процесів із енергоощадними та ефективними режимами і параметрами.

Аналіз літературних джерел. Теоретичні дослідження енергії в роботі [1] ґрунтуються на основі дискретних та дискретно – континуальних моделях. Розвиток цих досліджень приведені в роботах [2],[3], які слугували основою для даних досліджень, актуальність яких обумовлена конкретними процесами улаштування асфальтобетонних та бетонних доріг.

Мета роботи. Визначення умов роботи поверхневих вібраційних плит та дослідження енергетики вібраційних машин і процесів поверхневого ущільнення бетонних виробів та будівництва доріг

Матеріали і методи. Основними матеріалами для дослідження є класичні положення механічних коливань і теорії суцільних середовищ. Основними методами, що використовуються в роботі є дискретне та дискретно-континуальне моделювання характеристик робочих органів поверхневих вібраційних плит та реологічних властивостей будівельних сумішей.

Виклад основного матеріалу. Визначення енергетики двомісної вібраційної плити для підтримання стаціонарних коливань робота зовнішньої сили повинна повертати енергію, яка втрачається за кожен період коливань, тобто умова стаціонарних коливань має вигляд енергетичного балансу вібраційної плити:

$$A_3 = A_0 \quad (1)$$

де A_3, A_0 – робота відповідно зовнішніх сил і сил опору.

Робота зовнішньої сили $F(t)$, виконаної за період коливань вібраційної плити T , що рухається зі швидкістю $\dot{x}(t)$, визначається інтегралом

$$A_3 = \int_0^T F(t) \dot{x}(t) dt \quad (2)$$

Якщо сила $F(t) = F_0 \sin \omega t$ і переміщення $x = x_0 \sin(\omega t - \varphi)$ є синусоїдними функціями часу, що мають одну і ту саму частоту ω і фазовий кут φ , то робота, що виконана за цикл коливань $T = \frac{2\pi}{\omega}$

$$A_F = \int_0^{2\pi/\omega} F_0 \sin \omega t x_0 \omega \cos(\omega t - \varphi) dt = F_0 x_0 \int_0^{2\pi} \sin \omega t \cos(\omega t - \varphi) d(\omega t). \quad (3)$$

Після проведення нескладних перетворень матимемо:

$$A_F = F_0 x_0 \cos \varphi \int_0^{2\pi} \sin \omega t \cos \omega t d(\omega t) + F_0 x_0 \sin \varphi \int_0^{2\pi} \sin^2 \omega t d(\omega t) \quad (4)$$

Перший інтеграл цього виразу дорівнює нулю, другий – π . Тоді в остаточному вигляді енергія:

$$A_F = \pi F_0 x_0 \sin \varphi \quad (5)$$

Звідси випливає, що робота за цикл пропорційна не тільки амплітуді сили і амплітуді коливань, а й синусу різниці фаз. Із формули (5) також випливає, що корисну роботу, яка йде на енергетичні витрати, здійснює складова змушувальна сила $F_0 \sin \varphi$, яка збігається за напрямком із швидкістю коливань і перебуває у протифазі з силою опору. Сили опору F_{on} для двомісної вібраційної плити знаходяться за виразом:

$$F_{on} = b(\dot{x}_1 + \dot{x}_2)$$

де x_1, x_2 – переміщення мас двомісної вібраційної плити m_1, m_2 . Тоді енергія на шляху dx , де $x = x_1 + x_2$ – деформація пружних зв'язків,

$$A = \int_0^{2\pi/\omega} b(\dot{x}_1 + \dot{x}_2) \frac{dx}{dt} dt$$

Визначивши цей інтеграл, одержимо

$$A = \pi b \omega [x_{01}^2 + x_{02}^2 + 2x_{01} + x_{02} \cos(\varphi_1 - \varphi_2)],$$

а середня потужність

$$P_{сep} = \frac{A}{\frac{2\pi}{\omega}} = \frac{1}{2} b \omega^2 [x_{01}^2 + x_{02}^2 + 2x_{01} + x_{02} \cos(\varphi_1 - \varphi_2)], \quad (6)$$

При роботі у резонансі фазові кути двомісної вібраційної плити: $\varphi_1 \approx \varphi_2 \approx \frac{\pi}{2}$. Тоді максимальне значення потужності, що реалізується в резонансному режимі:

$$\max P_{сp}^p = \frac{1}{2} b \omega^2 (x_{01} + x_{02})^2 \quad (7)$$

Виконані дослідження енергетики робочого процесу ущільнення будівельних сумішей за розрахунковими схемами (рис.1)

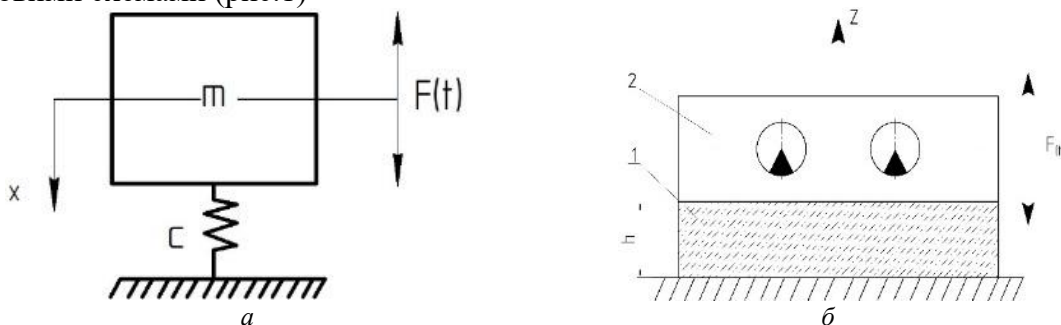


Рис.1 Розрахункові схеми «поверхнева вібраційна плита -ущільнювальна будівельна суміш»:
а- дискретна; б-дискретно-континуальна: 1-суміш; 2- вібраційна плита; х-переміщення; h- висота шару суміші;
F- змушувальна сила.

Для реалізації визначення параметрів вібраційних плит розроблено алгоритм (рис.2). Принцип роботи алгоритму полягає в наступному. Вихідні параметри для розрахунку (блок 1) обираються в залежності від конкретного виду будівельної суміші, прийнятої схеми машини. На основі цього вибір фізичної моделі ущільнюючої будівельної суміші (блок 2) та здійснюється

якісний аналіз і перевірка коректності моделі (блок 3), яка відображає реальний процес законів зміни її реологічних властивостей.

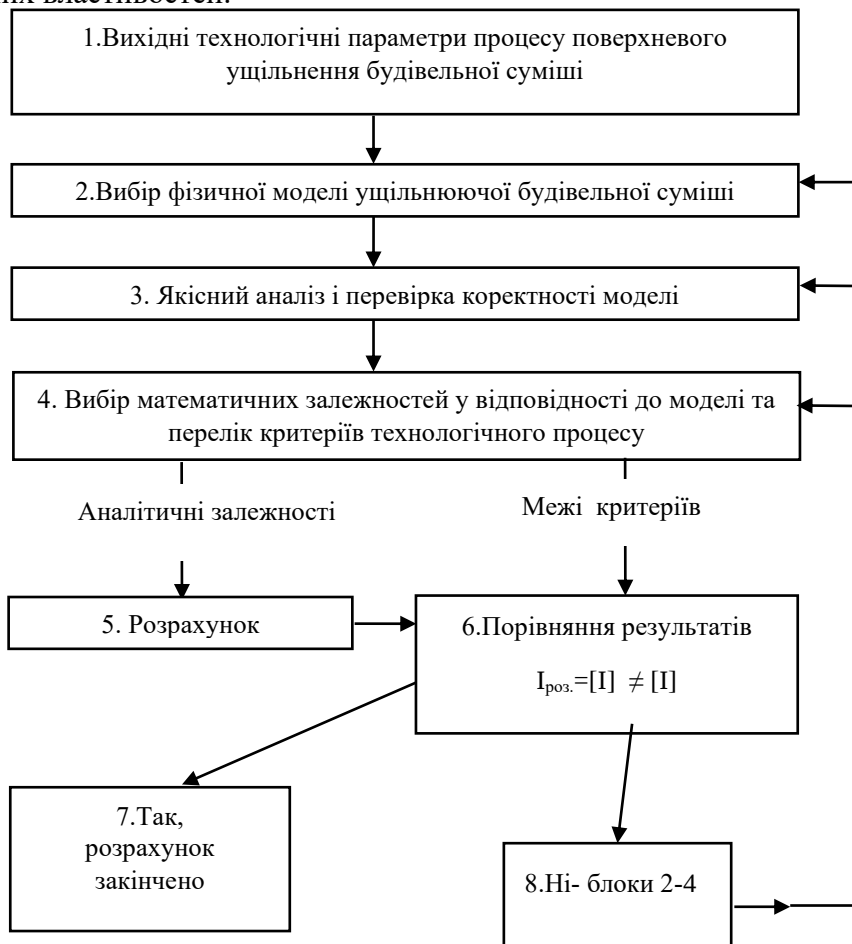


Рис. 2. Алгоритм розрахунку машин поверхневого ущільнення будівельних сумішей.

В залежності від умов та висоти ущільнюючого шару вибирається математична модель (дискретна чи дискретно- континуальна) (блок 4) і надалі паралельно здійснюється розрахунок параметрів і критерія (блок 5) та відбувається числове порівняння критеріїв ефективності технологічного процесу (блок 6). Якщо розраховані параметри задовольняють критерію енергії, розрахунок закінчено (блок 7), якщо ні (блок 8), програма переходить на блоки 2-4.

Обговорення результатів. Виконані дослідження засвідчили можливість застосування двох розрахункових схем «поверхнева вібраційна плита -ущільнювальна будівельна суміш»- дискретної та дискретно-континуальної, що визначається певними параметрами процесу. Отримані аналітичні залежності для визначення енергії досліджуваної системи, адекватність яких підтверджена експериментальними дослідженнями. Запропонована методика та аналітичні залежності для визначення енергії можуть бути використані і для інших вібраційних машин та подібних процесів.

Висновки. Досліджена енергетика вібраційних машин на основі дискретних моделей в режимах вільних та вимушених коливань. Запропоновані аналітичні залежності для визначення енергетики процесу руху вібраційних плит дали можливість встановити нові закономірності зміни витрат енергії різних режимах їх руху. Так, для двомісної системи з малим розсіюванням в разі дії сили на одну з мас при заданій амплітуді коливань цієї маси відношення амплітуд коливань в резонансному режимі визначається тільки параметрами другої маси m_2 і співвідношенням між масами m_1 і m_2 . Досліджена енергетика вібраційних машин на основі континуальних моделей в режимах вільних та вимушених коливань. Запропоновані аналітичні залежності для визначення енергетики процесу руху вібраційних систем, що відображають розсіювання енергії в різних за природою зміни будівельних сумішей дали можливість встановити нові закономірності зміни витрат енергії за континуальною моделлю.

Список використаних джерел:

1. Назаренко І. І. (2010). Прикладні задачі теорії вібраційних систем. 2-ге вид. Київ : Слово.
2. Назаренко І. І., Запривода А. В. (2021). Машини і обладнання поверхневого формування бетонних виробів : монографія. Київ : Видавництво Людмила.
3. Запривода А. В. (2024) Енергетика машин і обладнання поверхневого формування бетонних виробів: монографія. Київ: «Видавництво Людмила».

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА РУХ МАШИНИ ДЛЯ ФОРМУВАННЯ БЕТОННИХ ВИРОБІВ

Іван Назаренко, професор, доктор технічних наук, професор¹ (ORCID: 0000-0002-1888-3687),

Андрій Запривода, кандидат технічних наук, доцент¹,

Андрій Бондаренко, кандидат технічних наук, доцент²,

Володимир Слюсар, асистент¹ (ORCID: 0000-0003-4332-3144),

Олексій Погребач, аспірант¹,

¹Київський національний університет будівництва та архітектури, Київ, Україна

²Одеська державна академія будівництва та архітектури, Одеса, Україна

АНОТАЦІЯ. В роботі досліджено вплив технологічного навантаження на рух машини для формування бетонних виробів на основі гібридної дискретно – континуальної моделі. Розглянуто систему «машина – технологічне навантаження» за реалізацією гармонійних та вібраційно – ударних режимів роботи. Запропоновані аналітичні залежності для визначення

Ключові слова: технологічного навантаження; бетонні вироби; вібраційна машина; модель; гармонійні та вібраційно – ударні режими; параметри; амплітуда та частота коливань.

Аналіз існуючих досліджень. До машин, що застосовуються для формування бетонних виробів відносяться вібраційні майданчики, поверхневі, глибинні машини, вібраційні преси і установки [1]. До бетонних виробів відносяться плити перекриття, фундаментні блоки, тротуарні плити, фігурні елементи мощення, склад, вимоги до формування яких передбачені відповідними стандартами [2]. Забезпечення необхідної щільності та якості виробів і є основною вимогою при їх формуванні шляхом ущільнення бетонної суміші. Досягнення такого результату обумовлено забезпеченням таких числових значень параметрів ущільнення, як амплітуда й частота коливань та час дії процесу ущільнення.

Викладення основного матеріалу. Дослідження впливу технологічного навантаження на рух машини для формування бетонних виробів розглядається на прикладі одномасної вібраційної системи, рух якої описується таким рівнянням з теорії механічних коливань:

$$M\ddot{x} + b\dot{x} + cx = F_0 \sin \omega t, \quad (1)$$

де перший член лівої частини виражає інерційну силу, а другий і третій члени - сили опору та пружності, що діють проти руху системи. Права частина рівняння характеризує синусоїдальні коливання, викликані зовнішньою силою вібраційної системи. Рішення цього рівняння відносно амплітуди сталих коливань відоме [1]:

$$X_0 = \frac{F_0}{\sqrt{(c - M\omega^2)^2 + (b\omega)^2}} \quad (2)$$

де c - коефіцієнт пружності опор вібраційної системи; M - маса вібраційної системи, що здійснює коливання; b - коефіцієнт опору; ω - частота вимушених коливань;

F_0 – амплітуда зовнішньої сили вібраційної системи, яка для інерційного збудника коливань є рівною: $F_0 = m_0 r_0 \omega^2$, де $m_0 r_0$ - статичний момент збудника.

При роботі вібраційної системи в резонансному режимі коефіцієнти пружності та опору майже не впливають на амплітуду коливань. Тоді формула (2) за умови, що $F_0 = m_0 r_0 \omega^2$ приймає вигляд:

$$X_0 = \frac{m_0 r_0}{M}. \quad (3)$$

За умов, коли вібраційна система має технологічне навантаження у вигляді формування бетонних виробів амплітуду коливань машини в ряді робіт визначали за формулою:

$$X_0 = \frac{m_0 r_0}{M + \alpha m_e}, \quad (4)$$

де α - коефіцієнт приведення (приєднання) бетонної суміші, яка і представляє собою технологічне навантаження. Його числове значення в різних роботах приводилося в широких межах: від 0,2 до 1,0 і навіть пропонувалися від'ємні значення, тобто $\alpha < 0$. Така розбіжність числових значень коефіцієнта приведення свідчить про неадекватність такого методу для опису реальних умов врахування технологічного навантаження у вигляді процесу формування бетонних виробів. Очевидно, що достовірність розрахунку амплітуди коливань вібраційної системи із технологічним навантаженням може бути досягнута тільки на основі кількісної оцінки і визначення характеру зміни, пружних і дисипативних сил, що виникають в бетоні в процесі його формування, що було доказано в роботах [3-4]. Виявлено, що ці сили по-різному впливають на коливання системи, так як при бетону різко змінюються зі зміною геометричних розмірів виробу, складу бетону і т.д. За даними цих робіт амплітуда коливань вібраційної системи із технологічним навантаженням при моделюванні її одномасною системою має вигляд:

$$X_0 = \frac{F_0}{\sqrt{[(c_e - m_e \omega^2) - m_e \omega^2 a]^2 + (m_e \omega^2 d)^2}} \quad (5)$$

$$a = \frac{\alpha sh 2\alpha h + \beta \sin 2\beta h}{h(\alpha^2 + \beta^2)(ch 2\alpha h + \cos 2\beta h)}; d = \frac{\alpha \sin 2\beta h - \beta sh 2\alpha h}{h(\alpha^2 + \beta^2)(ch 2\alpha h + \cos 2\beta h)}. \quad (6)$$

У формулі (5) вирази a і d являються коефіцієнтами врахування технологічного навантаження при формуванні бетонних виробів. В роботі передбачено трансформацію цих коефіцієнтів для реалізації вібраційно-ударних режимів роботи із урахуванням асиметрії навантаження. Розроблені алгоритми розрахунку для параметрів коливань таких режимів, в тому числі із урахуванням установки на поверхню формуемого виробу привантаження.

Список використаних джерел

1. Назаренко І.І. (2010). Прикладні задачі теорії вібраційних систем: Навчальний посібник (2-е видання). К.: Видавничий Дім «Слово».
2. ДСТУ-Н Б А.3.1-34:2016.
3. Дєдов О., Слюсар В., Бондаренко А., Ладкін П., Погребач О. (2024). Дослідження динаміки вібраційної машини з урахуванням впливу оброблювального середовища. *Інженерія будівництва*, № 40, 18–28.
4. Nazarenko I., Zaprivoda A., Bondarenko A., Slyusar V. (2024). Determination of energy parameters of vibrating machines for compaction and formation of concrete products according to different power form of load. *Strength of Materials and Theory of Structures*, № 113, 18–28.

ВИЗНАЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ ЗБІРНИХ ОДИНИЦЬ МАШИНИ ЗА УМОВ ДИНАМІЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Іван Назаренко, професор, доктор технічних наук, професор¹ (ORCID: 0000-0002-1888-3687),

Віктор Нечипорук, аспірант¹ (ORCID: 0009-0003-8091-2420),

Василь Марач, аспірант¹,

¹Київський національний університет будівництва та архітектури, Київ, Україна

АНОТАЦІЯ. В роботі досліджено параметри надійності збірних одиниць вібраційної системи в умовах динамічного навантаження різної природи. Показано, що показники довговічності, надійності, зносостійкості й т.п. не є однозначними функціями структури, необхідно приймати їх до уваги при переході від принципових схем до конструктивних. Виявлені умови оптимальності шуканої структури силової вібраційної системи із розглядом можливих обмежень, що накладаються при пошуку оптимальної структури. Вибір оптимальної принципової схеми вібраційної системи й визначення параметрів цієї схеми, що забезпечують екстремум критерію оптимальності, обґрунтовано шляхом використання основних положень структурного та параметричного синтезу.

Ключові слова: надійність; вібраційна система; структура; оптимальна схема; параметри; критерії; структурний; параметричний синтез.

Аналіз існуючих досліджень. Терміни та наведені основні положення надійності машин наведені в ДСТУ 2860-94 [1] та в роботі [2]. Нормування показників надійності технічних засобів наведені в роботі [3]. Питання технічної експлуатації та надійність автомобілів розглянуто в [4]. Методи підвищення надійності та довговічності деталей та вузлів машин легкої промисловості розглянуто в [5]. Результати досліджень щодо забезпечення надійності вібраційних майданчиків будівельної індустрії з урахуванням методів аналізу [6]. Аспекти вібраційної надійності, методи аналітичної оцінки функцій надійності та приклад на визначення вібраційної надійності приведено в роботі [7]. Саме зазначені результати, що приведені в роботах [6,7] послужило основою для розробки методів досліджень щодо визначення надійності збірних одиниць машини за умов динамічного навантаження.

Викладення матеріалів основного дослідження. Загальним елементом структури всякої вібраційної системи при дослідженні надійності збірних одиниць машини за умов динамічного навантаження, наприклад, під дією зовнішньої сили у машинах для ущільнення сумішей є робочий орган - коливальна частина. Тобто, у певному змісті надійність структури системи залежить від сукупності й взаємозв'язку тих елементів, які утворюють керуючу частину (статичний момент, частота і інші.) і визначають характер позитивного зворотного зв'язку, що забезпечує коливання в заданому режимі. Так, наприклад, у вібромайданчиках має місце позитивний зворотний зв'язок власне кажучи між вхідним сигналом - носієм енергії, яким є змушуюча сила і фазовими координатами робочого органу: переміщенням і швидкістю. Рівняння зворотного зв'язку, якщо воно відомо, дозволяє судити про структуру елементів машини. Більше того, можна допустити, що оптимальній структурі відповідає деякий оптимальний закон. Важливими складовими надійності, що підлягають дослідженню є оцінка наслідків відмов і граничних її станів силових вібраційних систем й їхніх параметрів, зважаються на основі математичної формалізації цього завдання. Тому в роботі розглянуто такі загальні показники надійності та ефективності, які, з одного боку, однозначно пов'язані з особливостями перетворення підведеної до системи енергії, що складають головну класифікаційну ознаку схеми, з іншого боку, для яких вдається отримати аналітичні вирази у вигляді функціоналів, що підлягають мінімізації, а також заданих у чисельному виді. Сама по собі структура (тобто сукупність і взаємозв'язок тих або інших елементів) певною мірою визначає надійність, і довговічність машини. Крім того, малоімовірне одержання якогось остаточного оптимального рішення за критеріями надійності й довговічності. Безперервна розробка нових конструктивних матеріалів і методів їхньої обробки забезпечує постійне вдосконалювання машин у плані надійності, довговічності, технологічності й т.п. Урахувати ж вимоги по надійності й довговічності можна, сформулювавши обмеження на ті динамічні характеристики, від яких залежить надійність і довговічність, причому ці обмеження можуть бути введені в групу вихідних параметрів. З погляду можливості рішення проблеми структурного синтезу теоретичний й

експериментальний аналіз машин, будучи в кожному конкретному випадку пов'язаним з певною машиною, дозволяє виявити шляхи забезпечення надійності збірних одиниць того класу машин, властивості якого відображають результати даного досліджування. При цьому завдання визначення оптимальних вібраційних систем надійності збірних одиниць машини розглянуто як задачу, що припускає послідовне рішення наступних під задач.

1. Вибір структур, у яких знайдені оптимальні рішення шляхом використання структурного синтезу, отриманого внаслідок визначення відмов збірних одиниць.

2. Визначення оптимальних динамічних параметрів обраних структур силових вібраційних систем (динамічний синтез). За складеною програмою досліджень були визначені можливості забезпечення надійності збірних одиниць машини за умов динамічного навантаження.

Список використаних джерел

1. ДСТУ 2860-94 Надійність техніки. Терміни та визначення.
2. Канарчук В. Є., Полянський С. К., Дмитрієв М. М. (2003). Надійність машин: Підручник. К.: Либідь.
3. Васілевський О. М., Поджаренко В. О. (2010). Нормування показників надійності технічних засобів. Навчальний посібник. Вінниця: ВНТУ.
4. Форнальчик Є.Ю., Олісевич М.С., Мاستикаш О.Л. та інші. (2004). Технічна експлуатація та надійність автомобілів: навч. посібник. Львів: Афіша.
5. Зенкін М.А., Піпа Б.Ф. (2004). Методи підвищення надійності та довговічності деталей та вузлів машин легкої промисловості: Підручник. К.: КНУДТД.
6. Делембовський, М., Клименко, М. (2020). Забезпечення надійності вібраційних майданчиків будівельної індустрії з урахуванням методів аналізу. Збірник наукових праць ЛОГОС, 26-286.
7. Назаренко І.І. (2010). Прикладні задачі теорії вібраційних систем: Навчальний посібник (2-е видання). К.: Видавничий дім «Слово».

ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ РЕЗОНАНСНОЇ ВІБРАЦІЙНОЇ МАШИНИ

Іван Назаренко, професор, доктор технічних наук, професор¹ (ORCID: 0000-0002-1888-3687),

Петро Ладкін, аспірант¹,

¹Київський національний університет будівництва та архітектури, Київ, Україна

АНОТАЦІЯ. В роботі досліджено параметри резонансної вібраційної машини на основі розрахункової моделі, яка при її використанні в розрахунках забезпечує заданий технологією режим та параметри робочого процесу. Обумовлено це тим, що розрахункова модель базується на сучасних положеннях теорії механічних коливань, що відображає рух вібраційної машини та теорії суцільних середовищ, яка розкриває сутність руху систем з розподіленими параметрами, до яких відносяться більшість сумішей, що ущільнюються.

Ключові слова: вібраційна машина; резонанс; процес; будівельна суміш; режими та параметри ущільнення; амплітуда та частота коливань аналіз; синтез.

Аналіз існуючих досліджень. Вібраційні машини широко використовуються в різних процесах для подрібнення [1], сортування [2], перемішування матеріалів [3], ущільнення сумішей [4] та обробки матеріалів [5]. Основними класифікаційними ознаками вібраційних машин є призначення, що відмічене вище та режим роботи. За режимом розрізняють машини з резонансним та за резонансним режимом роботи [1]. Машини із за резонансним режимом роботи характеризуються стійким режимом, але є енерговитратними. Резонансні вібраційні машини значно менш витрачають енергії на свій рух, але є більш чутливими до можливих змін параметрів руху при зміні навантажень та конструктивною складністю своєї будови. Разом з тим, необхідна сучасна вимога до намагання економії енергії, спонукає використання резонансних машин як, більш енергоощадних. Тому в роботі здійснюються дослідження параметрів резонансної вібраційної машини, що є актуальною задачею.

Викладення основного матеріалу. До резонансних вібраційних машин відносяться резонансні вібромайданчики для формування залізобетонних виробів; віброударні машини для ущільнення ґрунтів; вібромолоти для забивання в ґрунт металевого шпунта, залізобетонних паль,

для занурення в ґрунт і витягання з нього металевих труб для геологорозвідувальних і деяких інших спеціальних робіт; вібраційні грохоти для сепарації сипких матеріалів; віброконвейери для транспортування сипких матеріалів; живильники для рівномірної подачі сипких матеріалів; водопідіймальні і перемішуючі пристрої та ін. Ці резонансні машини можуть бути лінійні або нелінійні і працюють поблизу одного з максимумів своїх амплітудно-частотних характеристик. З числа нелінійних резонансних вібраційних машин слід виділити в окрему групу машини з кусочно - лінійними характеристиками, тобто машини з пружними обмежувачами, які отримали широке поширення, як правило, їх називають резонансними ударно-вібраційними машинами. Робота резонансних вібраційних машин з кусочно - лінійними характеристиками заснована на використанні ефекту удару, який виникає в результаті обмеження руху маси вниз, за умови, що це переміщення більше ніж зазор, передбачений між масою і обмежником коливань. У якості обмежника коливань застосовуються металеві та гумові опори. Характеристика пружних сил такої системи має злом на ділянці контакту і, як результат, маса в своєму русі різко гальмується і її рух визначається двома частинами – відривний рух маси у певному періоді часу і рух в контакті з обмежником коливань з відмінними значеннями по переміщенню маси робочого органу вібраційної машини за період її коливань. Відповідно і прискорення, як другі похідні від переміщення, будуть мати суттєву відмінність між собою. В цілому нелінійна динамічна система з кусочно - лінійними характеристиками – це система, в якій можуть виникати не тільки один, а і декілька стійких періодичних режимів. Такі режими прийнято вважати багаторежимними. В нелінійних системах багаторежимність проявляється у вигляді субгармонійних і супергармонійних коливань, які формуються на основі вільних коливань системи, які підтримуються зовнішньою вимушеною силою. Забезпечення необхідного резонансного режиму потребує коректного врахування пружно – інерційних та дисипативних характеристик вібраційної машини і середовища, які мають різну фізичну природу за своєю структурою. В роботі застосовано підхід врахування пружно – інерційних та дисипативних характеристик, як моделі із дискретно – континуальними параметрами [1]. В результаті виконаних досліджень розроблено алгоритм визначення параметрів резонансної вібраційної машини.

Список використаних джерел

1. Міщук Є.О. (2014). Теоретичні дослідження робочого процесу вібраційної шоккової дробарки. Збірник наукових праць. Серія галузеве машинобудування, будівництво. №3 (42), 72-80.
2. Орищенко С.В. (2011). Дослідження віброгрохота з керованими параметрами. Вісник Кременчуцького державного університету імені Михайла Остроградського. № 3, 105–107.
3. Свиридюк Д.Я. (2014). Дослідження коливань вібраційного бетонозмішувача при вертикальному розташуванні барабану. Теорія і практика будівництва. №14, 6-9.
4. Назаренко І.І. (2010). Прикладні задачі теорії вібраційних систем. Навчальний посібник (2-е видання). К.: Видавничий Дім «Слово».
5. Ivan Nazarenko, Oleg Dedov, Iryna Bernyk, Ivan Rogovskii, Andrii Bondarenko, Andrii Zapryvoda, Volodymyr Slipetskyi, Liudmyla Titova. (2020) Determining the regions of stability in the motion regimes and parameters of vibratory machines for different technological purposes. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Vol 6, No 7 (108). P. 71–79. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.217747>

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІ УЛЬТРАЗВУКОВІ КАВІТАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ОБРОБКИ ТЕХНОЛОГІЧНИХ СЕРЕДОВИЩ

Ірина Берник, доцент, д.т.н., професор ¹(ORCID: 0000-0002-1367-3058),

Ігор Драчук, аспірант¹

¹Національний університет біоресурсів і природокористування, вул. Героїв Оборони, 15, 03041, м. Київ, Україна

Анотація. В роботі досліджені ультразвукові кавітаційні технології обробки технологічних середовищ, моделюючи їх реальну поведінку системами з розподіленими та дискретними параметрами. Саме такий підхід надає можливість розкрити фізичну сутність процесів, розглядаючи стадії створення, розвиток та сплескування бульбашок у вигляді потоку необхідної енергії, яка має забезпечувати швидкодію, як основного критерія реалізації енергоефективності. Важливим аспектом також є різнохарактерна дія у часі, визначені та розподілу енергії в залежності від фізико-механічних властивостей технологічних середовищ. Прийнято, що їхні реологічні властивості, особливо в'язкість, являються домінуючими при виборі розрахункової моделі та визначені енергетичних параметрів. У якості інтегральних енергетичних параметрів прийнято питома енергія на одиницю площі контакту кавітаційного апарату із середовищем на початковій стадії процесу і питома енергія на одиницю об'єму на стадіях розвитку та сплескування бульбашок. Розроблено алгоритм реалізації такого підходу, використання якого є процесом забезпечення енергоефективних технологій обробки різних технологічних середовищ.

Ключові слова: ультразвук; кавітація; технологія; система; дискретна; континуальна; середовище; процес; стадія; бульбашка; енергоефективність; параметри; енергія; інтенсивність; частота; амплітуда

Вступ. Енергоефективні ультразвукові кавітаційні технології обробки технологічних середовищ є перспективним та прогресивним напрямом досліджень та застосування у різних виробництвах, в тому числі в харчових та хімічних. Ультразвук впливає всі відомі процеси хімічних виробництв. Ця дія може мати різний характер: - стимулюючий, у тих випадках, коли ультразвукові коливання є рушійною силою процесу (наприклад, при реалізації звукохімічних реакцій, акустичному диспергуванні та видаленні відкладення з теплообмінних поверхонь); - інтенсифікуючий, у випадках, коли коливання лише збільшують швидкість процесу (наприклад, при акустичному розчиненні, емульгуванні, екстрагуванні, дегазації); - оптимізуючий, у тих випадках, коли акустичні коливання впорядковують перебіг процесу (наприклад, при стимуляції росту бактерій, кристалізації, акустичній грануляції та акустичному центрифугуванні, дрібнодисперсному розпиленні). Разом з тим в зазначених процесах є важливий аспект, що пов'язаний із визначенням та оцінкою потоків енергії на основі дослідження ультразвукової кавітаційної технології обробки технологічних середовищ, моделюючи їх реальну поведінку системами з розподіленими та дискретними параметрами.

Аналіз існуючих досліджень та викладення основного матеріалу. Впровадження експериментальних методів виробництва водню за допомогою ультразвуку приведено в роботі [1]. Робота [2] присвячена експериментальному дослідженню механізму розвитку ультразвукової кавітації та оптимізація моделі RUREMM на циліндричній поверхні. В роботі [3] розглянуто параметричний огляд сонохімії: контроль та збільшення сонохімічної активності у водних розчинах. Визначення впливу кавітаційної бульбашки на дисперсію магнітореологічної полірувальної рідини при ультразвуковій обробці присвячена робота [4]. Дослідження дискретно-імпульсного впливу на енергозабезпечення при переробці молока та молочних продуктів здійснено в роботі [5]. В роботі [6] здійснена оцінка ефективності ультразвукової кавітаційної обробки технологічних середовищ за енергетичними критеріями. Дослідження процесів енергетичної взаємодії акустичного апарату з технологічним середовищем обробки та визначення параметрів та режимів роботи кавітаційного апарату з урахуванням впливу оброблюваного матеріалу приведено в роботах [7,8]. Динамічні процеси в технологічних технічних системах досліджені та запропоновані практичні результати в роботі [9]. Застосування ультразвукового кавітаційного обладнання з рідинним трансформатором тиску запропоновано в роботі [10]. Результати дослідження процесів акустичної кавітаційної технології для обробки дисперсних середовищ в роботі [11]. Аналіз та оцінка параметрів впливу на формування моделі акустичної обробки рідинних харчових середовищ наведено в роботі [12]. Робота [13] присвячена інтенсифікації технологічних процесів обробки харчових середовищ. Встановлення основних параметрів впливу технологічного середовища на робочий процес

ультразвукової кавітаційної обробки здійснено в роботі [14]. Виконаним аналізом розглянутих робіт варто зазначити значний внесок в розвиток теорії і практики ультразвукової кавітаційної технології обробки технологічних середовищ, а результати роботи [6-9], а також наведені дослідження в роботах [10-14] являються передумовою для подальших досліджень розробки та впровадження енергоефективних технологій.

За кавітаційного впливу відбувається трансформація енергії звукового поля у високу щільність енергії всередині бульбашки, з наступним її сплескуванням. Як наслідок, утворення ударних хвиль, підвищення температури, сонолюмінесценція, утворення вільних радикалів та ін. Оскільки, під час даного виду обробки відбувається зміна реологічних властивостей технологічного середовища, розробка моделі для визначення параметрів акустичної обробки та енергії потребує врахування таких змін. Ефективна реалізація технологічних процесів за кавітаційної обробки потребує врахування силових та енергетичних параметрів, а також властивостей середовища (рис. 1).

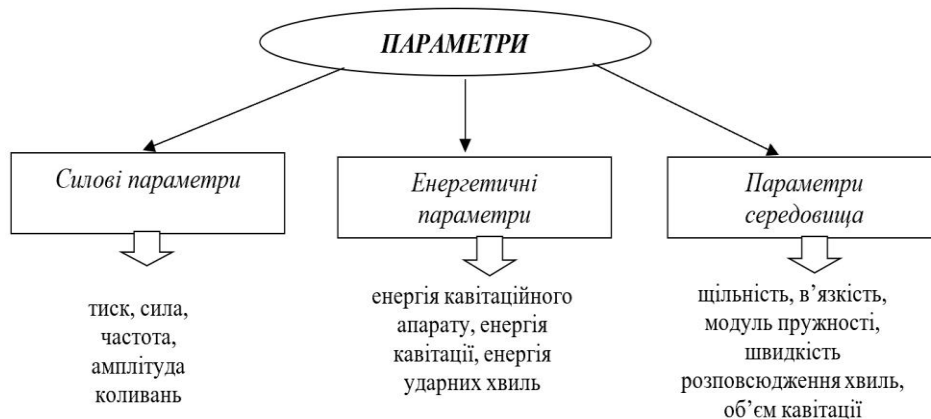


Рис.1. Параметри впливу на кавітаційний процес

Запропоновано функціональні залежності, в яких враховано вплив на кавітаційний процес, як акустичних параметрів середовища, так і реологічних властивостей оброблюваних технологічних середовищ. При цьому інтегральними параметрами являються енергія, інтенсивність, потужність. Ультразвукова енергія від випромінюючої поверхні ультразвукового апарату до середовища має кілька стадій перетворення (рис. 2).

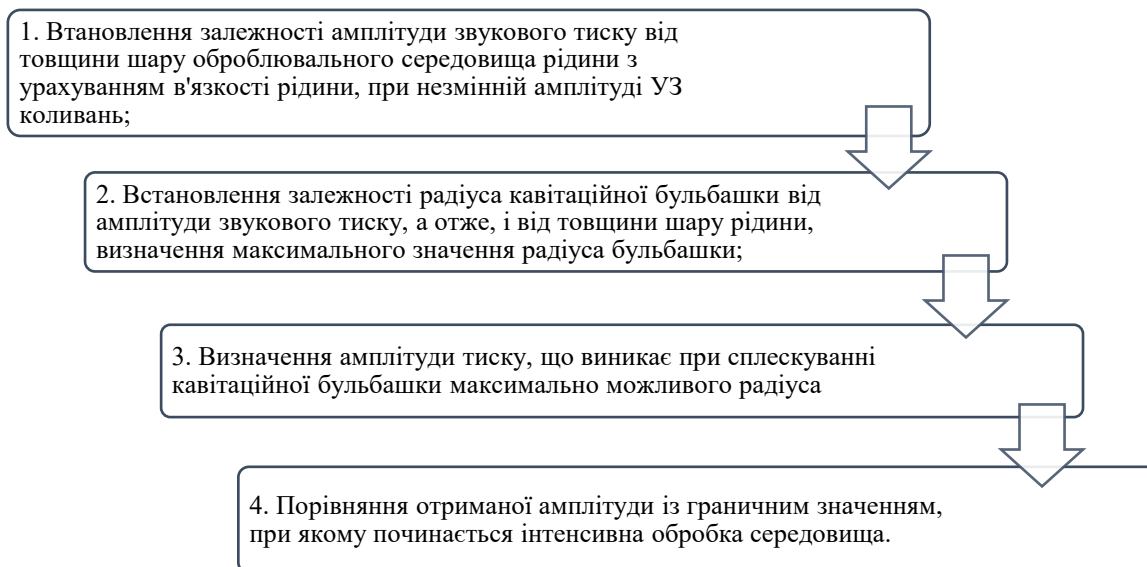


Рис.2. Основні етапи процесу

Таке множинне перетворення енергії ультразвукових коливань потребує системного підходу при встановленні оптимальних режимів обробки технологічного середовища.

Висновки.

1. Визначена низка критеріїв та ключових параметрів, використання яких пропонується у якості оцінки в алгоритмах розрахунку в залежності від тих чи інших відомих вихідних даних кавітатора та середовища.
2. Основна низка критеріїв передбачає оцінку енергетики процесу, як ключової характеристики, так і врахування можливих змін ключових параметрів від стадії зародження бульбашок до кінцевої стадії – сплескування бульбашок.
3. У якості інтегральних енергетичних параметрів прийнято питома енергія на одиницю площі контакту кавітаційного апарату із середовищем на початковій стадії процесу і питома енергія на одиницю об'єму на стадіях розвитку та сплескування бульбашок.
4. Застосування того чи іншого критерію обумовлено типом технологічного середовища, його властивостями та режимом і параметрами акустичної хвильової системи.

Список використаних джерел

1. Sharifishourabi, M., Dincer, I., Mohany, A. (2024). Implementation of experimental techniques in ultrasound-driven hydrogen production: A comprehensive review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 62, 1183–1204. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.03.013>
2. Tong, W., Li, L. (2024). Experimental Research of Ultrasonic Cavitation Evolution Mechanism and Model Optimization of RUREMM on Cylindrical Surface. *Processes*, 12 (5), 884. <https://doi.org/10.3390/pr12050884>.
3. Wood, R. J., Lee, J., Bussemaker, M. J. (2017). A parametric review of sonochemistry: Control and augmentation of sonochemical activity in aqueous solutions. *Ultrasonics Sonochemistry*, 38, 351–370. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.03.030>
4. Guo, C., Liu, J., Li, X., Yang, S. (2021). Effect of cavitation bubble on the dispersion of magnetorheological polishing fluid under ultrasonic preparation. *Ultrasonics Sonochemistry*, 79, 105782. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105782>
5. Drożdżel, P., Vitenko, T., Voroshchuk, V., Narizhnyy, S., Snizhko, O. (2021). Discrete-Impulse Energy Supply in Milk and Dairy Products Processing. *Automotive engineering*. <https://doi.org/10.20944/preprints202103.0308.v1>.
6. Bernyk I. (2020). Estimation of efficiency of ultrasonic cavitation processing of technological media on energy criteria. *Mechanics and Advanced Technologies*. № 2 (89). 18–28. DOI: <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2020.89.211146>.
7. Bernyk I. (2018) Investigation of the processes of the acoustic apparatus with the processing technological environment power interaction. *Mechanics and Advanced Technologies*. Т. 1. № 82. 72–80. DOI: <http://dx.doi.org/10.20535/2521-1943.2018.82.127128>
8. Bernyk, I., Nazarenko, I., Zapryvoda, A., Ruchynskyi, M., Bolharova, N., & Nesterenko, T. (2024). Identifying the parameters and operation modes of the cavitation apparatus taking into account the influence of the processing material. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(7 (131), 34–43. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.314141>
9. Nazarenko, O. Dedov, I. Bernyk, A. Bondarenko, A. Zapryvoda, M. Nazarenko et. al. (2021) Dynamic processes in technological technical systems: monograph. Kharkiv: PC Technology Center.
10. Movchanyuk, A., Luhovskyi, O., Fesich, V., Sushko, I., Lashchevska, N. (2020). Ultrasonic Cavitation Equipment with a Liquid Pressure Transformer. *Advances in Hydraulic and Pneumatic Drives and Control*, 282–292. https://doi.org/10.1007/978-3-030-59509-8_25.
11. Nazarenko I., Bernyk I. (2021) Research of the processes of acoustic cavitation technology for processing dispersed media. *Dynamic processes in technological technical systems*. 94–109.
12. Bernyk I.M. (2014) Intensyfikatsiia tekhnolohichnykh protsesiv obrobky kharchovykh seredovyshch [Analysis of the parameters influencing the formation of the model of acoustic processing of liquid food media]. *Naukovi pratsi Odeskoi natsionalnoi akademii kharchovykh tekhnolohii. Seriiia «Tekhnichni nauky» - Scientific works of the Odessa National Academy of Food Technologies. Series "Technical Sciences"*, 45, Т. 2, 129–133.
13. Bernyk I.M. (2013) Intensyfikatsiia tekhnolohichnykh protsesiv obrobky kharchovykh seredovyshch [Intensification of technological processes for processing food media]. *Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh - Vibrations in engineering and technology*, № 3 (71), 109–115.
14. Luhovskyi O.F., Bernyk I.M. (2014) Vstanovlennia osnovnykh parametriv vplyvu tekhnolohichnoho seredovyshcha na robochyi protses ultrazvukovoi kavitatsiinoi obrobky [Establishing the main parameters of the influence of the technological environment on the working process of ultrasonic cavitation treatment]. *Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh - Vibrations in engineering and technology*, № 3 (75), 21–126.

ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ НЕЛІНІЙНИХ ВІБРАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Микола Ручинський, професор, кандидат технічних наук¹ (ORCID: 0000-0002-9362-292X),

¹Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект повітряних сил 31, 03037, Україна

АНОТАЦІЯ. Однією із нелінійних є система яка має параметри, що періодично змінюються. В таких системах за певних умов може відбуватися виникнення параметричних коливань. В роботі розглядається рішення для визначення коефіцієнта впливу середовища на динаміку віброударної машини.

Ключові слова: вібраційні машини, робочий орган, коливання, деформація, форма, хвильовий коефіцієнт.

Вступ. Вібраційні машини, динаміка яких розглядається у сукупності з оброблюваним середовищем, прийнято називати вібраційними системами [1]. Вібраційні машини широко використовуються в різних галузях промисловості: гірничорудної (дроблення, сортування, транспортування), будівельної (дроблення, сортування, ущільнення), хімічної (подрібнення, сепарація), тощо.

Особливістю роботи цього класу машин є їхня суттєва чутливість до впливу середовища при виконанні того чи іншого процесу [2]. Значною мірою це стосується віброударних машин, які все більше використовуються в промисловості. У роботі пропонується метод обліку середовища, що обробляється, заснований на визначенні контактної сили за методом, наведеним у роботі [2].

Математична модель вібросистеми. Будемо вважати, що контактна зона (зона взаємодії робочого органу вібромашини і середовища) рухається по закону (рис.1), де X_1 і X_2 – напіврозмахи коливань робочого органу в певний час періоду коливань. Виходячи з прийнятих пропозицій, будемо мати:

$$x(t) = \begin{cases} x_1 \sin\left(\frac{\pi}{\tau_1} \cdot t\right), & 0 \leq t \leq \tau_1; \\ -x_2 \sin\left(\frac{\pi}{\tau_2} \cdot t\right), & \tau_1 \leq t \leq \tau_2. \end{cases} \quad (1)$$

Тут τ_1 , τ_2 – відповідно час, який втрачається на рух системи, коли порушений контакт між формою і виробом і час, коли форма і виріб рухаються спільно.

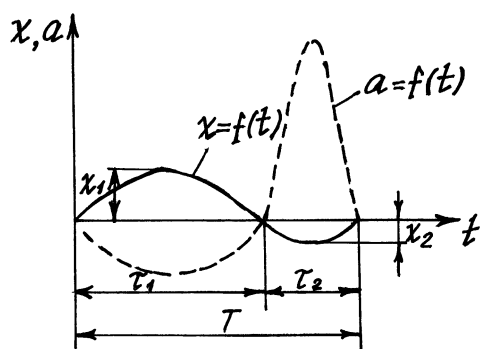


Рис.1 Закон коливань контактної зони

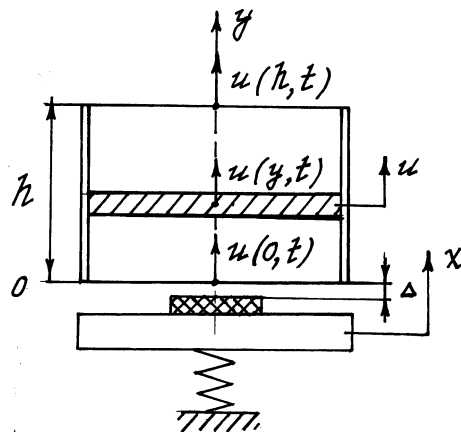


Рис. 2. Розрахункова схема вібромашини для визначення хвильових явищ в середовищі

Очевидно, що $\tau_1 + \tau_2 = T$ - період коливань. В загальному вигляді контактна сила:

$$F_k = \sigma_k \cdot S \quad (2)$$

де σ_k - контактний тиск (H/m^2); S - контактна площа (m^2). Силу (2) можна представити як

$$F_k = -E_\delta \cdot S \frac{\partial u}{\partial y} \Big|_{y=0}, \quad (3)$$

де E_δ - модуль пружності середовища; $\partial u / \partial y$ - деформація середовища в контактній зоні.

При віброударному русі важливою характеристикою є прискорення. Тому з іншого боку контактну силу можна з деяким наближенням визначити як

$$F_k = m'_\delta \ddot{y}|_{y=0}, \quad (4)$$

де m'_δ - маса бетону, що визначає інерційні властивості при прискоренні контактної зони.

Таким чином, визначення контактної сили потребує знаходження деформації $\partial u / \partial y$ чи прискорення $\ddot{y}$. В будь-якому випадку необхідно прийняти рівняння руху середовища і на основі цього визначити контактну силу, а потім і параметри, які входять в рівняння руху.

Хвильове рівняння коливань середовища приймаємо у вигляді [2]:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = \frac{\rho}{(E' + iE'')} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (5)$$

де $u(y, t)$ - переміщення поточного розрізу шару суміші в напрямку дії сили, яке залежить від координати y і часу t ; ρ - щільність середовища; E' , E'' - складові комплексного модуля пружності; i - уявна одиниця, яка вказує на зсув на $\pi/2$ між E' і E'' .

Фізичний зміст комплексних складових полягає в їх відповідності пружним (E') и непружним (E'') властивостям; $\partial^2 u / \partial t^2$ - прискорення контактного шару суміші. Якщо взяти до уваги, що

$\ddot{y}|_{y=0} = \left. \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \right|_{y=0}$ то рівняння (5) можна записати у вигляді:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \ddot{y}|_{y=0} = \left(\frac{E' + iE''}{\rho} \right) \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \Big|_{y=0} \quad (6)$$

Якщо підставити вираз для прискорення (6) в (4) і враховуючи (3), будемо мати, що

$$m'_\delta = \frac{-E \cdot S \frac{\partial u}{\partial y} \Big|_{y=0}}{\left(\frac{E' + iE''}{\rho} \right) \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \Big|_{y=0}} \quad (7)$$

Таким чином, задача визначення m'_δ полягає в знаходженні деформації $\partial u / \partial y$ та прискорення $\partial^2 u / \partial y^2$ при прийнятих значеннях середовища – щільності ρ та модуля E .

Для рішення цієї задачі будемо вважати, що рух системи (див.рис.2) має вигляд:

$$u(y, t) = (A_1 \cdot e^{iky} + A_2 \cdot e^{-ky}) \cdot e^{i\omega t}, \quad (8)$$

де A_1 і A_2 - постійні, які визначаються із граничних умов;

- комплексне хвильове число:

$$K = \omega / c \cdot (\mu + i\nu), \quad (9)$$

де μ і ν - коефіцієнти, які знаходяться шляхом підставлення (8) в (5):

$$\mu = \sqrt{\frac{\sqrt{1+\gamma^2}-1}{2(1+\gamma^2)}}, \quad (10)$$

$$\nu = \sqrt{\frac{\sqrt{1+\gamma^2}+1}{2(1+\gamma^2)}}.$$

Залежність (10) отримана при умові, що комплексний модуль пружності має вираз:

$$E^* = E' + iE'' = E \cdot (1 + i\gamma), \quad (11)$$

де E - дійсний модуль пружності, а γ - коефіцієнт втрат, який визначає відношення розсіяної енергії в об'ємі суміші ΔW за період коливань до потенційної енергії W : $\gamma = \frac{1}{2\pi} \cdot (\Delta W / W)$

Залежність (9) можна спростити, якщо прийняти до уваги, що в практичних умовах $\gamma \leq 0,4$, то після підрахунків (10) будемо мати:

$$\mu = \gamma/2; \quad \nu = 1. \quad (12)$$

Тоді комплексне хвильове число (9):

$$K = \omega/c \cdot \left(\gamma/2 + 1 \right). \quad (13)$$

Необхідні значення деформації і її похідної. Зараз є можливість визначити необхідні значення деформації і її похідної.. Із (8) визначаємо деформацію:

$$\left. \frac{\partial u}{\partial y} \right|_{y=0} = \omega/c \cdot \left(\gamma/2 + i \right) \cdot [A_1 - A_2]$$

А якщо врахувати, що зверху деформації, як і тиск, відсутні:

$$\left. \frac{\partial u}{\partial y} \right|_{y=0} = 0, \text{ то } A_1 \cdot e^{h(\alpha+i\beta)} - A_2 \cdot e^{-h(\alpha+i\beta)}.$$

Звідки

$$A_1/A_2 = e^{-2h(\alpha+i\beta)} \quad (14)$$

де $\omega/c \cdot (\gamma/2) = \alpha$; $\omega/c = \beta$.

Вираз похідної від деформації (14):

$$\left. \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right|_{y=0} = (\alpha + i\beta) \cdot (A_1 + A_2). \quad (15)$$

Після підстановки (14), (15) в (7) і нескладних перетворень будемо мати:

при $0 \leq t \leq \tau_1$:

$$m'_\delta = \frac{2 \cdot \rho \cdot S \cdot t \cdot h \cdot [h \cdot (\alpha + i\beta)] \cdot \tau_1}{(\alpha + i\beta) \cdot (\tau_1 + \tau_2)} \quad (16)$$

при $\tau_1 \leq t \leq \tau_2$:

$$m'_\delta = \frac{2 \cdot \rho \cdot S \cdot t \cdot h \cdot [h \cdot (\alpha + i\beta)] \cdot \tau_2}{(\alpha + i\beta) \cdot (\tau_1 + \tau_2)} \quad (17)$$

Виділивши дійсну частину в формулах (16) і (17), знайдемо в кінцевому вигляді:

при $0 \leq t \leq \tau_1$:

$$m'_\delta = \frac{2\rho \cdot c \cdot S \cdot \left[\sin\left(2\frac{\omega}{c}h\right) + \gamma/2 \cdot S \cdot h \cdot \left(\omega/c \cdot h \cdot \gamma\right) \right] \cdot \tau_1}{\left(\gamma/4 + 1\right) \cdot \left[\cos\left(2\frac{\omega}{c}h\right) + c \cdot h \left(\frac{\omega}{c}h \cdot \gamma\right) \right] \cdot (\tau_1 + \tau_2)}; \quad (18)$$

при $\tau_1 \leq t \leq \tau_2$:

$$m'_\delta = \frac{2\rho \cdot c \cdot S \cdot \left[\sin\left(2\frac{\omega}{c}h\right) + \gamma/2 \cdot S \cdot h \cdot \left(\omega/c \cdot h \cdot \gamma\right) \right] \cdot \tau_2}{\left(\gamma/4 + 1\right) \cdot \left[\cos\left(2\frac{\omega}{c}h\right) + c \cdot h \left(\frac{\omega}{c}h \cdot \gamma\right) \right] \cdot (\tau_1 + \tau_2)} \quad (19)$$

Якщо домножити і розділити (18) і (19) на висоту виробу, то ці вирази можна перетворити до вигляду:

$$m'_\delta = \left(m_\delta / \varphi \right) \cdot K_{x\delta} \cdot K_\tau, \quad (20)$$

де $\varphi = \omega \cdot h/c$; $m_\delta = \rho \cdot S \cdot h$; $K_{x\delta}$ - коефіцієнт, який враховує вплив маси по шарах середовища; K_τ - коефіцієнт, який враховує співвідношення часу τ_1 і τ_2 до періоду T . Коефіцієнт $K_{x\delta}$:

$$K_{x6} = \frac{\sin 2\varphi + \frac{\gamma}{2} \cdot S \cdot h \cdot \varphi \cdot \gamma}{\left(\frac{\gamma}{4} + 1\right) \cdot (\cos 2\varphi + c \cdot h \cdot \varphi \cdot \gamma)}, \quad (21)$$

Висновки. Таким чином, в рамках прийнятих передумов і припущень отримано точне рішення для визначення коефіцієнтів впливу середовища, що обробляється, на динаміку віброударної машини. Їх практична апробація була здійснена при створенні віброударної установки для формування фундаментних блоків [3]. Наведений принцип та методика оцінки впливу середовища на робочий орган може бути успішно застосована і при дослідженні динаміки інших типів вібромашини.

Список використаних джерел:

1. Nazarenko, I.I. (1988). *Vysokoefektyvni vibroformuvalni mashyny: Pidruchnyk* [High-performance vibroforming machines:Textbook]. Kyiv: Vyshcha shkola. [in Ukrainian].
2. Nazarenko, I.I. (2010). *Prykladni zadachi teorii vibratsiinykh system (2-e vydannia): Monohrafiia* [Applied problems of the theory of vibration systems (2nd edition):Monograph] Kyiv: Vydavnychiy Dim «Slovo». [in Ukrainian].
3. Ruchynskyi, M.M. (1999). *Metody doslidzhennia i rozrakhunku parametriv vibroustanovky dlia formuvannia fundamentnykh blokiv* [Methods of research and calculation of parameters of a vibrating machine for forming foundation blocks]. *Hirnychi, budivelni ta melioratyvni mashyny - Mining, construction and reclamation machines*, №54, 83 – 86. [in Ukrainian].

СЕКЦІЯ 5

«ПРОБЛЕМИ ВИЩОЇ ОСВІТИ У ПІДГОТОВЦІ ФАХІВЦІВ У ВОЄННИЙ ТА ПОВОЄННИЙ ЧАС»

КВАНТОВІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ТРАДИЦІЙНІ СТАНДАРТИ: НОВІ ВИМОГИ ДО ВИКЛАДАННЯ МЕТРОЛОГІЧНИХ ДИСЦИПЛІН

Ігор Косминський, доцент, к.т.н., доцент ¹ (ORCID: 0000-0003-0234-7166),

¹ Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних сил 31, 03037, Україна

АНОТАЦІЯ. Інтеграція квантових технологій у метрологію зумовлює необхідність комплексного перегляду методологічних підходів до викладання метрологічних дисциплін у контексті технічного регулювання. У даному дослідженні розглядається вплив квантових еталонів на освітній процес та надаються рекомендації щодо актуалізації навчальних програм для студентів спеціальності "Торгово-комерційна діяльність" КНУБА, з метою підготовки фахівців, здатних працювати з сучасними метрологічними системами у відповідності до оновлених технічних регламентів та стандартів.

Ключові слова: квантова метрологія; квантові еталони; метрологічна освіта; методологія викладання; стандарти SI; технічне регулювання; торгово-комерційна діяльність.

Вступ. Метрологія як наука про вимірювання зазнала істотної трансформації з появою квантових технологій. Перевизначення Міжнародної системи одиниць (SI) у 2019 році встановило фундаментальні фізичні константи як основу для визначення базових одиниць, що суттєво підвищило стабільність та точність вимірювань [1]. Така парадигмальна зміна вимагає адаптації освітніх програм, зокрема у викладанні дисципліни "Технічне регулювання" для спеціальності "Торгово-комерційна діяльність" КНУБА.

Майбутні фахівці у сфері торгівлі та комерції мають розуміти сучасні метрологічні принципи, оскільки це безпосередньо впливає на технічні регламенти, процедури оцінки відповідності та якості товарів і послуг на ринку. Квантові технології, які забезпечують вищу точність вимірювань, трансформують не лише наукові лабораторії, але й системи технічного регулювання, стандартизації та сертифікації, що є невід'ємною частиною торгово-комерційної діяльності.

Аналіз літературних джерел. В джерелі [1] пояснюється, як ревізована система SI використовує квантові стандарти, такі як константа Планка та ефект Джозефсона. Книга підкреслює необхідність включення цих принципів у навчальні програми для підготовки фахівців, які працюватимуть із високоточними вимірюваннями Introduction to Quantum Metrology. Автори [2] досліджують експериментальні та теоретичні аспекти квантової метрології, включаючи двофотонну інтерферометрію. Вона вказує на потребу в практичних заняттях для студентів, для зрозуміння застосування квантових технологій. В статті [3] пропонується стандарти для викладання квантових дисциплін, які можна адаптувати для метрології. Дослідники визначають ключові концепції, такі як квантова інформація та алгоритми, які є актуальними для квантових датчиків Teaching Quantum Informatics. Натомість в роботі [4] розглядаються фотонні системи для високоточних вимірювань, підкреслюючи роль квантових ресурсів, таких як запутаність, у метрології.

Програма Quantum Science and Engineering у Принстонському університеті включає курс QSE 501, який охоплює квантову метрологію та сучасні дослідження. Це свідчить про важливість інтеграції квантових тем у вищу освіту Quantum Science and Engineering [5].

Мета роботи. Мета дослідження полягає в тому, щоб оновити методи викладання метрологічних дисциплін у КНУБА, інтегруючи квантові технології, щоб підготувати студентів до роботи з сучасними метрологічними системами відповідно до актуальних технічних стандартів.

Матеріали і методи. Матеріали для дослідження охоплюють широкий спектр ресурсів, необхідних для глибокого розуміння теми та розробки рекомендацій. По-перше, використані наукові публікації з квантової метрології та освіти, такі як книги та статті, доступні в базах даних,

як-от Scopus та Web of Science, для вивчення теоретичних основ та практичних застосувань. По-друге, проаналізовано приклади навчальних програм від провідних установ, таких як Принстонський університет із програмою Quantum Science and Engineering (Quantum Science and Engineering [5], які вже інтегрували квантові технології, щоб адаптувати їхній досвід до потреб КНУБА.

Методи дослідження спрямовані на збирання та аналіз даних для формування обґрунтованих рекомендацій. Проведений огляд літератури для вивчення найкращих практик інтеграції квантових технологій у метрологічну освіту, спираючись на роботи, такі як стаття "Integrating Technologies in Curriculum Development" (Integrating Technologies in Curriculum Development)[6], яка підкреслює важливість використання технологій для досягнення навчальних результатів. Виконано аналіз вмісту поточних освітніх програм КНУБА [7] для виявлення прогалин, де можна інтегрувати квантові принципи, використовуючи методи контент-аналізу. Ці методи забезпечать всебічний підхід до оцінки поточного стану та розробки рекомендацій.

Виклад основного матеріалу. Майбутні фахівці у сфері торгівлі та комерції мають розуміти сучасні метрологічні принципи, оскільки це безпосередньо впливає на технічні регламенти, процедури оцінки відповідності та якості товарів і послуг на ринку. Квантові технології, які забезпечують вищу точність вимірювань, трансформують не лише наукові лабораторії, але й системи технічного регулювання, стандартизації та сертифікації, що є невід'ємною частиною торгово-комерційної діяльності.

Історично метрологія спиралася на фізичні артефакти, зокрема на прототип кілограма, якому були притаманні обмежена стабільність та відтворюваність. Запровадження квантових еталонів, включаючи атомні годинники та квантові електричні еталони, забезпечило безпрецедентну точність вимірювань. Наприклад, секунда тепер визначається через частоту надтонкого переходу атома цезію-133, досягаючи стабільності порядку 10^{-16} [8]. Квантові явища, такі як ефект Джозефсона для напруги та квантовий ефект Ґолла для опору, уможливають реалізацію одиниць SI з винятковою точністю [9]. Ці досягнення потребують переосмислення освітніх підходів з метою інтеграції квантових принципів.

Інкорпорація квантових технологій у навчальні програми з технічного регулювання для студентів спеціальності "Торгово-комерційна діяльність" КНУБА вимагає комплексного підходу. Майбутні фахівці торгово-комерційної сфери мають розуміти не лише базові принципи квантової механіки та функціонування квантових еталонів, але й їхній вплив на системи технічного регулювання, стандартизації та сертифікації.

Освітні програми повинні охоплювати такі теми, як ефект Джозефсона, квантовий ефект Ґолла та квантова інтерференція [10], а також їх застосування у контрольно-вимірювальних приладах, що використовуються для оцінки відповідності товарів технічним регламентам. Особливу увагу слід приділити практичному застосуванню квантових технологій у торгово-комерційній діяльності:

Метрологічне забезпечення торгівлі - як квантові вимірювальні системи підвищують точність вимірювань маси, об'єму та інших параметрів товарів.

Вплив на технічні регламенти - як підвищена точність вимірювань змінює вимоги технічних регламентів та процедури оцінки відповідності.

Квантові технології в системах захисту від фальсифікації - застосування квантової криптографії для захисту товарів та документації.

Практичні навички з експлуатації сучасних квантових вимірювальних пристроїв, таких як квантові сенсори та симулятори, мають формуватися через лабораторні заняття [4]. Це забезпечить підготовку випускників, здатних ефективно працювати у сфері торгово-комерційної діяльності з урахуванням новітніх вимог технічного регулювання.

Імплементация квантовой метрологии в образовательный процесс подготовки специалистов торговой-комерческой деятельности КНУБА требует развитой инфраструктуры та специфического подхода. Для эффективного преподавания дисциплины "Техническое регулирование" необходимы:

Специализированные лаборатории - оснащенные не только традиционными измерительными приборами, а и демонстрационными моделями квантовых сенсоров та систем, что используются в торговле та коммерции.

Міждисциплінарні навчальні матеріали - які пов'язують принципи квантової метрології з практичними аспектами технічного регулювання у торгово-комерційній сфері, включаючи кейси з реального бізнесу [11].

Програми стажування - у метрологічних центрах, органах сертифікації та на підприємствах, що впроваджують квантові технології для контролю якості продукції.

Співпраця КНУБА з провідними науково-дослідними установами та участь у міжнародних проєктах можуть суттєво підвищити якість підготовки фахівців. Корисним буде вивчення досвіду програми "Квантові вимірювальні технології" у Харківському національному університеті радіоелектроніки [12] з адаптацією її елементів до потреб спеціальності "Торгово-комерційна діяльність".

Особливу увагу слід приділити розробці практикумів з оцінки відповідності товарів з використанням високоточних квантових вимірювальних систем та формуванню навичок роботи з технічними регламентами, що враховують можливості сучасної квантової метрології.

Обговорення. Стрімкий розвиток квантових технологій докорінно змінює метрологію та системи технічного регулювання, що зумовлює необхідність суттєвого оновлення освітніх структур для спеціальності "Торгово-комерційна діяльність" КНУБА. Викладання дисципліни "Технічне регулювання" має еволюціонувати, щоб забезпечити студентів поєднанням теоретичних знань у галузі квантової метрології та практичних навичок їх застосування у торгово-комерційній сфері.

Висновки. Для ефективного впровадження оновленого підходу до викладання у КНУБА пропонується:

Оновити навчальні програми - інтегрувати модулі з квантової метрології до курсу "Технічне регулювання", з акцентом на їх практичне застосування у торгівлі.

Розробити спеціалізовані методичні посібники - які пояснюють зв'язок між квантовими технологіями та сучасними технічними регламентами, процедурами оцінки відповідності.

Запровадити систему тренінгів - для викладачів КНУБА з метою підвищення їхньої кваліфікації у сфері квантової метрології та технічного регулювання.

Налагодити співпрацю - з Національним науковим центром "Інститут метрології" та провідними підприємствами, що впроваджують квантові технології.

Впровадження цих заходів у КНУБА забезпечить підготовку висококваліфікованих фахівців торгово-комерційної діяльності, які матимуть конкурентну перевагу на ринку праці завдяки розумінню сучасних метрологічних систем та їх впливу на технічні регламенти і стандарти якості.

Список використаних джерел:

1. Nawrocki, W. (2019). Quantum Voltage Standards. In: Introduction to Quantum Metrology. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-19677-6_4
2. David S. Simon, Gregg Jaeger, Alexander V. Sergienko (2017) Quantum Metrology, Imaging, and Communication. Springer Cham. https://qsis.sjtu.edu.cn/_local/0/F8/0E/A3732BFCE4FE1701E476A7DC6F1_DC98E06B_61BBFE.pdf
3. Giulia Paparo, Regina Finsterhoelzl, Bettina Waldvogel, Mareen Grillenberger (2023). Teaching Quantum Informatics at School: Computer Science Principles and Standards. Conference: 16th International Conference on Informatics in Schools, ISSEP 2023, Local Proceedings (ISSEP2023)At: Lausanne, Switzerland, 23-25 October 2023. https://www.researchgate.net/publication/375611190_Teaching_Quantum_Informatics_at_School_Computer_Science_Principles_and_Standards
4. Emanuele Polino, Mauro Valeri, Nicolò Spagnolo, Fabio Sciarrino (2020). Photonic quantum metrology. AVS Quantum Sci. 2, 024703. <https://doi.org/10.1116/5.0007577>
5. Quantum Science and Engineering. Graduate School. URL: <https://gradschool.princeton.edu/academics/degrees-requirements/fields-study/quantum-science-and-engineering> (date of access: 06.05.2025).
6. Achor, Emmanuel Edoja, Integrating Technologies in Curriculum Development (January 30, 2022). Journal of Curriculum and Instruction, 13(1&2), 2022, 4-33, Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=4468514>
7. Спеціальності та освітні програми - Київський національний університет будівництва і архітектури. Київський національний університет будівництва і архітектури. URL: <https://www.knuba.edu.ua/specialty-and-educational-programs/> (дата звернення: 06.05.2025). [in Ukrainian].
8. Fladvad, M., & Onnela, T. (2020). Influence of jaw crusher parameters on the quality of primary crushed aggregates. *Minerals Engineering*, 151, 106338. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106338>.
9. Квантова метрологія e-Learning НУ "Чернігівська політехніка". URL <https://eln.stu.cn.ua/enrol/index.php?id=4879> (дата звернення: 06.05.2025) [in Ukrainian].

10. Інформаційно-обчислювальний центр – Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут". URL: <https://web.kpi.kharkov.ua/infiz/wp-content/uploads/sites/59/2024/10/VP-1.4-Osnovy-kvantovoi-metrologii-.pdf> (дата звернення: 06.05.2025). [in Ukrainian].
11. Основи квантової термометрії / Б. Стадник, С. Яцишин // Вимірювальна техніка та метрологія . - 2016. - Вип. 77. - С. 40-47. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/metrolog_2016_77_8 [in Ukrainian].
12. Квантове зондування: майбутнє точних вимірів. blog.colobridge.net. URL: <https://blog.colobridge.net/uk/2024/10/quantum-sensing-the-future-of-precision-measurements-ua/> (дата звернення: 06.05.2025). [in Ukrainian].
13. Загальний каталог вибіркового навчальних дисциплін | ХНУРЕ - Харківський національний університет радіоелектроніки. NURE. URL: <https://nure.ua/zagalnij-katalog-vibirkovih-navchalnih-disciplin> (дата звернення: 06.05.2025). [in Ukrainian].

НЕПЕРЕРВНА ІННОВАЦІЙНА ОСВІТА ЯК СТРАТЕГІЧНИЙ ЧИННИК РОЗВИТКУ ЛЮДСЬКОГО КАПІТАЛУ

Петро Куліков, д.е.н., професор, голова Вченої ради КНУБА, професор кафедри економічної теорії, обліку та оподаткування¹, (ORCID: 0000-0002-7379-7968),

Юрій Єсаулов, аспірант кафедри економічної теорії, обліку та оподаткування¹,

¹Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, проспект Повітряних Сил, 31, 03037, Україна

АНОТАЦІЯ. В умовах становлення економіки знань та прискореної технологічної еволюції обґрунтовано зростаючу роль неперервної інноваційної освіти як ключового фактору формування конкурентоспроможного людського капіталу. Розкрито сутність концепції неперервної інноваційної освіти як стратегічного інструменту розвитку адаптивного, мобільного та креативного людського потенціалу. Проаналізовано ключові функції неперервної інноваційної освіти з позицій стратегічного управління розвитком людського капіталу, серед яких адаптаційна, мобілізаційна, інтеграційна, продуктивна, інноваційна, гносеологічна та прогностична. Підкреслено, що розвиток неперервної інноваційної освіти є відповіддю на тенденції глобальної суспільної трансформації. Її імплементація повинна стати пріоритетом національної політики в галузі освіти та зайнятості, орієнтованої на формування гнучкої, інноваційно-орієнтованої та соціально відповідальної особистості, здатної до ефективної самореалізації в умовах економіки знань.

Ключові слова: неперервна інноваційна освіта; людський капітал; економіка знань; стратегічне управління; функції освіти; технологічна еволюція; трансформація економіки.

Вступ. У сучасних умовах становлення економіки знань та стрімкої технологічної трансформації освіта відіграє ключову роль у формуванні конкурентоспроможного людського капіталу, що є стратегічним ресурсом національного розвитку. Глобальні трансформаційні процеси, зокрема цифровізація, поширення інноваційних практик та зростання ролі інтелектуального ресурсу, актуалізують потребу в оновленні парадигми розширеного відтворення людського капіталу та освітніх моделей. Відтак, концепція неперервної інноваційної освіти постає не лише як відповідь на сучасні потреби, а як дієвий інструмент забезпечення адаптивності, мобільності та креативності робочої сили. Така освіта інтегрує принципи навчання упродовж життя (lifelong learning), поєднуючи традиційні освітні формати з цифровими технологіями, мобільними платформами, змішаним і дистанційним навчанням, мікрокваліфікаціями та індивідуалізованими траєкторіями формування компетентностей. У цьому контексті неперервна інноваційна освіта набуває особливого значення як механізм активізації людського капіталу, підвищення його продуктивності, інноваційного потенціалу та економічної стійкості у динамічному середовищі.

Аналіз літературних джерел. Проблематика неперервної освіти в контексті формування й розвитку людського капіталу розглядається у працях як вітчизняних, так і зарубіжних дослідників. У сучасних умовах інноваційної економіки освіта трактується не лише як базовий елемент соціалізації особистості, а як стратегічний інструмент економічного зростання, що забезпечує постійне оновлення знань і навичок упродовж життя. Такий підхід узгоджується з концепцією сталого розвитку та політикою інвестицій у людський капітал. Так, Агафонова М.В. у своєму дослідженні обґрунтовує роль неперервної інноваційної освіти в реалізації Національної економічної стратегії до 2030 року, виокремлюючи системну модернізацію освітньої політики як

довгостроковий пріоритет державного управління [1, с. 18]. Авторка акцентує увагу на необхідності формування нових освітніх моделей, що відповідають викликам цифрової трансформації та глобальної конкуренції. Кірдан О. П. аналізує неперервну освіту як фундаментальну умову формування людського капіталу в умовах інноваційної економіки, підкреслюючи, що створення умов для безперервного професійного розвитку має визначальне значення для конкурентоспроможності фахівців на ринку праці [2, с. 25]. У свою чергу, Краско О.А. та Литвин Ю.О. зосереджуються на державній політиці сприяння інвестиціям в освіту, розглядаючи її як інституційний інструмент підтримки людського потенціалу. Дослідники пропонують практичні механізми залучення фінансових ресурсів до освітньої сфери як важливої складової відтворення людського капіталу [3, с. 128]. Лебеда Т.Б. акцентує увагу на взаємозв'язку людського капіталу та макроекономічної динаміки, доводячи, що інвестиції в інноваційну освіту прямо впливають на продуктивність праці та національну конкурентоспроможність [4]. Подібної думки дотримуються також Лібанова Е.М., Макарова О.В., Саріогло В.Г., які розглядають освіту як інвестицію, що потребує системної державної підтримки. У їх роботі представлено аналітичний інструментарій оцінки ефективності політики активізації людського капіталу [5]. Фундаментальний аналіз стану, проблем і перспектив відтворення людського капіталу в Україні представлено у колективній монографії за редакцією В. М. Лича, де неперервна освіта розглядається як один із базових векторів розвитку людського потенціалу в умовах постіндустріального суспільства [6]. Попри напрацювання науковців, залишаються відкритими питання реалізації неперервної інноваційної освіти як чинника капіталізації людського потенціалу. Потребують подальшої розробки механізми застосування цифрових платформ, мікрокваліфікацій, індивідуальних освітніх траєкторій та міждержавного партнерства в умовах глобальних трансформацій і післявоєнного відновлення України.

Мета роботи – обґрунтувати стратегічну роль неперервної інноваційної освіти у формуванні конкурентоспроможного людського капіталу, здатного до адаптації, саморозвитку та ефективного функціонування в умовах цифрової економіки та глобальних трансформацій.

Виклад основного матеріалу. У сучасному глобалізованому середовищі конкурентоспроможність працівника визначається не лише рівнем формальної освіти, а й здатністю до самонавчання, перекваліфікації, міждисциплінарного мислення та швидкого застосування нових знань на практиці. Інституціоналізація зазначеного підходу передбачає створення гнучких освітніх екосистем, у яких освітні установи, бізнес-середовище, науково-дослідні організації та державні інституції функціонують у форматі партнерства. Такі моделі передбачають не лише навчання протягом життя, а й тісний зв'язок освіти з виробництвом, наукою, інноваційною діяльністю та підприємництвом. Практична реалізація цієї концепції можлива через розвиток корпоративної освіти, дуальних програм, акселераторів знань, інноваційних центрів, хабів, а також механізмів публічно-приватного партнерства у сфері освітніх послуг.

В умовах четвертої промислової революції та глобальних трансформацій ринку праці неперервна інноваційна освіта набуває статусу ключового імперативу розвитку людського капіталу. Технологічний прорив, цифровізація, біоінженерія, штучний інтелект і кліматичні виклики не лише змінюють вимоги до компетентностей, а й формують запит на нову модель освіти - динамічну, гнучку, особистісно орієнтовану, спрямовану на саморозвиток та інноваційність [4, с. 17].

Неперервне навчання перестає бути винятково інструментом професійного вдосконалення - воно трансформується в базову функцію стратегічного управління людським потенціалом. Йдеться про постійне оновлення знань, розвиток метакомпетентностей (критичне мислення, емоційний інтелект, креативність), формування здатності до навчання впродовж усього життя як фундаментальної навички XXI століття. За відсутності такої здатності людський капітал втрачає актуальність і економічну цінність, що особливо ризиковано для країн із трансформаційною економікою [1, с. 20]. Означений концепт виступає стратегічним інструментом формування людського капіталу нового покоління, здатного ефективно функціонувати в умовах постіндустріального суспільства, цифрової економіки та глобальної конкурентної боротьби. Він виконує низку взаємопов'язаних функцій, кожна з яких спрямована на розвиток адаптивного, креативного та соціально відповідального індивіда, здатного до постійного оновлення знань і компетентностей відповідно до викликів часу.

З позицій стратегічного управління розвитком людського капіталу, неперервна інноваційна освіта виконує низку ключових функцій: гносеологічну, прогностичну, адаптаційну, мобілізаційну, інтеграційну, продуктивну та інноваційну (табл.1).

Таблиця 1

Функції неперервної інноваційної освіти з позицій стратегічного управління розвитком людського капіталу

Функція	Сутність функції	Очікувані результати
Адаптаційна	Забезпечує здатність працівника ефективно реагувати на технологічні та структурні зсуви	Підвищення гнучкості персоналу, готовність до змін, зниження ризику професійної неактуальності
Мобілізаційна	Стимулює використання інтелектуального потенціалу суспільства	Активізація людського капіталу, формування творчого середовища, зростання участі у суспільних процесах
Інтеграційна	Сприяє соціальній згуртованості та професійній мобільності	Розвиток соціального діалогу, підтримка згуртованості в колективах, зниження рівня професійної сегрегації
Продуктивна	Підвищує індивідуальну та колективну результативність праці	Зростання продуктивності, покращення якісних показників праці, інноваційність підходів до роботи
Інноваційна	Активізує творче мислення та участь у процесах технологічного оновлення	Формування культури інновацій, розвиток R&D, посилення конкурентоспроможності підприємств
Гносеологічна	Забезпечує формування нових знань, розвиток критичного мислення й наукового світогляду	Здатність до самостійного пізнання, високий рівень пізнавальної активності, академічна культура
Прогностична	Формує вміння передбачати зміни в економіці, технологіях і професійній сфері	Підвищення стратегічної бачення, готовність до викликів майбутнього, планування освітньої траєкторії
Соціальна	Подолання освітньої нерівності	Створення інклюзивних можливостей для самореалізації осіб різного віку, професій, регіонів.

Джерело: розроблено авторами

Передусім, слід виокремити гносеологічну функцію, яка забезпечує постійне розширення світогляду, формування когнітивної гнучкості, критичного мислення та наукової раціональності. В сучасному динамічному середовищі, що характеризується швидкими технологічними зрушеннями, ця функція створює когнітивну основу для засвоєння нових ідей, концепцій і моделей дії. Освітнє середовище при цьому виконує не лише функцію передання знань, а перетворюється на інтерактивний простір рефлексії, сенсотворення та переосмислення соціальних і економічних реалій. Особливо важливим є формування власної суб'єктної позиції здобувача щодо складних трансформацій у суспільстві, технологіях і ринку праці.

Адаптаційна функція виступає ключовим механізмом підвищення гнучкості та мобільності людського капіталу [5, с. 62]. Вона забезпечує здатність особистості оперативно реагувати на структурні зміни в економіці, включаючи цифровізацію, зміну професійних стандартів, появу нових компетентностей. Зростання потреби в адаптації зумовлює необхідність розвитку механізмів перекваліфікації, рескілінгу, професійної орієнтації впродовж життя. На практиці це виявляється, зокрема, в моделі корпоративних освітніх систем (внутрішніх університетів), що впроваджуються глобальними корпораціями на кшталт Amazon, Microsoft, Siemens, і спрямовані на постійне оновлення компетенцій персоналу без відриву від виробництва.

Інноваційна функція неперервного навчання полягає у розвитку креативності, здатності до інтелектуального ризику, підприємницького мислення, генерації нових рішень. Освіта виконує роль інфраструктурного ядра інноваційної екосистеми, інтегруючи дослідницький компонент у практичні формати навчання [3, с. 126]. У цьому контексті вона стає не просто джерелом знань, а тригером для формування культури постійного вдосконалення, експерименту, відкритості до нового. Особливої актуальності набуває впровадження сучасних форматів навчання – мікролернінгу, адаптивних платформ з елементами штучного інтелекту, симуляційних технологій, гейміфікації, що сприяють підвищенню якості засвоєння знань через емоційне занурення та мотиваційне залучення.

Прогностична функція визначає здатність освітньої системи не лише реагувати на поточні виклики, а й формувати компетентності, необхідні в майбутньому. Йдеться про розвиток стратегічного мислення, візіонерства, уміння працювати з трендами, управляти невизначеністю, що є критичними навичками для функціонування в умовах VUCA-середовища. Система освіти, яка ефективно реалізує прогностичну функцію, перетворюється на центр формування нових соціально-економічних смислів і практик.

Мобілізаційна функція пов'язана з активізацією внутрішнього потенціалу особистості. Йдеться про формування внутрішньої мотивації до навчання впродовж життя, здатності до самоуправління, ініціативності, підприємливості. У сучасному світі освіта повинна не лише транслювати знання, а й мобілізувати суб'єкта до самостійного розвитку, сприяти усвідомленню власної ролі в соціальних, економічних, професійних процесах.

Інтеграційна функція неперервної інноваційної освіти полягає у поєднанні особистісного, професійного та соціального розвитку. Освіта відіграє роль інституційного медіатора, який сприяє включенню особи у професійні та соціальні мережі, формує навички співпраці, комунікації, крос-культурної взаємодії. Вона стає інструментом соціального згуртування, що особливо важливо в періоди криз і трансформацій.

Окремо варто підкреслити соціальну функцію неперервного навчання, яка полягає у формуванні інклюзивного освітнього середовища, сприянні соціальній мобільності, професійній самореалізації та інтеграції в суспільство представників усіх вікових, соціальних і професійних груп. Вона передбачає зниження бар'єрів доступу до освіти, зокрема фінансових, географічних, інформаційних та інституційних. Особливого значення ця функція набуває в умовах сучасних соціально-економічних трансформацій, які вимагають постійного оновлення знань та навичок. Для вразливих груп населення - осіб з інвалідністю, учасників бойових дій, внутрішньо переміщених осіб, людей передпенсійного віку, мешканців сільських територій - неперервна освіта є інструментом адаптації до змін і підвищення якості життя. У зв'язку з цим надзвичайно важливим є забезпечення рівного доступу до таких можливостей. Проте, як показує практика, наявні бар'єри у фінансуванні освіти, відсутність ресурсів для інклюзивного навчання та диференціація доступу за регіонами стають суттєвими перепонами на шляху до реальної інклюзії.

Заміна традиційної моделі державного замовлення на грантову систему ставить нові завдання перед українською освітньою системою. Гранти, з одного боку, мають потенціал для стимулювання інновацій у сфері освіти, дозволяючи університетам зосереджувати ресурси на розвитку конкретних наукових напрямків і освітніх програм. Однак цей підхід може створити нові соціальні бар'єри, особливо для тих, хто не має доступу до додаткових джерел фінансування або не має можливості брати участь у грантових конкурсах через географічні чи економічні обмеження. У розвинених країнах Європейського Союзу система грантів широко використовується для фінансування досліджень і наукових ініціатив, однак підтримка доступу до освіти залишається пріоритетною для держави. В Україні, де нерівність у доступі до освіти залишається актуальною проблемою, перехід до грантів без достатньої державної підтримки може збільшити соціальну дистанцію між різними регіонами та соціальними групами. Для запобігання збільшенню соціальної нерівності важливо створити механізми, які б забезпечували інклюзивність у використанні грантів. Одним із таких механізмів є стипендії та фінансова підтримка для студентів з малозабезпечених родин, що допоможе рівноцінно долати фінансові бар'єри для навчання. Окрім того, необхідно створити

спеціальні грантові програми для осіб з сільських та віддалених регіонів, зокрема через механізми дистанційного навчання, яке дозволяє знизити географічні та економічні бар'єри.

Продуктивна функція означеної концепції виражається у її прямому впливі на зростання продуктивності праці, підвищення кваліфікації, формування здатності до створення інноваційного продукту з високою доданою вартістю. Вона трансформує освіту на інвестиційний ресурс, який забезпечує довготривалу соціально-економічну віддачу, формуючи критичну масу знаннево-орієнтованого людського капіталу.

Таким чином, неперервна інноваційна освіта постає як багатофункціональна система, інтегрована в архітектуру сучасного стратегічного управління розвитком людського капіталу. Її функції утворюють цілісну модель взаємозв'язків між особистісним розвитком, соціальною відповідальністю, професійною ефективністю та економічною результативністю [2, с. 26].

Висновки. Отже, розвиток неперервної інноваційної освіти є не лише відповіддю на виклики глобальної трансформації, а й визначальною умовою стратегічного розвитку людського капіталу. Її імплементація повинна стати пріоритетом національної політики в галузі освіти та зайнятості, орієнтованої на формування гнучкої, інноваційно-орієнтованої та соціально відповідальної особистості, здатної до ефективної самореалізації в умовах економіки знань. В українських реаліях впровадження цього підходу є надзвичайно обґрунтованим у контексті індустріальної відбудови країни, розвитку цифрової економіки, інтеграції до європейського освітнього простору та потреб трансформації ринку праці. Водночас реалізація цієї моделі вимагає вдосконалення нормативно-правової бази, розширення можливостей доступу до освіти упродовж життя, цифровізації освітньої інфраструктури, підтримки інституційних ініціатив та активного залучення соціальних партнерів до формування змісту та форм навчання.

Список використаних джерел:

1. Ahafonova, M. V. (2022). Rozvytok liudskoho kapitalu v ramkakh vizii Natsional'noi ekonomichnoi stratehii na period do 2030 roku [Development of human capital within the vision of the National Economic Strategy until 2030]. *Osvitnia analityka Ukrainy*, (3), 15–25. DOI: 10.32987/2617-8532-2022-3-15-25 [in Ukrainian].
2. Kirdan, O. P. (2022). Neperervna osvita yak umova formuvannia liudskoho kapitalu v innovatsiinii ekonomitsi [Lifelong education as a condition for the formation of human capital in an innovative economy]. *Naukovyi visnyk Lotnoi akademii. Serii: Ekonomika, menedzhment ta pravo*, (7), 22–28. DOI [10.33251/2707-8620-2022-7-22-28](https://doi.org/10.33251/2707-8620-2022-7-22-28) [in Ukrainian].
3. Krasko, O. A., & Lytvyn, Yu. O. (2023). Derzhavna polityka spriannia investysiiam v osvitu yak chynnyk formuvannia liudskoho kapitalu [State policy to promote investment in education as a factor in the formation of human capital]. *Investysii: praktyka ta dosvid*, (7), 123–129. <https://www.nayka.com.ua/index.php/investplan/article/view/1334/1344> [in Ukrainian].
4. Lebeda, T. B. (2022). Liudskyi kapital yak faktor vplyvu na makroekonomichnu dynamiku v Ukraini [Human capital as a factor influencing macroeconomic dynamics in Ukraine]. *Formuvannia rynkovykh vidnosyn v Ukraini*, (10), 11–21. http://nbuv.gov.ua/UJRN/frvu_2022_10_4 [in Ukrainian].
5. Libanova, E. M., Makarova, O. V., & Sarioglo, V. H. (2020). Polityka aktyvizatsii yak investysii u liudskyi kapital: teoriia i praktyka [Activation policy as an investment in human capital: theory and practice]. *Nauka ta innovatsii*, 16(5), 57–68. <https://doi.org/10.15407/scin16.05.057> [in Ukrainian].
6. Lych, V. M., Bondar, I. K., Liutyi, I. O., & Hrishnova, O. A. (Eds.). (2009). *Liudskyi kapital Ukrainy: stan, problemy, perspektyvy vidtvorennia* [Human capital of Ukraine: state, problems, prospects of reproduction] (Part I, 224 p.). Kyiv: KNUBA. [in Ukrainian].

ПРОФТЕХОСВІТА ЯК ПРІОРИТЕТ ВІДБУДОВИ ТА РОЗВИТКУ ДЕРЖАВИ

Вячеслав Курепін, доцент, канд.екон.наук, доцент¹(ORCID ID:0000-0003-4383-6177),

¹Миколаївський національний аграрний університет, вулиця Георгія Гонгадзе, 9, 54000, Україна

АНОТАЦІЯ. Для швидкого та якісного відновлення України необхідна достатня кількість технічних кваліфікаційних фахівців. Уряд уже зараз має займатися вирішенням проблем професійно-технічної освіти. На додаток проблем воєнного часу, нагальні питання довоєнного часу у цій сфері нікуди не зникли. Зрозуміло, через війну викликів стало в рази більше. У дослідженні розглядається роль професійної професійно-технічної освіти як стратегічного інструменту в процесах післявоєнної відбудови України та її подальшого соціально-економічного розвитку. Для відновлення інфраструктури, розвитку промисловості, аграрного та енергетичного сектору економіки, будівництва необхідна достатня кількість кваліфікованих робітничих кадрів. З метою формування рекомендацій для українського контексту особлива увага приділяється трансформації закладів професійно (професійно-технічної) освіти та формуванню нової генерації професіоналів, здатних забезпечити відбудову держави з урахуванням принципів сталого розвитку. Професійна професійно-технічна освіта повинна розглядатися не лише як інструмент швидкої підготовки кадрів, а як надійна сила національного відродження, соціальної інтеграції та економічної мобільності.

Ключові слова: відновлення; виклики; профтехосвіта; стратегічне значення; освітні стандарти; відбудова України; економічний розвиток.

Вступ. У сучасному світі ключову роль у розвитку національної економіки та підвищенні конкурентоспроможності держави відіграє якісна система освіти, зокрема професійна (професійно-технічна). Професійно-технічна освіта сьогодні - не просто освітній сегмент, а реальний фундамент для відновлення держави, її економіки, соціальної структури та майбутнього. В Україні профтехосвіта тривалий час залишалася в тіні загально-середньої та вищої освіти, що призвело до хронічного браку кваліфікованих робітничих кадрів на ринку праці. В період війни, відбудови інфраструктури та економічного оновлення, професійна професійно-технічна освіта набуває нового змісту та стратегічного значення. Важливо усвідомити, без професійно підготовлених кваліфікованих кадрів відновлення інфраструктури та трудового ринку в Україні реалізувати буде складно.

Аналіз літературних джерел. Проблематика професійної освіти є об'єктом вивчення українських вчених. У своїх дослідженнях вони відзначають, що саме система професійної професійно-технічної освіти здатна оперативнo реагувати на зміни у сфері праці, відбудови нашої держави, зокрема економіки, забезпечуючи ринок праці мобільними, компетентними, конкурентоспроможними спеціалістами. Такі вчені, як Доценко Н.А., Нагаєв В.М., Бацуровська І.В., Марченко Д.М., інші відмічають зменшення кількості профтехучилищ, фінансування з боку Міністерства освіти і науки України, проблеми з впровадженням сучасних освітніх стандартів. Активну участь у дослідженні проблематики професійної освіти беруть стейкхолдери-дослідники. Вони звертають увагу на дефіцит працівників взагалі, не говорячи про кваліфікованих робітників. Водночас у своїх працях стверджують, що ставка на профтехосвіту сприяє зниженню безробіття серед молоді, посилює інноваційний потенціал, підвищує економічну стабільність. Науковці впевнені в розвитку професійної професійно-технічної освіти є стратегічний розвиток нашої країни [1].

Мета роботи. Метою дослідження є обґрунтування необхідності визначення профтехосвіти пріоритетом державної політики, дослідити стан та проблеми галузі, а також запропонувати напрями її модернізації; визначити роль професійно-технічної освіти в сучасному суспільстві та економіці України; проаналізувати проблеми та виклики, що постають перед системою професійної професійно-технічної освіти; сформулювати пропозиції щодо інтеграції профтехосвіти в державну політику як один із пріоритетів.

Виклад основного матеріалу. Професійно-технічна освіта, так званий «міст» між освітою та ринком праці. З кожним роком важливість профтехосвіти в умовах повномасштабної війни та подальшої відбудови України зростає. Вже зараз вітчизняній економіці потрібні фахівці для відновлення інфраструктури, енергетики, агросектору, важливі спеціалісти з ІТ-сервісу, логістики тощо. Це шанс молоді здобути не лише освіту, а й гідну роботу в своїй країні.

Не менш важливо розвивати професійну (професійно-технічну) освіту у малих громадах. Саме в них проживає суттєва частка сільської молоді, яка прагне відновлювати та розвивати аграрний сектор економіки. У містечках та селах центри професійної освіти утримують молодь, допомагають внутрішньо переміщеним особам перекваліфікуватися та знову інтегруватися в місцеву економіку. Прикладом такої професійної діяльності є заклади професійно (професійно-технічної) освіти (ЗП(ПТ)О) Вінницької, Чернівецької, Закарпатської, Рівненської, Львівської областях. Такі заклади вже стали потужним двигуном, який не дасть згаснути не тільки аграрному сектору економіки, а і національній в загалом, хабами перекваліфікації та підтримки молоді у громадах.

Ми повинні надати такий шанс молоді, але спочатку усунути невирішені проблеми профтехосвіти минулого. На нашу думку, є три основні проблеми з якими Україна підійшла до війни. Які, не зважаючи на воєнний стан, все ще потребують вирішення найближчим часом [2]. Розглянемо їх.

1. Недостатній попит серед абітурієнтів - невинновдано низький престиж професійної освіти та стереотипне ставлення до нього. Багато хто («двієчників») сприймає профтехосвіту як можливість відсидіти навчання після 9-го класу закладу загальної середньої освіти. Якщо є сумнівні щодо вступу до вишу, теж шлях до ЗП(ПТ)О. Серед потенційних здобувачів освіти є уявлення про проблематичне працевлаштування. Статистика свідчить про інше – наразі більше половини вакансій, це технічні робітничі професії: слюсарі, зварювальники тощо, найскладніше працевлаштуватися людям із вищою освітою: юристам, менеджерам, економістам, бухгалтерам. Війна актуалізувала попит на такі технічні робітничі професії [3].

2. Недостатній рівень матеріально-технічної бази, оплати праці у сфері професійної освіти. Зарплата освітян ЗП(ПТ)О неконкурентна, вона одна з самих низьких в Україні, а порівнювати її з колегами із закладів профтехосвіти європейських країн майже неможливо.

3. Слабкий рівень неформальної освіти. В країні має працювати чітка система неформальної освіти [4]. Не визнавати її немає сенсу, оскільки кількість людей здобуваючих сучасну освіту прямо у смартфоні постійно збільшується (онлайн-курси, освітні онлайн-платформи). Ще до війни таку проблему було вирішено - в Україні запрацювали так звані кваліфікаційні центри, де всі бажаючі можуть пройти онлайн-курси, наприклад кухаря чи швачки. На таких курсах підтверджують професійні навички та отримують сертифікат з дозволом на роботу без необхідності проходити повний курс навчання.

Зрозуміло, нові виклики для профтехосвіти додала війна. Успіх повоєнного відновлення якої повністю залежить від держави. Констатуємо, проблема № 1 - втрата матеріально-технічної бази та людей, які працювали у сфері профтехосвіти. Пошкоджені різною мірою, пограбовані окупантами чи зруйновані внаслідок військової агресії заклади ЗП(ПТ)О. Невозможно підрахувати виробництва, які надавали майданчики для практичної частини навчання, які закрилися, переїхали чи загалом були зруйновані. Ще один фактор цієї проблеми, вимушена міграція [5]. Війна змусила багатьох переїхати до безпечніших регіонів, звісно, серед тих, хто покинув оселі є учителі, здобувачі освіти, потенційні абітурієнти ЗП(ПТ)О. Вирішення цієї проблеми, ми бачимо, через забезпеченням достатнім фінансуванням, поновленням/модернізацією матеріально-технічної бази.

Проблема № 2. Обмежені можливості практичної складової навчання. Дистанційно практичну підготовку та якісний контроль за виконанням завдань організувати практично неможливо. Потенційні роботодавці із за небезпеки під час обстрілів не можуть надати бази практик для здобувачів освіти ЗП(ПТ)О. Який ми бачимо вихід? Розвиток дуальної освіти та залучення до цієї системи по можливості більшої кількості підприємств, особливо у вільних та безпечніших регіонах.

Проблема №3. Фінансування. Утримання з місцевих бюджетів ЗП(ПТ)О не забезпечила баланс між інтересами держави, регіонів, викладачів, вступників та здобувачів освіти. Трансформації фінансування у вигляді «випробувальних», або «експериментальних» періодів не надала бажаних результатів. Війна лише загострила проблему і натомість вимагає нового вирішення проблеми. Який вихід? Фінансування профтехосвіти з державного бюджету у вигляді державного замовлення.

Фінансування в умовах війни через держзамовлення дозволить: а) розвантажити місцеві бюджети постраждалих міст і регіонів, які не зможуть забезпечувати фінансування регіонального

замовлення; б) забезпечити належне фінансування у регіонах, де ЗП(ПТ)О будуть забезпечувати навчання, як місцевої молоді, так і переселенців.

Для зміцнення системи ЗП(ПТ)О необхідно: оновлення інфраструктури фінансування; публічне підвищення престижу освітніх закладів; активне залучення бізнесу до навчального процесу (дуальна освіта); перетворення закладів ЗП(ПТ)О на багатофункціональні центри регіонального розвитку (освітні хаби) [6]; впровадження дистанційного навчання, онлайн-платформ, smart-лабораторій (цифровізація).

Висновки. Професійно-технічна освіта має бути рівноправним і стратегічно важливим компонентом системи освіти для молоді. Вона в умовах післявоєнної відбудови буде ключовим інструментом стабільності, конкурентоспроможності України. Нам потрібно не просто відбудувати Україну а зробити її сильнішою, інноваційною. Саме професійно (професійно-технічна) освіта, це той інструмент, який допоможе нам цього досягти.

Список використаних джерел:

1. Pindera, M. V. (2024, October 23–25). *Comprehensive and systematic development of sustainable progress in the domestic agricultural sector* [Conference presentation abstract]. Ecological and social aspects of economic development under the conditions of European integration: Proceedings of the 10th All-Ukrainian Scientific and Practical Conference. Mykolaiv National Agrarian University, Mykolaiv, Ukraine. <https://dspace.mnau.edu.ua/jspui/handle/123456789/18915>.
2. Ivanenko, V. S. (2023, February 22–23). *Content features of educational work at Mykolayiv National Agrarian University* [Conference presentation abstract]. Resource-oriented learning in “3D”: Proceedings of the 3rd International Scientific and Practical Internet Conference. Poltava University of Economics and Trade, Poltava, Ukraine. <https://dspace.mnau.edu.ua/jspui/handle/123456789/13196>.
3. Ivanenko, V. S. (2023, November 20). *Women entrepreneurs during the war: Achievements and challenges* [Conference presentation abstract]. Entrepreneurship during the war in Ukraine: Challenges and opportunities: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference dedicated to the 60th anniversary of the Department of Entrepreneurship, Trade and Applied Economics. Vasyl Stefanyk Precarpathian National University, Ivano-Frankivsk, Ukraine. <https://dspace.mnau.edu.ua/jspui/handle/123456789/16141>.
4. Kurepin, V., & Kuznetsova, I. (2024, February 21). *Communicative competence as a component of the professional training of a modern teacher of a vocational (vocation-technical) education institution* [Conference presentation abstract]. Ukrainian language and culture in the modern humanitarian space: Aspects of interlingual communication and formation of communicative competence of a modern specialist: Proceedings of the International Scientific and Practical Internet Conference. State Tax University, Irpin, Ukraine; MANS w Łomży, Łomża, Poland. <https://dspace.mnau.edu.ua/jspui/handle/123456789/17422>.
5. Televan, A. O. (2024, December 10). *Labor migrants: Unregulated labor, problems, strategy, cooperation* [Conference presentation abstract]. Protection of human rights in Ukraine: Current status and prospects for improvement: Proceedings of the Scientific and Practical Round Table dedicated to the 76th anniversary of the Universal Declaration of Human Rights. Khmelnytskyi University of Management and Law named after Leonid Yuzkov, Khmelnytskyi, Ukraine. <https://dspace.mnau.edu.ua/jspui/handle/123456789/20211>.
6. Kurepin, V. M., & Ivanenko, V. S. (2024). Application of digital technologies in agriculture to achieve the Sustainable Development Goals. *Modern Economics*, 47, 62–69. [https://doi.org/10.31521/modecon.V47\(2024\)-09](https://doi.org/10.31521/modecon.V47(2024)-09).

ОСВІТА МОЛОДІ: НАПРЯМИ УДОСКОНАЛЕННЯ ПІДГОТОВКИ ФАХІВЦІВ У ВОЄННИЙ ТА ПОВОЄННИЙ ПЕРІОД

Вячеслав Курепін, доцент, канд.екон.наук, доцент¹ (ORCID ID:0000-0003-4383-6177),

¹Миколаївський національний аграрний університет, вулиця Георгія Гонгадзе, 9, 54000, Україна

АНОТАЦІЯ. Освіта завжди була основою стабільності та розвитку суспільства, а підготовка педагогів - стратегічним напрямом у системі національної безпеки. У воєнний та повоєнний час потреба у висококваліфікованих, морально стійких і психологічно підготовлених педагогів зростає в рази, оскільки саме вони формують світогляд молоді в умовах турбулентності та травм. Розглянуті ключові аспекти трансформації системи освіти молоді в умовах воєнного та повоєнного періодів. Акцентовано увагу на необхідності адаптації освітньо професійних програм, зміцнення практичної складової підготовки молодих фахівців. Проаналізовано сучасні виклики та важливість стратегічного планування підготовки кваліфікованих кадрів для відбудови країни, напрями удосконалення підготовки фахівців у воєнний та повоєнний період, у тому числі для сфери освіти. Визначено роль закладів вищої освіти та їх партнерів у забезпеченні якості та актуальності освітнього процесу в умовах воєнного стану та відновлення.

Ключові слова: розвиток суспільства; світогляд молоді; вища освіта; академічна цілісність; молодь; підготовка фахівців; повоєнна відбудова.

Вступ. Сучасна Україна переживає надзвичайно складний період своєї історії. Повномасштабна війна в Україні не тільки вплинула на всі сфери суспільної життя, вона продовжує впливати, спричиняючи глибокі зміни у всіх сферах життєдіяльності українського суспільства, зокрема у сфері вищої освіти. В таких умовах особливу актуальність набувають питання якісної підготовки молоді - майбутніх фахівців, здатних забезпечити стійкість держави, як під час воєнних викликів, так і в процесі повоєнної відбудови. Освітній процес зазнавши серйозних викликів, пов'язаних із безпековими, соціальними та економічними факторами [1]. У таких умовах особливої ваги набуває якісна підготовка фахівців, які будуть здатні ефективно працювати як у часи війни, так і під час післявоєнного відновлення країни.

Реалії війни потребують, як адаптації, так і стратегічного переосмислення пріоритетів. Важливі: психологічна готовність до викликів, орієнтація на практичну дієздатність, формування необхідних компетентностей, відповідальність та інноваційність мислення. Надзвичайно важливим є підхід до підготовки фахівців таких галузей як: освіта, безпека, охорона здоров'я, логістика, соціальна робота.

Аналіз літературних джерел. Дослідженням проблем освіти в умовах кризових ситуацій займаються українські та зарубіжні науковці, такі як: (І. Бацуровська, А. Галєєва, Н. Доценко, D. Bell, M. Apple). У наукових працях дослідників висвітлюється питання адаптації освітнього процесу, дистанційного навчання, моральної та психологічної підготовки викладачів та студентів. Серед проблем, що порушуються: нестабільність навчального середовища, моральне вигорання викладачів [2], слабка практична підготовка до роботи в умовах стресу. Водночас в вітчизняній літературі бракує ґрунтового аналізу специфіки підготовки фахівців саме в контексті воєнної та повоєнної години.

Мета роботи. Метою дослідження є виявлення основних проблем вищої освіти в Україні у воєнний та повоєнний періоди та окреслення напрямів удосконалення підготовки фахівців в умовах криз. Проаналізувати виклики, що постали перед системою вищої освіти у зв'язку з війною в Україні, та визначити шляхи модернізації підготовки майбутніх учителів до викладання в екстремальних соціокультурних умовах.

Виклад основного матеріалу. Вища освіта в Україні стоїть перед безпрецедентними викликами. Її адаптація до умов війни та подальшої відбудови потребує системного підходу, інвестицій, гнучкості та інновацій. Саме завдяки підготовці компетентних та патріотичних фахівців можливе ефективне відновлення держави та її стале розвиток у майбутньому [3].

У воєнні часи заклади вищої освіти змушені переходити на дистанційне або змішане навчання, що нажалі супроводжується технічними складнощами та втратою ефективності практичної підготовки. Водночас зростає потреба у спеціалістах з галузей оборони, медицини, психології, логістики, будівництва та інформаційних технологій тощо.

У післявоєнний період освіта повинна відігравати провідну роль у відбудові країни, формуванні нової економіки, управлінських структур та громадянського суспільства. Проблеми, що виникатимуть, - це брак кадрів, зниження мотивації до навчання, міграція молоді, руйнування інфраструктури освітніх установ. Необхідне стратегічне планування, реформування освітніх програм з урахуванням потреб суспільства та національної безпеки.

Серед основних проблем освітнього процесу під час воєнного стану визначаємо - порушення освітнього процесу через обстріли, евакуацію, нестабільне інтернет-з'єднання, а також емоційне виснаження викладачів та тих, хто навчається. Практична підготовка викладачів ускладнюється, адже доступ до освітніх установ обмежений, а дистанційна практика не завжди дозволяє здобути необхідні навички.

Водночас загострюється потреба у фахівцях (викладачах), здатних працювати з травмованими дітьми, здійснювати психоемоційну підтримку, реалізовувати виховання у духі громадянськості та стійкості. У післявоєнні часи освіта повинна орієнтуватися на формування компетентностей у галузі інклюзивної, соціально-педагогічної та кризової освіти [4]. Необхідне оновлення освітніх програм з урахуванням принципів освіти для сталого розвитку та національного виховання.

Проблеми вищої освіти у підготовці фахівців у воєнний та післявоєнний час:

1. Війна в Україні спричинила серйозні зміни в системі вищої освіти, змусивши заклади вищої освіти оперативно переходити на дистанційну форму навчання та адаптувати освітній процес до нових умов.

2. Однією з головних проблем є порушення академічної цілісності через нерівномірний доступ до інтернету, електроенергії, а також психологічну втому, як у здобувачів вищої освіти, так і у професорсько-викладацького складу.

3. Масове переміщення молоді та викладачів, евакуація освітніх установ, руйнування інфраструктури закладів вищої освіти та втрата навчально-лабораторної бази призводять до зниження якості підготовки як молоді, так і викладачів (перепідготовка, підвищення кваліфікації, особливо молодих викладачів).

4. В умовах воєнного стану зростає потреба у підготовці фахівців для сектору безпеки та оборони, а також медичних працівників, психологів, інженерів, фахівців з кібербезпеки.

5. У післявоєнний період важливо переорієнтувати систему вищої освіти на відбудову країни, що передбачає актуалізацію спеціальностей, модернізацію освітніх програм та розвиток дуальної освіти.

6. Необхідним є створення механізмів гнучкої акредитації та підтримки закладів вищої освіти, зокрема тих, які були евакуйовані або зазнали пошкоджень.

7. Важливим аспектом є психологічна підтримка учасників освітнього процесу та формування стійкості в умовах криз, що мають довгострокові наслідки [5].

8. Міжнародна співпраця, участь у програмах обміну, цифровізація освіти та відновлення наукових досліджень - ключові вектори розвитку освіти у післявоєнний період.

Серйозною проблемою освіти та науки є її розвиток за інерцією, починаючи з перших років незалежності країни. У деякій мірі такий розвиток продовжувався на початок війни. Це все більше віддаляло, як освіту, так і науку від реальних потреб розвитку суспільства, держави та економіки. У цих умовах поступово губилися зворотні зв'язки з іншими галузями, академічна доброчесність, якість освіти та досліджень, їхня відповідність запитам ринку праці та бізнесу.

У повоєнний час відновлення України ставить перед освітою та наукою інші цілі та завдання. Швидкі позитивні зміни вимагають пропозицій по відновленню освіти та науки за іншими напрямками, які би передбачали плідну взаємодію галузей, враховували значний вплив на розвиток цілей щодо відновлення та розвитку державної та регіональної інфраструктури, охорони здоров'я, культурного розвитку громадян, спорту, державного управління тощо. Ми повинні зрозуміти, без якісної освіти та науки нам не створити сучасний захист держави. Ми не опануємо високотехнологічні виробництва, цифровізацію. Ми не розвинемо медицину, культуру, спорт, впровадження енергозберігаючих технологій буде на низькому рівні. Нам не забезпечити верховенство права.

Вже зараз та особливо у післявоєнний період, не менш важлива узгодженість пропозицій з вимогами євроінтеграції. Маємо на увазі інтеграцію до європейського освітнього та дослідницького простору [6]. Це означає своєчасне підписання та послідовну імплементацію нормативних актів, які будуть визначати узгоджені в європейських країнах рамкові вимоги до освіти та науки. Важлива також інституційна автономія освітніх закладів та наукових установ, академічна свобода учасників освітнього процесу, якісний рівень освіти та кваліфікація, забезпечення якості освіти тощо.

Висновки. У контексті воєнного та повоєнного періоду освіта молоді набуває особливого стратегічного значення. Від ефективності підготовки фахівців залежить не лише функціонування окремих галузей, а й загальна здатність держави до відновлення та розвитку. Система вищої освіти має адаптуватися до нових умов, зберігаючи при цьому гуманістичні ідеали. Інвестування в підготовку педагогів, які готові до сьогодення, стане основою для формування покоління українців, здатного відбудовувати країну, зберігаючи її ідентичність і демократичні цінності. Ключовими напрямками удосконалення освітнього процесу мають стати: адаптація освітніх програм, включаючи дистанційні, змішані та дуальні форми навчання, до нових викликів та потреб часу; інтеграція найкращих світових практик та інновацій; державна підтримка освіти післявоєнного відновлення. Модернізація освіти в умовах війни, це відповідь на кризу, шанс для якісного перезавантаження освітньої системи для покоління відповідальних, освічених, свідомих громадян незалежної України.

Список використаних джерел:

1. Batsurovska I., Kurepin V. The Impact of the War in Ukraine on the Study Results at an Agricultural University. *Tréma*. 2023. № 60. URL:<https://dspace.mnau.edu.ua/jspui/handle/123456789/15314>.
2. Ivanenko, V. S. (2024, November 28). *Development of managerial competencies of future teacher-managers in educational institutions of Ukraine* [Conference presentation abstract]. IV International Scientific and Practical Conference Digital innovations and social transformations in education and the professional environment, Part 2, APSVT, Kyiv, Ukraine. URL:<https://dspace.mnau.edu.ua/jspui/handle/123456789/19659>.
3. Ivanenko, V. S. (2023, May 17). *National-patriotic education of youth as a component of building an independent state* [Conference presentation abstract]. All-Ukrainian Scientific and Practical Conference Topical issues of modern science in the research of young scientists, cadets and students, Kharkiv National University of Internal Affairs, Vinnytsia, Ukraine. URL:<https://dspace.mnau.edu.ua/jspui/handle/123456789/14176>.
4. Batsurovska, I. V., Dotsenko, N. A., Lymar, O. O., Gorbenko, O. A., & Kurepin, V. M. (2024). Implementation of open educational resources in the context of student-centred approach. *Educational Dimension*. URL:<https://doi.org/10.55056/ed.807>.
5. Yurchenko, K., & Oleinyk, D. (2024, February 21). *Personal creative qualities of teaching staff of higher education institutions as the basis of their creative activities* [Conference presentation abstract]. International Scientific and Practical Internet Conference Ukrainian language and culture in the modern humanitarian space: Aspects of interlingual communication and formation of communicative competence of a modern specialist, State Tax University (Irpın, Ukraine) & MANS w Łomży (Łomża, Poland). URL:<https://dspace.mnau.edu.ua/jspui/handle/123456789/17425>.
6. Ivanenko, V. S. (2023, February 15). *Integration of youth into the education system of EU countries under conditions of military aggression against Ukraine* [Conference presentation abstract]. International Scientific and Practical Conference Integration of Ukrainian higher legal education into the European educational space – challenges of internal security during martial law, MANS w Łomży, Łomża, Poland. URL:<https://dspace.mnau.edu.ua/jspui/handle/123456789/12946>.

ШТУЧНИЙ ІНТЕЛЕКТ У ВИЩІЙ ОСВІТИ: ТЕНДЕНЦІЇ ТА ТРАНСФОРМАЦІЇ

Сергій Цвіль, доцент, к.е.н., доцент¹(ORCID: [0000-0002-1720-6238](https://orcid.org/0000-0002-1720-6238)),

¹Національний університет «Запорізька політехніка», Університетська 64, 69063

АНОТАЦІЯ. *З метою використання можливостей штучного інтелекту вивчено його природу. Обґрунтовано феномен штучного інтелекту, який полягає у формуванні інтелектуальної розробки навчальної програми й інтелектуальних навчальних систем. Узагальнено пріоритетні напрямки розповсюдження сфери штучного інтелекту. Систематизовано принципи дії штучного інтелекту та потенціал щодо його застосування у вищій освіті. Описано на базовому рівні види ефектів від використання штучного інтелекту для освітніх ініціатив ЗВО. Зроблено висновок, що дії ЗВО України треба сконцентрувати на використанні штучного інтелекту у створенні університету з інтелектуальною підтримкою.*

Ключові слова: штучний інтелект; освітня ініціатива; сфера викладання; тенденція; обсяг даних; знання; інтелектуальна система; віртуальний клас

Вступ. Суспільство прагне створювати більш інтелектуальні, адаптовані та енергоефективні системи, які взаємодіють, виявляють уразливості та реагують на них у режимі реального часу. Результатом еволюційного розвитку технологій стала четверта промислова революція, в рамках якої одне з ключових місць відводиться штучному інтелекту. В даний час штучним інтелектом називаються інформаційні технології, засновані на інтелектуальних системах та алгоритмах, здатні виконувати операції, які раніше традиційно здійснювалися людиною.

Аналіз літературних джерел. Авторські дослідження побудовано за [1–3].

Мета роботи. Описати природу штучного інтелекту та можливості, які він, як освітній інструмент, може створити для навчання студентів в закладах освіти.

Матеріали і методи. Матеріалами є підручники, наукові статті, навчальні посібники, монографії, тези. Методами є описовий, аналітичний, дослідницький.

Виклад основного матеріалу. Принцип дії штучного інтелекту полягає у поєднанні великого обсягу даних з можливостями швидкої, ітеративної обробки та інтелектуальними алгоритмами, що дозволяє різним програмам автоматично навчатися на базі законів та ознак, що містяться у даних [1]. ШІ є комплексною сферою з безліччю теорій, методик і технологій. Її головними напрямками є такі:

- машинне навчання: це область знань, що досліджує алгоритми, які навчаються на даних з метою знайти закономірності. У ньому використовуються методи нейромереж, статистики, дослідження операцій тощо. для виявлення прихованої корисної інформації даних; при цьому явно не програмуються інструкції, що вказують, де шукати дані та як робити висновки;

- нейромережа: це один із методів машинного навчання. Це математична модель (її програмне чи апаратне втілення), побудована за принципом організації біологічних нейронних мереж – мереж нервових клітин живого організму;

- комп'ютерний зір: спирається на розпізнавання шаблонів та глибоке навчання для розпізнавання зображень і відео. Машини вже вміють аналізувати та розуміти зображення, знімати фото чи відео та інтерпретувати оточення;

- у глибокому навчанні використовуються складні нейромережі з безліччю нейронів та шарів. Для навчання цих глибоких нейромереж та для виявлення складних закономірностей у величезних масивах даних використовуються підвищені обчислювальні потужності та вдосконалені методики. Поширені області застосування: розпізнавання зображень та мовлення;

- когнітивні обчислення: напрямок штучного інтелекту, завданням якого є забезпечення процесу природної взаємодії людини з комп'ютером, аналогічної взаємодії між людьми. Кінцева мета штучного інтелекту та когнітивних обчислень – імітація когнітивних процесів людини комп'ютером завдяки інтерпретації зображень та мовлення з видачею відповідної реакції у відповідь;

- обробка природної мови: це здатність комп'ютерів аналізувати, розуміти та синтезувати людську мову, включаючи усне мовлення. Зараз ми вже можемо керувати комп'ютерами за

допомогою звичайної мови, яка використовується у повсякденному побуті (використовуючи Siri або Google Assistant). Основною метою штучного інтелекту виступає інтелектуальне моделювання досяжних розумових операцій. Штучний інтелект широко використовується у різних галузях, включаючи фінанси, роздрібну торгівлю, виробництво, транспорт, охорону здоров'я. Не стала винятком і сфера освіти, насамперед вищої освіти. Штучний інтелект сягає корінням у всі рівні освіти та реалізацію освітніх програм у закладах вищої освіти. Штучний інтелект став перетворюючою силою у вищій освіті, змінивши традиційні парадигми викладання, засвоєння знань та адміністративних процесів. В Україні йде активне впровадження інформаційних технологій (на штучному інтелекті) у процес підготовки студентів вузів.

У сфері викладання платформи, що керуються штучним інтелектом, використовують передові алгоритми та методи машинного навчання для персоналізації освітнього процесу [2]. Інтелектуальні системи аналізують індивідуальні схеми навчання, адаптуючи зміст навчання до різних здібностей та потреб студентів. Віртуальні класи з урахуванням штучного інтелекту полегшують взаємодію реальному часі, створюючи динамічну і привабливе середовище навчання. Більше того, інструменти оцінки на основі штучного інтелекту забезпечують своєчасний зворотний зв'язок, допомагаючи викладачам визначати галузі покращення та налаштовувати шляхи навчання для студентів.

Зміни у механізмі навчання безпосередньо впливають та стимулюють трансформацію навчальної програми і стандартів надання контенту. Це означає, що феномен штучного інтелекту спричинив формування інтелектуальної розробки навчальної програми, інтелектуальних навчальних систем.

Штучний інтелект як освітній інструмент може створити широкий спектр можливостей для навчання студентів, показуючи, де студенти припускаються помилок, на що потрібно їм звернути увагу, пояснити і продемонструвати їм, де вони мають прогалини у знаннях, на які слід звернути особливу увагу, чому ще потрібно навчитися. Персоналізована освіта на основі штучного інтелекту є справжньою революцією з точки зору того, як майбутні студенти вивчатимуть освітні програми у вишах. Окрім того, очікується, що персоналізований підхід до навчання підвищить середній рівень коефіцієнта інтелекту студентів вишів.

Вплив штучного інтелекту виходить за межі педагогіки, революціонізуючи адміністративні завдання у вищих навчальних закладах [3]. Автоматизовані чат-боти обробляють звичайні запити студентів, підвищуючи адміністративну ефективність та оперативність реагування. Прогнозна аналітика, що ґрунтується на штучному інтелекті, допомагає в управлінні зарахуванням, утриманням студентів та розподілі ресурсів, оптимізуючи адміністративну діяльність вузів.

Дослідницькі інструменти базуються на штучному інтелекті та розширюють можливості вчених, прискорюючи темпи інновацій. Алгоритми обробки мови аналізують величезні обсяги текстових даних, допомагаючи вченим у оглядах літератури та узагальненні знань. Алгоритми штучного інтелекту полегшують прийняття рішень на основі даних, дозволяючи отримати уявлення про діяльність установ, залучення студентів та ефективність навчальних програм.

Реалізація штучного інтелекту і освітніх ініціативах приносить незліченну вигоду ЗВО і студентам. Сьогодні штучний інтелект активно використовується при розробці навчальних матеріалів, в об'єктивній оцінці студентських робіт, механізмі доведення результатів студентських робіт до студентів, у відстеженні показників фізичного та психічного здоров'я студентів у рамках різних програм. Варіативність у навчанні дає можливість вибору освітніх послуг для студента як справжнього споживача, а кожна навчальна організація визначає шлях розвитку. У майбутньому студентів можна буде направляти до автоматизованих служб підтримки, керованих штучним інтелектом. Це стане звичним явищем.

Інтеграція штучного інтелекту до вищої освіти пов'язана з труднощами. Етичні міркування щодо конфіденційності даних, упередженість алгоритмів і витіснення традиційних методів навчання вимагають ретельного вивчення. Крім того, підвищення цифрової грамотності викладачів та студентів має вирішальне значення для ефективного використання потенціалу штучного інтелекту.

Обговорення. Штучний інтелект є потужною технологією, яка потенційно може спричинити найбільший прорив у сфері освіти. В останні роки цифрова трансформація впроваджується у всіх

галузях народного господарства України, проте освіта, особливо вища, є одним із найбільш складних напрямків через різноманітність навчальних програм, тривалість курсів та численність предметів.

Висновки. В даний час вишам необхідно сконцентруватися на розвитку правильного розуміння штучного інтелекту, того, як він пов'язаний з механізмом навчання, на створення інтелектуальних аудиторій, які призведуть до створення «університетів з інтелектуальною підтримкою. Коли виші зосереджуються на використанні можливостей штучного інтелекту для створення економічних переваг, то розвиток технологій штучного інтелекту стає неминучим.

Вивчення штучного інтелекту має продовжуватися на основі припущення, що кожен аспект навчання й будь-яка інша характеристика інтелекту в принципі може бути описана з такою точністю, що можна створити машину для його моделювання. В цілому, економічний та соціальний ефект від впровадження в систему вищої освіти України штучного інтелекту важко переоцінити. Широке і повсюдне впровадження різних технологій, заснованих на штучному інтелекті, в систему вищої освіти України дасть можливість перейти від експорту сировини і продуктів до експорту знань, що базується на високих вітчизняних технологіях.

Список використаних джерел:

1. Kuklina, T., Tsviliy, S., Zhuravlova, S. (2025) Vykorystannia shtuchnoho intelektu v turystychnomu biznesi [Using artificial intelligence in the tourism business]. *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho tekhnichnoho universitetu - Bulletin of the Kharkiv National Technical University*. 2, 1(92), 332–337. [in Ukrainian] DOI: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.1.2.50>.
2. Kuklina, T., Tsviliy, S., Zhuravlova, S., Korniienko, O., Gurova, D. (2025) The growing role of artificial intelligence in the organization of customer service in the tourism business. *Data economy: challengers and opportunities for business & government*. Oktan print, 129–139. DOI: <https://doi.org/10.46489/DECAO-25-03>.
3. Vasylychev, D., Tsviliy, S., Zhilko, O. (2021) Socio-economic aspects of stuff's innovative development and training in service enterprises: world and domestic experience. *Digital transformation of society: theoretical and applied approaches* : monography. University of Technology, Katowice, Poland, 46, 315–326.

АКТУАЛЬНІСТЬ ВПРОВАДЖЕННЯ В ОДЕСЬКІЙ ДЕРЖАВНІЙ АКАДЕМІЇ БУДІВНИЦТВА ТА АРХІТЕКТУРИ В МЕЖАХ РЕАЛІЗАЦІЇ МІЖНАРОДНОГО ПРОЄКТУ ERASMUS+ KA2 THE BRIDGE ІННОВАЦІЙНОЇ ОСВІТНЬО – НАУКОВОЇ МАГІСТЕРСЬКОЇ ПРОГРАМИ

Анатолій Ковров¹, Ректор одеської Академії будівництва та архітектури,

Іван Назаренко², Президент Академії будівництва України,

Анастасія Пандас¹, доцента кафедри економіки підприємства

¹Одеська державна академія будівництва та архітектури, м. Одеса, Україна

²Академії будівництва України, м. Київ, Україна

АНОТАЦІЯ. У статті висвітлено актуальність впровадження інноваційної освітньо-наукової магістерської програми «BIM інжиніринг» в Одеській державній академії будівництва та архітектури в межах реалізації міжнародного проєкту ERASMUS+ KA2 The BRIDGE. Розглянуто основні етапи реалізації проєкту, включаючи аналіз потреб регіону, проведення опитування зацікавлених сторін, створення програми другого рівня вищої освіти за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія», а також відкриття BIM-лабораторії та стажування викладачів у європейських університетах. Підкреслено важливість інтеграції принципів цифровізації та сталого розвитку у вищу технічну освіту, а також значення міждисциплінарного підходу для підготовки фахівців нового покоління. Проєкт сприяє розвитку кадрового потенціалу будівельної галузі України, формуванню єдиного освітнього простору з країнами ЄС та впровадженню цифрових інновацій у навчальний процес.

Ключові слова: ERASMUS+; BIM; цифровізація будівництва; магістерська програма; освітні інновації; будівельна освіта; сталий розвиток; міжнародний проєкт; компетентності; інтеграція в ЄС

Впровадження магістерських програм з інформаційного моделювання будівель (BIM, від англ. Building Information Modeling) є важливим стратегічним кроком для сталого розвитку регіонів, оскільки відображає зростаючу потребу в освітньому та кадровому забезпеченні сучасної будівельної галузі. Посилення освітньої складової у цьому напрямку відповідає актуальному попиту на кваліфікованих фахівців, здатних працювати з передовими цифровими технологіями та інноваційними методами в будівництві.

З листопада 2023 року Одеська державна академія будівництва та архітектури розпочала реалізацію міжнародного проєкту The BRIDGE – «Подолання розриву між університетом і промисловістю: інноваційна магістерська навчальна програма, що підтримує розвиток зелених робочих місць і цифрових навичок в українському будівельному секторі» (ERASMUS-EDU-2022-SBHE-STRAND-2, Project ID 101082898).

Проєкт реалізується у партнерстві українських та європейських закладів вищої освіти, а також за участі Академії будівництва України та Інституту професійних кваліфікацій. Його головною метою є розробка комплексних магістерських програм з BIM проєктування, будівництва та експлуатації об'єктів, з акцентом на міждисциплінарну взаємодію фахівців і адаптацію до вимог сучасного ринку праці. Завданнями проєкту є створення, наповнення та запуск магістерських програм у кожному з українських університетів-партнерів, відкриття BIM-лабораторій, розробка навчально-методичних матеріалів, наукова діяльність, підвищення кваліфікації викладачів, проведення конференцій та різноманітних заходів.

Першим етапом реалізації проєкту в Одеській державній академії будівництва та архітектури стало дослідження потреб Одеського регіону та інституційного потенціалу академії у відповідному напрямку. Наступним важливим кроком стало проведення онлайн-опитування чотирьох цільових груп: здобувачів, викладачів, випускників і роботодавців. Це дозволило виявити ключові компетентності, які необхідно включити до структури освітньої програми.

На основі отриманих результатів академія розробила нову освітньо-наукову магістерську програму другого рівня вищої освіти за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія» – «BIM інжиніринг», загальним обсягом 120 кредитів ECTS. У процесі розробки програми було враховано європейський досвід та освітні рішення у сфері BIM. Програма базується на результатах анкетування, регіонального аналізу та інституційних потреб академії.

Метою програми є підготовка висококваліфікованих фахівців – BIM-менеджерів, координаторів, які володіють сучасною методологією BIM та здатні ефективно впроваджувати її в процесах проєктування, будівництва, експлуатації та управління життєвим циклом об'єктів будівництва.

Програма отримала позитивні відгуки та високі оцінки зовнішніх експертів проєкту: представників галузевих компаній з Нідерландів, Варшавського політехнічного університету, Вроцлавського університету науки і технологій, а також національних партнерів – Академії будівництва України та Інституту професійних кваліфікацій. Перший набір студентів заплановано на 2025–2026 навчальний рік.

У межах компоненту з підвищення кваліфікації викладачів представники команди проєкту від академії пройшли стажування в Словацькому технологічному університеті (м. Братислава, Словацька Республіка), Рейнсько-Вестфальському технічному університеті (м. Аахен, Німеччина), Варшавському політехнічному університеті (м. Варшава, Польща) та Університеті Санніо (м. Беневенто, Італія). Здобуті знання та навички активно впроваджуються у навчальний процес академії. Після повернення з навчальних візитів учасники організовують внутрішні тренінги й семінари, поширюючи сучасні підходи до викладання, проєктно-орієнтоване навчання та інтеграцію принципів сталого розвитку.

Наразі триває розробка методичних рекомендацій та навчальних посібників, які узагальнюють отриманий у рамках проєкту досвід. Ці матеріали стануть складовою навчального процесу, сприяючи довгостроковій сталій імплементації проєктних результатів та їх поширенню серед студентів і викладачів.

Завдяки системній роботі учасників проєкту інновації, напрацьовані у межах The BRIDGE, поширюються на рівні всієї академії, забезпечуючи мультиплікативний ефект на інституційному рівні.

Впровадження магістерської програми з BIM в Одеській державній академії будівництва та архітектури є не лише актуальною відповіддю на виклики цифрової трансформації у будівництві, а й вагомим внеском у розвиток людського капіталу, підвищення конкурентоспроможності регіону, створення інноваційного освітнього середовища та формування основ для інтеграції України у європейський освітній та професійний простір.

Список використаних джерел:

1. Bilal, M., Oyedele, L. O., Qadir, J., Munir, K., Ajayi, A. O., Akinade, O. O., & Alaka, H. A. (2016). Big data in the construction industry: A review of present status, opportunities, and future trends. *Advanced Engineering Informatics*, 30(3), 500–521. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2016.07.001>
2. Succar, B., Sher, W., & Williams, A. (2013). An integrated approach to BIM competency assessment, acquisition and application. *Automation in Construction*, 35, 174–189. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.05.016>
3. Volk, R., Stengel, J., & Schultmann, F. (2014). Building Information Modeling (BIM) for existing buildings — Literature review and future needs. *Automation in Construction*, 38, 109–127. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.10.023>
4. EUBIM Task Group (2017). Handbook for the introduction of Building Information Modelling by the European public sector. European Union.
5. Khosrowshahi, F., & Arayici, Y. (2012). Roadmap for implementation of BIM in the UK construction industry. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 19(6), 610–635. <https://doi.org/10.1108/09699981211277531>
6. ISO 19650-1:2018. Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) — Information management using building information modelling — Part 1: Concepts and principles.
7. Cavka, H. B., Staub-French, S., & Poirier, E. A. (2017). Developing owner information requirements for BIM-enabled project delivery and asset management. *Automation in Construction*, 83, 169–183. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.08.006>
8. Donato, M., Angi, M., Della Torre, S. (2023). BIM as a support for higher education: Innovative approaches for construction sector digitalization. *Journal of Information Technology in Construction (ITcon)*, 28, 189–205. <https://doi.org/10.36680/j.itcon.2023.010>

СЕКЦІЯ 6

«ТЕОРЕТИКО-ПРАКТИЧНІ ТА КОГНІТИВНІ АСПЕКТИ РОЗВИТКУ ЕКОНОМІКИ І МЕНЕДЖМЕНТУ В БУДІВНИЦТВІ»

ШАБЛОНИ УПРАВЛІННЯ БУДІВНИЦТВОМ ДЛЯ РОЗВИТКУ ЕКОНОМІКИ І МЕНЕДЖМЕНТУ

Олександр Меньлюк, професор, д.т.н., професор¹ (ORCID: 0000-0002-1007-309X),

Олексій Нікіфоров, доцент, к.т.н., доцент¹ (ORCID: 0000-0001-7002-7055),

¹ Одеська державна академія будівництва та архітектури, вул. Дідріхсона, 4, 65029, Одеса, Україна

АНОТАЦІЯ. В умовах військової агресії, що триває, необхідна відбудова може реалізовуватися у різноманітному організаційному середовищі, зазвичай сформованому без використання стандартів щодо методів управління. Відповідно, існує необхідність обґрунтування ефективності та запровадження інформаційно-комунікаційної концепції, яка пояснює, яким чином керувати будівництвом, в тому числі за наявності сучасних інформаційно-комунікаційних технологій. Обґрунтування ефективності використання цих інструментів в умовах будівельної галузі України є актуальним завданням, адже дозволить підтвердити можливість підвищення точності та швидкості керівних впливів, зниження витрат на управління і відповідного скорочення тривалості будівництва. В роботі виконано аналіз інформаційних джерел щодо факторів ефективності традиційних і новітніх методів управління та інформаційно-комунікаційних технологій. Розроблено наукову гіпотезу методики оцінки ефективності інформаційно-комунікаційної концепції "шаблон управління будівництвом", що об'єднує найбільш ефективні інноваційні та традиційні методи управління. Запропоновано двоетапну схему експериментального дослідження для обґрунтування ефективності шаблонів управління будівництвом. Розроблено опитувальну анкету для оцінки скорочення тривалості будівництва від впровадження методів управління та інформаційно-комунікаційних технологій. Розробка наукової гіпотези методики оцінки ефективності інформаційно-комунікаційної концепції "шаблон управління будівництвом" дозволила запропонувати відповідну двоетапну схему експериментального дослідження.

Ключові слова: шаблон управління будівництвом; опитування; експериментально-статистичне моделювання; кореляційно-регресивний аналіз; метод Монте-Карло.

Вступ. В умовах військової агресії, що триває, необхідна відбудова може реалізовуватися у різноманітному організаційному середовищі, зазвичай сформованому без використання стандартів щодо методів управління. Відповідно, існує необхідність обґрунтування ефективності та запровадження інформаційно-комунікаційної концепції, яка пояснює, яким чином керувати будівництвом, в тому числі за наявності сучасних інформаційно-комунікаційних технологій. Обґрунтування ефективності використання цих інструментів в умовах будівельної галузі України є актуальним завданням, адже дозволить підтвердити можливість підвищення точності та швидкості керівних впливів, зниження витрат на управління і відповідного скорочення тривалості будівництва.

Аналіз літературних джерел. Розробці інформаційно-комунікаційної концепції «шаблон управління будівництвом» присвячено монографію [1]. Публікації щодо визначення результатів впровадження методології управління проектами, в якості факторів ефективності розглядають як області знань відповідно до РМВоК [2], так і конкретні інструменти та результати їх використання. Відповідно, для більшої конкретизації опитування та підвищення достовірності досліджень, доцільно в якості факторів ефективності вибирати інструменти та визначні риси управління проектами. Розроблена авторами опитувальна анкета доступна за інтернет-посиланням [3]. Дослідження, присвячені визначенню ефективності впровадження системи управління якістю, включають в себе [4].

Мета роботи. Розробка методики обґрунтування ефективності шаблонів управління будівництвом шляхом створення відповідної логічної моделі, вибору математичних методів експериментального дослідження та розробки опитувальної анкети.

Матеріали і методи. Застосовано методи аналізу та синтезу при аналізі інформаційних джерел, запропоновано використання методів кореляційно-регресійного аналізу, експериментально-статистичного моделювання та методу Монте-Карло при експериментальних

дослідженнях.

Виклад основного матеріалу. Для ліквідації невизначеності організаційного середовища відбудови від наслідків військової агресії потрібна суттєво нова бізнес-модель, що об'єднувала б принципи системи управління якістю, управління проектами, наукової організації праці та управління в будівництві і можливості сучасних інформаційно-комунікаційних технологій. Такою бізнес-моделлю може стати метод управління будівельним виробництвом із застосуванням нової інформаційно-комунікаційної концепції «шаблон управління будівництвом» (рис. 1).

Використання новітньої інформаційно-комунікаційної концепції «шаблон управління будівництвом» враховує сучасне програмне забезпечення, найбільш ефективні інноваційні та традиційні методи управління: система управління якістю; управління проектами; будівельне інформаційне моделювання (Building Information Modeling – BIM); найбільш ефективні традиційні методи наукової організації праці та управління в будівництві; характерні особливості будівельної галузі (технологічна та інформаційна складність; проектно-орієнтованість і різноманітність умов реалізації будівельних проектів, значна кількість учасників і т.д.).



Рис.1. Ефективність інформаційно-комунікаційної концепції «шаблон управління будівництвом» [1]

Сутність нової концепції полягає у: виконанні інвестиційно-будівельного проекту від створення концепції об'єкта до здачі його в експлуатацію; використанні шаблонів управління будівництвом як основи управління підприємством; скороченні проміжних ієрархічних ланок при організації та контролі виробництва; створенні додаткових контурів контролю на додачу до традиційної ієрархічної структури управління в будівництві: управління знаннями, управління проектами, фінансового менеджменту та служб аудиту (внутрішніх та зовнішніх).

Вказані особливості можуть підвищити оперативність та точність управління, зменшивши тим самим тривалість портфелю проектів. Це має призвести до підвищення економічної ефективності інвестиційно-будівельних проектів: підвищення операційної рентабельності, оборотності капітальних вкладень, зменшення дисконтованих витрат.

Обговорення. Обґрунтування ефективності нової інформаційно-комунікаційної концепції можна зробити наступним чином.

1. Розробити теоретичні методи та моделі управління у складі інформаційно-комунікаційної концепції «шаблон управління будівництвом».
2. Запропонувати теоретичні засади та розробити модель операційної діяльності підприємства повного інвестиційно-будівельного циклу із використанням шаблонів управління будівництвом.
3. Провести статистичне дослідження впливу сучасних та традиційних методів управління на

тривалість будівництва.

4. Отримати результати експериментально-статистичного моделювання показників операційної діяльності підприємства повного інвестиційно-будівельного циклу від зменшення тривалості будівництва внаслідок впровадження методів управління та інформаційно-комунікаційних технологій. Ітераційне моделювання сукупності інвестиційно-будівельних проектів з використанням методу Монте-Карло та експериментально-статистичного моделювання дозволить із заданою ймовірністю розрахувати економічний ефект від запровадження нової концепції: підвищення економічної ефективності інвестиційно-будівельних проектів: підвищення операційної рентабельності, оборотності капітальних вкладень, зменшення дисконтованих витрат.

Опитувальна анкета доступна за інтернет-посиланням [3], а також за QR-кодом для зручності зчитування смартфоном (рис. 2). Кваліфіковані фахівці будівельної галузі заохочуються до висвітлення в даній анкеті свого досвіду щодо впровадження в Україні новітніх та традиційних методів управління в будівництві. В якості подяки за проходження опитування автори зобов'язуються надіслати його результати усім учасникам після статистичної обробки, а також надати наявні наукові результати для необмеженого використання та розповсюдження: монографію "Шаблон управління будівництвом – нова інформаційно-комунікаційна концепція" [1].

Участь у даному дослідженні дозволить об'єднати думки експертів галузі у взаємно інтегрованій інформаційно-комунікаційній концепції – "шаблон управління будівництвом", – що дасть можливість сформулювати засади для зменшення тривалості будівництва, збільшення системності та культури управління в будівництві та, за достатньої підтримки, сформулювати напрямок подальшого розвитку державної політики в галузі.

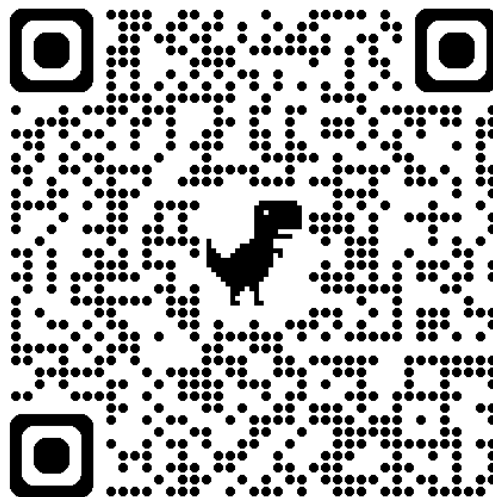


Рис.2. Посилання на опитувальну анкету з дослідження ефективності впровадження в Україні сучасних методів управління в будівництві [3]

Висновки. Опитувальна анкета з оцінки скорочення тривалості будівництва від впровадження новітніх та традиційних методів управління та інформаційно-комунікаційних технологій оцінює складові інформаційно-комунікаційної концепції «шаблон управління будівництвом». Анкета дозволяє охарактеризувати ступінь ознайомленості респондента з тим чи іншим методом та їхній професійний досвід.

Список використаних джерел:

1. Kovrov A. V., Meneiliuk O. I., Nikiforov O. L. (2021). *Shablon upravlinnia budivnytstvom – nova informatsiino-komunikatsiina kontseptsiiia* [Construction management template - a new information and communication concept]. Odessa: ODABA. (in Ukrainian).
2. *Nastanova do zvodu Znan z upravlinnia proiektamy (nastanova PMBOK). 7-e vydannia ta standart z upravlinnia proiektamy* [A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide) – 7th Edition of the project management standard.]. (2021) Translation from English: Savin A. A. and others. Pennsylvania: Institute of Project Management. URL: <https://res2.weblium.site/res/65b233680835c5000feec557/65ca57d1d6ab06000f91bd67> (in Ukrainian).

3. Meneiliuk O. I., Nikiforov O. L. (2024). *Opytuvalna anketa z doslidzhennia efektyvnosti vprovadzhennia v Ukraini suchasnykh metodiv upravlinnia v budivnytstvi* [An experimental questionnaire to study the effectiveness of current methods of management in everyday life in Ukraine]. Odessa: ODABA. URL: https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSdXKUfzGhxAa58Lbe7-xt_h82nnaniTAS5_3xnrv7YLgu8pMg/viewform (in Ukrainian).
4. *Upravlinnya zadlya dosyahnennya staloho uspiyku orhanizatsiyi. Pidkhyd na osnovi upravlinnya yakisty (ISO 9004:2009, IDT) : DSTU ISO 9004:2012* [Management to achieve sustainable success of the organization. Quality management approach (ISO 9004: 2009, IDT): DSTU ISO 9004: 2012]. (2013). Kyiv : Minekonomrozyvtyku Ukrayiny Publ. (in Ukrainian).

ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ ТРАНСФОРМАЦІЇ В БУДІВЕЛЬНОМУ ДЕВЕЛОПМЕНТІ

Сергій Буняк, аспірант¹ (ORCID: 0009-0005-0234-045X),

Галина Рижакова, професор, д.е.н., завідувачка кафедри¹ (ORCID: 0000-0002-7875-9768),

¹Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних сил 31, 03037, Україна

АНОТАЦІЯ. Досліджено концептуальні і теоретичні аспекти трансформації середовища будівельних девелоперських проєктів у цифрову екосистему. Ця трансформація є ключовою відповіддю на виклики сучасного будівництва, включаючи інтеграцію стейкхолдерів, оптимізацію ресурсів і необхідність сталого розвитку. У дослідженні наголошується на ролі цифрових технологій, таких як Building Information Modeling (BIM), системи управління ресурсами підприємства (ERP), Інтернет речей (IoT) і цифрові двійники, у забезпеченні прозорості, інтеграції та синхронізації операційних і управлінських процесів у будівельних проєктах. Дослідження висвітлює переваги цифрової екосистеми, серед яких зниження витрат, скорочення термінів реалізації проєктів, покращення якості управлінських рішень і мінімізація екологічного впливу. Крім того, інтеграція цих технологій підтримує довгострокове управління життєвим циклом будівельних проєктів, підвищуючи їхню операційну ефективність та екологічну стійкість. Основні результати підкреслюють необхідність адаптації бізнес-процесів до вимог цифрових екосистем, підготовки персоналу до використання передових цифрових інструментів і інтеграції цих технологій у вже існуючі організаційні структури.

Ключові слова: будівельне підприємство; цифрова екосистема; будівельний девелопмент; цифрова трансформація; будівельний проєкт; інновації.

Вступ. Операційно-виробничі й управлінсько-адміністративні імперативи девелопменту інвестиційно-будівельних проєктів визначають ключові аспекти організації, управління та виконання будівельних проєктів. Ці імперативи є основою для створення ефективної системи, що забезпечує успішну реалізацію проєктів, оптимізацію ресурсів та досягнення стратегічних цілей підприємства, охоплюючи всі аспекти, пов'язані з плануванням, виконанням і контролем будівельних робіт. Одним із ключових завдань є впровадження сучасних технологій і методів, таких як Building Information Modeling (BIM), що уможливорює створювати інтегровані моделі будівель і оптимізувати всі етапи проєкту. До цього також належать процеси автоматизації управління ресурсами, включаючи матеріали, обладнання, людські ресурси, а також моніторинг їхнього використання в реальному часі. Операційні імперативи також включають управління ризиками, планування логістики і забезпечення відповідності нормативним стандартам.

Аналіз літературних джерел. Операційно-виробничі й управлінсько- адміністративні імперативи девелопменту інвестиційно-будівельних проєктів є ключовими аспектами, що визначають ефективність та успішність реалізації будівельних ініціатив. У цій сфері є низка наукових праць, які заклали фундаментальні принципи та підходи до управління й організації будівельних проєктів.

Однією з основоположних робіт є книга Майкла Хаммера та Джеймса Чемпі "Реінжиніринг корпорації: Маніфест бізнес-революції" (1993). У цій праці автори вводять концепцію реінжинірингу бізнес-процесів, що передбачає радикальне переосмислення та перебудову основних бізнес- процесів для досягнення значних покращень у показниках продуктивності, якості та швидкості. Цей підхід став основою для багатьох організацій, включаючи будівельні компанії, у прагненні підвищити ефективність операційної діяльності.

Мета роботи. Мета полягає в розробці концептуально-теоретичної основи трансформації середовища будівельного девелоперського проєкту до формату цифрової екосистеми, яка забезпечує інтеграцію учасників, оптимізацію ресурсів та підвищення ефективності управління в умовах цифрової економіки.

Виклад основного матеріалу. Основоположником терміна "цифрова екосистема" вважається дослідник Джеймс Ф. Мур, який у 1993 р. вперше використав поняття "екосистема" в контексті бізнесу у своїй роботі "Predators and Prey: A New Ecology of Competition". Хоча первісно його концепція стосувалася бізнес- середовища, де організації взаємодіють подібно до природних екосистем, у подальшому це поняття було адаптовано до цифрової трансформації, що інтегрує технологічні, економічні та соціальні аспекти. Цифрова екосистема почала розглядатися як мережа взаємозалежних цифрових компонентів, які забезпечують обмін даними, співпрацю та створення цінності.

У контексті будівельного проєкту "цифрова екосистема" стає основою для інтеграції всіх учасників процесу – замовників, девелоперів, підрядників, постачальників і кінцевих користувачів. Будівельні проєкти, особливо в рамках сучасного девелопменту, включають велику кількість складних організаційно-технологічних процесів. Традиційно ці процеси виконувалися розрізнено, що призводило до втрат у часі, ресурсах і якості. Концепція цифрової екосистеми дає змогу перейти до більш інтегрованого підходу, де всі учасники можуть взаємодіяти через єдине цифрове середовище.

Цифрова екосистема в будівництві базується на технологіях, таких як Building Information Modeling (BIM), ERP-системи, Інтернет речей (IoT), хмарні платформи та штучний інтелект. Вона уможливорює створювати віртуальні моделі об'єктів, які інтегрують інформацію про дизайн, матеріали, ресурси та графіки виконання робіт. Це значно підвищує прозорість і передбачуваність будівельного процесу, мінімізує ризики та забезпечує можливість швидкого коригування рішень на основі актуальних даних. Застосування цифрової екосистеми в будівельних проєктах також відкриває нові можливості для управління життєвим циклом об'єкта. Вона допомагає забезпечити ефективну експлуатацію й обслуговування після завершення будівництва. Наприклад, цифрові двійники будівель (digital twins), створені в рамках екосистеми, забезпечують моніторинг стану об'єкта в реальному часі та прогнозування потреб у ремонті. Отже, концепція цифрової екосистеми, адаптована до будівельного девелопменту, стає ключовим інструментом для підвищення ефективності управління проєктами (таблиця). Вона не лише відповідає сучасним вимогам ринку, але й формує нові стандарти якості, інноваційності та стійкості у будівельній галузі.

Для забезпечення ефективного управління будівельними проєктами в умовах цифрової трансформації важливо оцінювати інтеграційний потенціал учасників, який визначає їхню спроможність до співпраці, оптимального використання ресурсів і досягнення синергетичних ефектів. Економіко-математичні моделі відіграють ключову роль у цьому процесі, надаючи аналітичні інструменти для оцінки внесків учасників, управління ризиками та визначення ефективності взаємодії в цифровій екосистемі. Вони спрямовані на виявлення сильних і слабких сторін взаємодії, забезпечення прозорості та підтримки прийняття обґрунтованих рішень у процесі реалізації будівельних проєктів.

Цифрові екосистеми в будівельному девелопменті стали ключовим інструментом для адаптації галузі до сучасних викликів, таких як глобалізація, потреба у сталому розвитку та підвищення ефективності управління проєктами. Використання цифрових рішень допомагає інтегрувати учасників проєкту, автоматизувати процеси, зменшувати ризики та створювати більш екологічно відповідальні будівельні рішення. У світовій практиці відомі приклади інноваційних проєктів, де цифрова екосистема стала основою для досягнення високих результатів. Вони демонструють можливості, які надають передові технології для організації будівельних процесів у глобальному контексті. Наведемо декілька прикладів міжнародних будівельних девелоперських проєктів, реалізованих у форматі цифрової екосистеми.

Hudson Yards (Нью-Йорк, США) – масштабний проєкт змішаного використання, що активно застосовує технологію Building Information Modeling (BIM) для інтеграції всіх етапів будівництва. Цифрова екосистема забезпечує координацію між архітекторами, інженерами та підрядниками,

оптимізуючи процеси проєктування і будівництва. Використання цифрових технологій уможливило зменшити витрати і скоротити терміни реалізації проєкту.

Crossrail (Лондон, Велика Британія), відомий як Elizabeth Line, є однією з найбільших інфраструктурних ініціатив Європи. Він використовує цифрову екосистему для управління складною мережею підземних тунелів та станцій. Інформаційне моделювання й інтегровані платформи даних забезпечують ефективну співпрацю між численними підрядниками та постачальниками, підвищуючи точність і знижуючи ризики.

Обговорення. Впровадження таких технологій, як Building Information Modeling (BIM), ERP-системи, Інтернет речей (IoT) і цифрові двійники (digital twins), дає змогу оптимізувати планування, реалізацію та управління життєвим циклом об'єкта. Ці інструменти не лише сприяють підвищенню якості проєктування та будівництва, а й забезпечують ефективну експлуатацію об'єктів у довгостроковій перспективі. Водночас ключовими викликами залишаються адаптація бізнес-процесів, підвищення кваліфікації персоналу та інтеграція цифрових технологій у вже наявні організаційні структури.

Висновки. У результаті дослідження концептуально-теоретичних аспектів трансформації середовища будівельного девелоперського проєкту до формату цифрової екосистеми було виявлено, що цифровізація є ключовим фактором для підвищення ефективності, стійкості та конкурентоспроможності будівельних підприємств. Цифрова екосистема об'єднує всіх учасників проєкту, включаючи замовників, підрядників, девелоперів і постачальників, у єдине інформаційне середовище, яке забезпечує прозорість, інтеграцію та синхронізацію операційних і управлінських процесів.

Список використаних джерел:

1. Krychevs'ka, Y., Ryzhakova, G., Shpakov, A., Pokolenko, V. & Prykhodko, D. (2024). Digital ecosystem in construction development: conceptual-theoretical aspects of transformation and management imperatives. *Management of Development of Complex Systems*, 60, 174–182, dx.doi.org/10.32347/2412-9933.2024.60.174-182.
2. Hammer, Michael, and James Champy (1993). *Reengineering the Corporation: A Manifesto for Business Revolution*. Harper Business, 233 pages.
3. Koskela, Lauri (1992). *Application of the New Production Philosophy to Construction*. Technical Report No. 72, Center for Integrated Facility Engineering, Department of Civil Engineering, Stanford University, 75 pages.
4. Tzortzopoulos, P., Kagioglou, M., and Koskela, L. (2017). *Lean Construction: Core Concepts and New Frontiers*. Routledge, 312 pages.
5. Ballard, Glenn, and Howell, Gregory (1994). "Implementing Lean Construction: Stabilizing Work Flow." *Proceedings of the 2nd Annual Conference on Lean Construction*, pp. 101–110.
6. Vrijhoef, R., and Koskela, L. (2000). "The Four Roles of Supply Chain Management in Construction." *European Journal of Purchasing and Supply Management*, vol. 6, no. 3-4, pp. 169–178.
7. Bielenkova, O. Y. (2019). Digital Transformation in Construction: Mechanism of Interaction Between Business, Science, and State. *Construction Production*, 66 (1), 30–36. <https://doi.org/10.36750/2524-2555.66.30-36> {in Ukrainian}.
8. Ryzhakova, G., Prykhodko, D., Pokolenko, V., Petrukha, N., Chupryna, Y. & Khomenko, O. (2022). Updating Scientific and Methodological Approaches to the Construction of a Multi-Criteria Administration System for Stakeholders of Construction Projects. *Spatial Development*, 1, 218–233. DOI: 10.32347/2786-7269.2022.1.218-233. {in Ukrainian}.
9. Homenko, O., Petrenko, H., Ryzhakova, G., Chupryna, Yu., Malykhina, O., Petrukha, N. & Kushnir, O. (2022). Modern tools and software products for the administration of construction organizations in the conditions of transformation of operational management systems. *Management of Development of Complex Systems*, 52, 113–125, dx.doi.org/10.32347/2412-9933.2022.52.113-125. {in Ukrainian}.
10. Pokolenko, V. O., Ryzhakova, G. M. & Prykhodko, D. O. (2014). Introduction of Tools for Selecting Alternatives for the Implementation of Construction Projects Based on Functional and Technical Reliability of Executing Organizations. *Management of Complex Systems Development*, 19 (2), 108–114. <https://urss.knuba.edu.ua/files/zbirnyk-19/108-114.pdf> {in Ukrainian}.
11. Petrenko, A., Petrukha, N., Ryzhakova, H., Marchuk, T., Malykhina, O. & Prykhodko, D. (2021). Choice of budgeting imperatives for investment and construction project as a direction of improving the financial management system of the enterprise. *Management of Development of Complex Systems*, 46, 108–117, dx.doi.org/10.32347/2412-9933.2021.46.108-117. {in Ukrainian}.

ІНТЕГРАЦІЙНІ МОДЕЛІ УПРАВЛІННЯ СИСТЕМАМИ БУДІВЕЛЬНИХ ПРОЄКТІВ

Дмитро Приходько доцент, к.т.н., доцент¹ (ORCID: 0000-0002-4926-4790),

Юлія Северенчук магістр¹,

Катерина Сосідко магістр¹,

Ростислав Заладовський бакалавр¹,

¹ Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних сил 31, 03037, Україна

АНОТАЦІЯ. Досліджено еволюція операційних систем будівельних проєктів у контексті інтеграційного підходу в будівельному девелопменті та організаційно-технологічні аспекти мультипроєктної діяльності підприємств-стейкхолдерів будівництва. Розглянуто сучасні методи управління будівельними проєктами, зокрема використання цифрових платформ співпраці, інноваційні підходи до оптимізації операційних систем будівельних проєктів у контексті інтеграції стейкхолдерів, інформаційного моделювання будівель (BIM), концепції "розумного будівництва" (Smart Construction), а також гнучких методологій управління, таких як Lean та Agile. Основна увага приділяється застосуванню цифрових інструментів, які забезпечують ефективну координацію між різними учасниками проєктів, знижують ризики помилок і підвищують прозорість процесів. Описано приклади практичної реалізації цих підходів на провідних будівельних проєктах, таких як Hudson Yards у Нью-Йорку, Crossrail у Лондоні, Sydney Opera House та One World Trade Center. Зокрема, використання BIM дозволило покращити управління життєвим циклом проєктів, зменшити витрати та прискорити реалізацію.

Ключові слова: організація будівництва; операційних систем; будівельні проєкти; інтеграційний підхід; будівельний девелопмент; мультипроєктна діяльність; стейкхолдери будівництва; організаційно-технологічні аспекти; інформаційне моделювання будівель (BIM).

Вступ. Сучасний будівельний девелопмент стикається з викликами, які вимагають перегляду традиційних підходів до управління будівельними проєктами. Складність, багатоступеневість та інтеграція багатьох стейкхолдерів в межах одного чи кількох паралельних проєктів роблять актуальним питання еволюції операційних систем. Організаційно-технологічний аспект мультипроєктної діяльності вимагає не тільки ефективного управління ресурсами, але й створення єдиних платформ для комунікації, аналізу та контролю. У цьому контексті інтеграційний підхід стає невід'ємною частиною стратегії успішного будівельного девелопменту. Він сприяє гармонізації організаційних і технологічних процесів, що є ключовим фактором для забезпечення ефективності та конкурентоспроможності на ринку.

Аналіз літературних джерел. Ansoff I. у своїй класичній праці "Corporate Strategy" [1] розглядає стратегічне планування для зростання та розширення бізнесу, пропонуючи аналітичний підхід до побудови стратегії, що залишається актуальним для багатьох галузей. Porter M. у "Competitive Strategy" [2] досліджує методи аналізу конкурентного середовища та розробки стратегій для здобуття переваги на ринку, акцентуючи увагу на динаміці галузей та конкурентів. Womack J., Jones D. і Roos D. у "The Machine That Changed the World" [3] представляють концепцію ощадливого виробництва (Lean Production), яка докорінно змінила підходи до організації процесів у багатьох галузях, включно з будівництвом. Kerzner H. у "Project Management" [4] надає системний підхід до планування, управління і контролю проєктів, який став стандартом для управління в складних мультипроєктних середовищах. Eastman C. та інші у "Building Information Modeling" [5] обговорюють використання інформаційного моделювання будівель (BIM) для планування та управління будівельними проєктами, з акцентом на візуалізацію та симуляцію в 4D. Sears S. та співавтори у "Construction Project Management" [6] пропонують всебічний аналіз управління будівельними проєктами.

Мета роботи полягає у дослідженні еволюції операційних систем будівельних проєктів у контексті інтеграційного підходу, спрямованого на підвищення ефективності організаційно-технологічного управління мультипроєктною діяльністю підприємств-стейкхолдерів будівельного девелопменту. Основним завданням є розробка науково-методичних засад та практичних рекомендацій щодо адаптації операційних систем до сучасних вимог інтеграції, інновацій та цифровізації, що забезпечують оптимальну координацію діяльності стейкхолдерів, зниження ризиків та підвищення конкурентоспроможності будівельних проєктів.

Виклад основного матеріалу. Інтеграційний підхід у будівельному девелопменті має дві основні складові: технологічну та організаційну. Технологічна складова передбачає впровадження інноваційних рішень для уніфікації процесів, аналізу даних та автоматизації рутинних операцій. Організаційна складова зосереджується на адаптації бізнес-моделей до нових реалій та розвитку комунікацій між стейкхолдерами. BIM-технології є яскравим прикладом інтеграційного підходу. Вони об'єднують архітектурні, інженерні та будівельні аспекти проєкту, забезпечуючи доступ до актуальної інформації для всіх учасників. Це дозволяє мінімізувати ризики, зменшити витрати та оптимізувати процеси. ERP-системи є ще одним важливим компонентом. Вони дозволяють інтегрувати управління ресурсами, фінансами, матеріальним забезпеченням та логістикою в рамках єдиної платформи. Завдяки цьому стейкхолдери отримують доступ до централізованих даних, що забезпечує кращу координацію та ефективність. У будівельному девелопменті часто реалізується кілька проєктів одночасно. Це створює унікальні виклики, які потребують особливих підходів до організації операційних систем. Мультипроєктне середовище ускладнює координацію ресурсів, управління залежностями між проєктами та контроль виконання. Інтеграційний підхід дозволяє ефективно вирішувати ці проблеми. Центральні бази даних і автоматизовані модулі управління пріоритетами дозволяють уникати конфліктів і забезпечувати оптимальний розподіл ресурсів. Аналітичні інструменти, засновані на штучному інтелекті, допомагають прогнозувати ризики та швидко приймати рішення. Організаційний аспект мультипроєктної діяльності також включає створення єдиної команди, яка працює над усіма проєктами, та впровадження чітких протоколів комунікації. Це мінімізує ризики через недоліки у взаємодії між стейкхолдерами. Інтеграційний підхід і сучасні операційні системи створюють значні переваги для всіх учасників будівельного процесу. Замовники отримують прозорість у реалізації проєкту, можливість контролювати хід робіт у реальному часі та оптимізувати фінансові витрати. Підрядники, своєю чергою, знижують витрати, мінімізують кількість помилок і отримують доступ до інструментів, які підвищують продуктивність. Постачальники можуть точніше планувати постачання, зменшуючи затримки. Регулятори отримують доступ до цифрових моделей проєктів і можуть проводити ефективний моніторинг.

Інноваційні підходи до оптимізації операційних систем будівельних проєктів в умовах інтеграції стейкхолдерів зосереджуються на використанні сучасних технологій, методологій та управлінських стратегій для створення ефективного та взаємоузгодженого середовища реалізації проєктів. Основна увага приділяється забезпеченню прозорості процесів, зменшенню витрат, покращенню комунікацій між учасниками проєктів та підвищенню якості кінцевого продукту.

У сучасних умовах акцент робиться на розробці "зелених" проєктів, які відповідають принципам сталого розвитку. Це включає використання екологічно чистих матеріалів, оптимізацію енергоспоживання та впровадження енергоефективних рішень.

Віртуальна та доповнена реальність (VR/AR). Технології VR/AR дозволяють учасникам проєкту взаємодіяти з віртуальними моделями будівель ще до початку їх фізичного будівництва. Це допомагає виявляти можливі проблеми на ранніх етапах, проводити навчання для персоналу та залучати замовників до процесу прийняття рішень.

Ці інноваційні підходи формують нову парадигму в управлінні будівельними проєктами, сприяючи створенню більш стійких і ефективних операційних систем у галузі будівельного девелопменту:

- зниження витрат і строків реалізації проєктів;
- підвищення якості будівництва та задоволення потреб стейкхолдерів;
- поліпшення комунікації та співпраці між учасниками;
- забезпечення гнучкості в управлінні проєктами;
- оптимізація використання ресурсів і підвищення екологічності будівельних процесів.

Обговорення. Використання сучасних цифрових інструментів, таких як OLAP, ERP, CRM, та впровадження інформаційного моделювання будівель (BIM) сприяє підвищенню прозорості процесів, оптимізації ресурсів та зниженню ризиків у будівельному девелопменті. Інтеграція стейкхолдерів через цифрові платформи, гнучкі методології управління (Agile, Lean Construction) та концепції "розумного будівництва" дозволяє адаптувати проєктні системи до сучасних викликів і

забезпечити їх стійкий розвиток..

Висновки. Еволюція операційних систем у будівельному девелопменті є невід’ємною частиною розвитку галузі в умовах сучасних викликів. Інтеграційний підхід дозволяє гармонізувати організаційні та технологічні процеси, забезпечуючи успішну реалізацію мультипроектної діяльності. Майбутнє будівельної галузі залежить від здатності підприємств інтегрувати інноваційні рішення у свою практику, що дозволить створити ефективні й прозорі операційні системи. Важливо розуміти, що такі зміни є не лише технологічним оновленням, а й новим підходом до управління, співпраці та розвитку. Інтеграція, цифровізація та інновації – це ключі до успіху в будівельному девелопменті. Еволюція операційних систем будівельних проєктів у контексті інтеграційного підходу є важливим етапом для забезпечення ефективності управління в мультипроектному середовищі.

Список використаних джерел:

1. Ansoff, I. (1965). *Corporate Strategy: An Analytical Approach to Business Policy for Growth and Expansion*. New York: McGraw-Hill. 241 p. {in English}.
2. Porter, M. (1980). *Competitive Strategy: Techniques for Analyzing Industries and Competitors*. New York: Free Press. 397 p. {in English}.
3. Womack, J. P., Jones, D. T., & Roos, D. (1990). *The Machine That Changed the World*. New York: Rawson Associates. 323 p. {in English}.
4. Kerzner, H. (1995). *Project Management: A Systems Approach to Planning, Scheduling, and Controlling* (6th ed.). New York: Van Nostrand Reinhold. 1,008 p. {in English}.
5. Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R., & Lee, G. (2008). *Building Information Modeling: Planning and Managing Construction Projects with 4D CAD and Simulations*. New York: Wiley. 504 p. {in English}.
6. Sears, S.K., Sears, G.A., Clough, R.H., Rounds, J.L., & Segner, R.O. (2015). *Construction Project Management* (6th ed.). Hoboken, NJ: Wiley. 419 p.
7. Williams, T. (2003). *Construction Management: Emerging Trends and Technologies*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall. 312 p. {in English}.
8. Chernyshev, D., Ryzhakova, G., Honcharenko, T., Petrenko, H., Chupryna, I., Reznik, N. (2022). Digital Administration of the Project Based on the Concept of Smart Construction. *Lecture Notes in Networks and Systems*, vol 495, pp. 1316-1331 Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-08954-1_114. {in English}.
9. Tormosov, R., Chupryna, I., Ryzhakova, G., Pokolenko V., Prykhodko, D., Faizullin, A. (2021). "Establishment of the rational economic and analytical basis for projects in different sectors for their integration into the targeted diversified program for sustainable energy development," 2021 IEEE International Conference on Smart Information Systems and Technologies (SIST), 2021, pp. 1-9, 9465993. <http://doi: 10.1109/SIST50301.2021.9465993>. {in English}.
10. Malykhin, M., Prykhodko, D., Herhi, M., Katsiuba, I., Kyryk, Y., & Zhaldak, R. (2024). Development of integration models for operations management in multiproject environments. *Spatial Development*, (10), 365–377. <https://doi.org/10.32347/2786-7269.2024.10.365-377>. {in Ukrainian}.

«ЧИСТИЙ» ПРОМИСЛОВИЙ КУРС ЄС ЯК ОРІЄНТИР ДЛЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОГО ВІДНОВЛЕННЯ ІНФРАСТРУКТУРИ УКРАЇНИ: МОДЕЛІ, ВИКЛИКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ

Ніна Петруха, к.е.н., доцент, доцент кафедри менеджменту в будівництві¹ (ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3805-2215>),

Павло Ущенко, аспірант² (ORCID: 0009-0005-5288-0585)

¹ Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, проспект Повітряних Сил, 31, 03037, Україна

² Західноукраїнський національний університет, м. Тернопіль, вул. Львівська, 11, 46009, Україна

АНОТАЦІЯ. Проаналізовано європейську стратегію «Clean Industrial Deal» як модель, що поєднує декарбонізацію, цифровізацію та реіндустріалізацію, і може слугувати орієнтиром для повоєнного відновлення України. У роботі розглянуто ключові напрями стратегії: доступна енергія, лідерські ринки для чистих технологій, циркулярна економіка, цифровізація, розвиток людського капіталу. Особливу увагу приділено можливостям адаптації принципів цієї стратегії до сучасних умов України, з урахуванням потреб енергоефективної реконструкції інфраструктури. Обґрунтовано роль державно-приватного партнерства, трансферу технологій та розвитку системи професійної освіти у повоєнній стратегії відновлення України. Запропоновано конкретні напрямки використання європейського досвіду в національній економічній політиці відновлення України від наслідків війни.

Ключові слова: декарбонізація; енергоефективність; циркулярна економіка; біоекономіка; будівельна галузь; повоєнне відновлення; економічна політика.

Вступ. В умовах глибоких геополітичних змін та зростаючих кліматичних викликів питання трансформації промислового сектору, забезпечення енергоефективності та сталого відновлення інфраструктури набувають особливої актуальності. Для України, яка переживає затяжну війну і водночас формує підвалини повоєнної відбудови, надзвичайно важливо інтегрувати сучасні підходи до реконструкції промислового потенціалу [1–2], що відповідають принципам сталого розвитку, екологічної відповідальності та економічної ефективності. У цьому контексті цінним є досвід Європейського Союзу, зокрема його стратегія «The Clean Industrial Deal», яка поєднує в єдине ціле різновекторні цілепокладання декарбонізації, цифрової трансформації та економічної стійкості.

Аналіз літературних джерел. Сучасні наукові праці та аналітичні матеріали акцентують увагу на необхідності інтеграції «зеленого» курсу у процес післякризового відновлення світової економіки. Зокрема, у [3] наголошується на потенціалі циркулярної економіки для зниження залежності від імпорту сировини у постконфліктних регіонах. Європейська мережа кліматичних дій [4] вказує, що стратегія «Clean Industrial Deal» є унікальним зразком синергії між промисловою, кліматичною та інвестиційною політиками. У працях [5–7] розглянуто можливість залучення європейських механізмів зеленого фінансування до реконструкції зруйнованих енергетичних і транспортних об'єктів. Також аналітичні звіти Світового банку (2022–2024) [8–9] надають кількісні оцінки потреб України у відбудові, підкреслюючи значення енергоефективних підходів. Усі згадані джерела вказують на нагальну потребу у комплексному використанні європейських стратегічних інструментів у відновлювальній політиці України.

Мета роботи. Проаналізувати потенціал стратегії «Clean Industrial Deal» [10] як моделі для енергоефективного та сталого відновлення інфраструктури України у повоєнний період.

Матеріали і методи. У роботі використано метод контент-аналізу «The Clean Industrial Deal», порівняльний аналіз підходів до індустриальної трансформації в ЄС та Україні, а також системний підхід до вивчення міждисциплінарних взаємозв'язків між енергетичною, екологічною, економічною та соціальною політиками. Доповнювальними методами були логіко-аналітичний та інтерпретаційний аналіз відповідних публікацій наукових і статистико-аналітичних установ.

Виклад основного матеріалу. Європейська стратегія «Clean Industrial Deal» є унікальною політико-економічною ініціативою, спрямованою на поєднання декарбонізації, енергонезалежності та індустриального зростання. Вона передбачає створення умов для масового використання чистої енергії через цифровізацію енергетичних мереж, запровадження інноваційних фінансових

інструментів для промисловості, таких як РРА-контракти з підтримкою Європейського інвестиційного банку.

Одним з пріоритетів є формування лідерських ринків, зокрема для низьковуглецевої сталі, екологічного цементу, сталевих конструкцій, батарей, вітро- та сонячної енергетики. Розробляється добровільне маркування вуглецевої інтенсивності продукції, що дозволяє виробникам отримувати ринкову перевагу. Підвищення попиту на екологічну продукцію досягається через перегляд механізмів державних закупівель та екологічне маркування.

Ще одним важливим компонентом є розвиток циркулярної економіки. ЄС ставить за мету підвищити використання вторинних ресурсів до 24% до 2030 року, з особливим акцентом на електроніку, транспорт, будівництво. Передбачається створення міжрегіональних хабів з переробки, а також посилення ролі вторинної сировини у державних проєктах. Цей підхід дає змогу зменшити залежність від імпорту сировини та знизити енергоспоживання виробництва.

Особливу увагу ЄС приділяє людському капіталу, запускаючи «Союз навичок» – стратегію для перепідготовки фахівців та залучення молоді до високотехнологічних галузей. Заплановані інвестиції в освітні платформи, розвиток профтехосвіти, підтримку мобільності кадрів та узгодження навичок на ринку праці.

Усі ці компоненти можуть бути адаптовані в Україні – як у межах міжнародного партнерства, так і через внутрішні інституційні реформи. Зокрема, в енергетичному секторі варто впроваджувати цифрові платформи управління мережами, а в будівництві – системи сертифікації на зразок європейських. Уже сьогодні в Україні реалізуються пілотні проєкти з використанням моделі smart grids, а концепція зелених муніципалітетів набирає популярності.

Післявоєнне відновлення інфраструктури України потребує не лише технічного, а й стратегічного переосмислення. Європейський досвід демонструє, що стійке будівництво можливе лише за умов міжсекторальної координації, розвитку локального виробництва та підтримки малого і середнього бізнесу у сфері повоєнного відновлення.

Обговорення. Запропонована стратегія ЄС є не просто пакетом заходів, а модельною основою для структурних перетворень. Для України важливо не лише перейняти окремі елементи, а й інтегрувати їх в національну економічну політику. Успішне відновлення потребує не копіювання чи кальки, а адаптації – з урахуванням українського економічного, екологічного та соціального контексту. Особливої ваги набуває координація зусиль між урядом, наукою, бізнесом і громадським сектором.

Висновки. Стратегія «Clean Industrial Deal» постає як цілісна модель європейського курсу на сталий розвиток, що поєднує декарбонізацію, інновації, енергоефективність, циркулярну економіку та цифрову трансформацію промисловості. Її впровадження в Європейському Союзі демонструє високий потенціал для формування нової економічної парадигми, де промислове зростання не суперечить екологічним зобов'язанням. Для України, яка стоїть перед масштабним завданням відбудови після руйнувань, ця стратегія є цінним орієнтиром для формування національної біоекономічної політики реконструкції, заснованої на стійкості, енергоощадності та технологічному оновленні.

Адаптація європейського біоекономічного досвіду може включати розвиток внутрішнього ринку чистих технологій, впровадження «зелених» державних закупівель, запуск систем екологічного сертифікування будівельної продукції, створення регіональних переробних хабів та цифровізацію енергетичної інфраструктури. Особливої ваги набуває підготовка й перепідготовка фахівців, розвиток професійної освіти, а також залучення інвестицій у «зелену» економіку через державно-приватне партнерство. Післявоєнне відновлення має стати не повторенням минулого, а створенням нової, розумної інфраструктури, яка відповідатиме вимогам енергетичної незалежності, екологічної безпеки та конкурентоспроможності в умовах європейської інтеграції. У цьому контексті стратегічне партнерство з ЄС є ключовим фактором не лише економічного підйому на засадах біоекономіки, а й посилення національної стійкості України у XXI столітті.

Список використаних джерел:

1. Ioffe, M., Klimova, I. & Petrukha, N. (2025). The Dynamics of Behavioural Economics and its Influential Determinants. *Journal of Posthumanism*, 5 (2). 1682–1699. <https://doi.org/10.63332/joph.v5i2.548>
2. Petrukha, N., Klymenko, K., Petrukha, S. & Miakota, R. (2024) Orthodox-Innovative Exposition of Financial Mechanisms of the Post-War Reconstruction of the Economy of Ukraine. *Economics, Finance and Management Review*, 2(18). 101–120. <https://doi.org/10.36690/2674-5208-2024-2-101-120>
3. Melnyk, M.I. (Ed.). (2024). Resilience of endogenous development of regions in the context of global challenges and shocks [Rezylentnist endohennoho rozvytku rehioniv v umovakh hlobalnykh vyklykiv ta shokiv]. Lviv: M.I. Dolishnyi Institute for Regional Studies of the National Academy of Sciences of Ukraine [in Ukrainian].
4. Climate Action Network (CAN) Europe position on Clean Industrial Deal. https://caneurope.org/content/uploads/2025/02/Clean-Industrial-Deal_CAN-Europe-Position_Feb2025.pdf
5. Sources of Green Finance: Ukraine Investment Framework. *International Renaissance Foundation*. <https://gto.dixigroup.org/assets/images/files/green-financing-uif-a4.pdf>
6. Best practices in debt restructuring and post-war green recovery: opportunities for Ukraine [Krashchi praktyky restrukturyzatsii borhu ta povoiennoho «zelenoho» vidnovlennia: mozhlyvosti dlia Ukrainy] (2022). *International Renaissance Foundation*. https://dixigroup.org/wp-content/uploads/2022/08/2-quart_d4cl.pdf [in Ukrainian].
7. The Green Deal in Ukraine: a complex movement towards sustainable development [Zelenyi kurs v Ukraini: skladnyi rukh do staloho rozvytku]. (2023). *UKRAINSKA ENERGETYKA*. <https://uaenergy.org/uk/posts/zelenyi-kurs-v-ukraini-skladnyi-rukh-do-stiikoho-rozvytku-3103-2023> [in Ukrainian].
8. Opportunities for Private Sector Engagement in Ukraine's Green and Resilient Recovery Synthesis Report October 2023 [Mozhlyvosti zaluchennia pryvatnoho sektoru do zelenoi ta stiikoi vidbudovy Ukrainy Uzahalniuiuchy zvit zhovten 2023 roku]. (2024). *World Bank*. <https://www.ifc.org/content/dam/ifc/doc/2023/synthesis-report-private-sector-opportunities-for-a-green-resilient-reconstruction-ukraine-uk.pdf> [in Ukrainian].
9. Ukraine Rapid assessment of damage and recovery needs February 2022 – February 23 [Ukraina shvydka otsinka zavdanoi shkody ta potreb na vidnovlennia liutyi 2022 – liutyi 2023]. (2023). *World Bank*. <https://documents1.worldbank.org/curated/en/099062823034041908/pdf/P18017401fe8430010af21016afb4ebc8c4.pdf> [in Ukrainian].
10. Clean Industrial Deal (2025). https://commission.europa.eu/topics/eu-competitiveness/clean-industrial-deal_en?prefLang=uk

КЛАСТЕРИ ЯК ОСНОВА СТІЙКОГО ПОВОЄННОГО ВІДНОВЛЕННЯ ІНФРАСТРУКТУРИ УКРАЇНИ

Сергій Петруха, к.е.н., доцент, доцент кафедри менеджменту в будівництві¹ (ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8859-0724>),

Владислав Яворський, аспірант² (ORCID: 0009-0006-4140-2956),

¹Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, проспект Повітряних Сил, 31, 03037, Україна

²Західноукраїнський національний університет, м. Тернопіль, вул. Львівська, 11, 46009, Україна

АНОТАЦІЯ. У доповіді розглядається роль кластерів через призму домінантного елементу інноваційної екосистеми Європейського Союзу та наводяться потенційні типології їх апроксимації до умов повоєнної України. З цією метою проаналізовано європейську кластерну політику, зокрема в контексті емпіричних даних *European Cluster Raportata*, та виокремлено механізми, які можуть бути інтегровані до національної економічної політики та до тригерів повоєнного відновлення, в тому числі визначених на високому політичному рівні в *Ukraine Facility Plan*. На основі кращого європейського досвіду доведено здатність кластерів забезпечити мульти-трансформацію (одночасно зелений і цифровий перехід), підвищення конкурентоспроможності, стимулювання підприємницької активності, формування людського капіталу та посилення економічної стійкості. Сформовано рекомендації щодо розвитку кластерної екосистеми в Україні з урахуванням регіональних особливостей, викликів російсько-української війни та євроінтеграційних прагнень держави.

Ключові слова: кластери; інфраструктура; післявоєнне відновлення; мульти-трансформація; стійкість; євроінтеграція.

Вступ. На тлі масштабних руйнувань інфраструктури внаслідок російсько-української війни гостро постає потреба в обґрунтуванні нових підходів до відновлення та розвитку економіки. У сучасному європейському дискурсі на тлі вичерпання ортодоксального бачення архітектури політики економічного розвитку особливу увагу приділено кластерному підходу як інструменту

стимулювання регіонального розвитку, інноваційної активності та економічної стійкості. Кластери, що об'єднують підприємства, наукові установи, органи влади та інші зацікавлені сторони навколо спільних цілей, відіграють важливу роль у впровадженні мульти-переходу, тобто синергії зеленої та цифрової трансформації економіки, виводячи її в рушійну силу майбутнього світового економічного розвитку.

У країнах ЄС кластери стали потужними економічними агентами структурної трансформації економіки та підвищення її конкурентоспроможності. Підтвердженням цьому є емпіричні дані, наведені у звіті «European Cluster Panorama 2024» [1], які, серед іншого, доводять також їх домінуюче значення в процесах цифровізації економіки, переходу до відновлювальної енергетики, розвитку сектору охорони здоров'я, забезпечуючи мобільність робочої сили, суттєве зростання доданої вартості (зокрема стійкості відповідних ланцюгів) та зайнятості в нових секторах економіки. Саме тому в умовах воєнної економіки та під час повоєнного відновлення, Україні слід враховувати цей досвід для вибудовування стійкої, енергоефективної, «зеленої» та інноваційної інфраструктури, яка в підсумку дозволить підтримати євроінтеграційні прагнення України.

Мета роботи полягає в дослідженні потенціалу кластерної моделі розвитку як інструменту відновлення української інфраструктури в післявоєнний період із урахуванням досвіду Європейського Союзу.

Аналіз літературних джерел. Європейська кластерна політика розвивається вже понад два десятиліття. Основні концепції кластерного розвитку закладено у працях М. Портера [2], який визначив кластери як географічну концентрацію взаємопов'язаних компаній, постачальників, установ та інституцій. Дослідження [1] окреслює сучасну карту кластерних організацій у ЄС та демонструє їхній внесок у трансформаційні процеси.

Зокрема, роботи [3] та [4] підтверджують, що наявність кластерів позитивно корелює з рівнем інноваційності, кількістю патентів та зростанням ВВП. Європейський інвестиційний банк [6] аналізує взаємозв'язок цифрової трансформації та кластерних ініціатив. Провідна роль кластерів у «зеленому» переході відзначена у [7] щодо цифрової економіки, відновлюваної енергетики та аграрного сектору економіки. Ці джерела підтверджують, що кластери формують не лише технологічні платформи, але й соціальний капітал, що сприяє швидкій адаптації до ендо- і екзогенних викликів, забезпечуючи додаткову стійкість ланцюгів створення доданої вартості.

Матеріали і методик. У роботі використано системний підхід до аналізу європейської кластерної політики. Джерелами якої є [1; 7], аналітичні матеріали Європейської Комісії та дані Eurostat. Методи включають контент-аналіз документів, порівняльний аналіз кластерних активностей в країнах ЄС і в окремих регіонах України, а також екстраполяцію виопрацьованих європейських моделей до українських реалій.

Виклад основного матеріалу. Європейський досвід демонструє, що кластери є не лише локальними об'єднаннями виробників, а потужними платформами для технологічного розвитку та міжсекторальної співпраці. Вони охоплюють увесь ланцюг створення доданої вартості – від наукових досліджень і розробок до готових продуктів й виходу на ринок [8]. У ЄС функціонує понад трьох тисяч кластерних ініціатив, значна частина з яких має прямий вплив на досягнення Цілей сталого розвитку.

Особливу роль кластери відіграють у забезпеченні «зеленої» та цифрової трансформації. Наприклад, в Естонії діють енергетичні кластери, що об'єднують підприємства з відновлюваної енергетики, а в Словенії – цифрові кластери у сфері smart manufacturing. Такі приклади підтверджують, що кластеризація сприяє мобілізації регіональних ресурсів, забезпечує фокус на пріоритетні технології та пришвидшує трансфер знань.

Важливим чинником успіху є підтримка кластерної політики на державному рівні. У Польщі, наприклад, національна програма «Кластери ключових технологій» координується Міністерством розвитку та технологій і фінансується за кошти Європейських структурних фондів. Це дозволяє забезпечити сталість функціонування кластерів, підтримати експортну орієнтацію і налагодити зв'язки з глобальними інноваційними екосистемами.

Для України важливо адаптувати подібні інструменти у процесі повоєнного відновлення. Створення галузевих кластерів у сфері будівництва, енергетики, логістики, агропереробки

дозволить об'єднати бізнес, науку та громади задля спільної мети – створення нової інфраструктури, яка відповідає сучасним екологічним, технологічним та безпековим стандартам. Уже сьогодні в Україні з'являються перші успішні приклади кластерної співпраці – наприклад, ІТ-кластери у Львові, Харкові та Києві, які демонструють здатність до координації, обміну знаннями та залучення інвестицій.

Потенціал для масштабування кластерних моделей існує й у сфері відновлювальної енергетики, де Україна має потужні природні ресурси та міжнародну підтримку. Створення енергетичних кластерів на деокупованих територіях дозволить поєднати енергонезалежність з відновленням місцевих економік. Крім того, логістичні кластери можуть забезпечити координацію між бізнесом, державою та міжнародними донорами у відбудові транспортної інфраструктури.

Необхідною умовою успіху є також розвиток людського капіталу в межах кластерів. Йдеться не лише про формальну освіту, але й про створення платформ безперервного навчання, центрів компетентності, хабів з підвищення кваліфікації. Залучення університетів, професійно-технічних навчальних закладів та ІТ-академій до кластерних проєктів забезпечить підготовку кадрів, здатних працювати в умовах нової економіки. Тобто, кластери можуть стати не лише інструментом економічного зростання, а й платформою для стійкого, інклюзивного та екологічного відновлення України.

Обговорення. На прикладі Європейського Союзу видно, що кластери є не просто інструментом регіонального розвитку, а повноцінною системою взаємодії економіки, науки, освіти й інфраструктури. В українських умовах, особливо в контексті відновлення, кластерна модель дозволяє уникнути фрагментарності зусиль і забезпечити синергію між різними секторами повоєнної економіки. Важливо забезпечити не лише формальне створення кластерів, а й забезпечити розвиток довіри між учасниками, стабільне фінансування та доступ до технологій. Спроможність кластерів до швидкої мобілізації ресурсів є особливо цінною в умовах повоєнної України.

Висновки. Кластери відіграють ключову роль у формуванні сучасної моделі стійкого розвитку, поєднуючи інноваційність, ефективність і соціальну згуртованість. Європейський досвід засвідчує, що саме кластерний підхід дозволяє досягати високих результатів у таких сферах, як «зелена» енергетика, цифрова економіка, смарт-інфраструктура та професійна підготовка кадрів. Для України кластери можуть стати не лише елементом економічної політики, але й основою для повоєнного відновлення. Створення міжгалузевих і територіальних кластерів дозволить забезпечити координацію дій між бізнесом, владою, освітою та громадянським суспільством.

Особливої уваги заслуговує розвиток кластерів у сферах, критично важливих для відбудови: будівництві, енергетиці, логістиці, медицині, освіті, сільському господарстві та переробно-харчовій промисловості. Інтеграція кластерної політики в нішові, локальні та національні стратегії відновлення сприятиме створенню повоєнної економіки, що базується на знаннях, інноваціях та сучасних технологіях. Україна має всі передумови для активного впровадження кластерної моделі: наявні освітні й наукові ресурси, інституційноспроможні територіальні інститути регіонального розвитку, достатній рівень підтримки міжнародних партнерів. Відтак, ключовим завданням залишається формування сприятливого середовища для розвитку кластерів зокрема, через нормативно-правові зміни, податкові стимули, інституційне зміцнення локального самоврядування та державно-приватне партнерство.

Отже, саме кластерна модель розвитку може стати ефективним інструментом як швидкої повоєнної відбудови, так і довгострокового сталого зростання України у вимірі європейського духу та цінностей.

Список використаних джерел:

1. European Cluster Panorama Report 2024 (2024). https://www.clustercollaboration.eu/sites/default/files/document-store/Cluster_Panorama2024.pdf
2. Porter, M. E. (1998). Clusters and the New Economics of Competition, Harvard Business Review. <https://hbr.org/1998/11/clusters-and-the-new-economics-of-competition>
3. Franco, S., Murciego, A., & Wilson, J. R. (2011). Business environment secondary data report. *European Cluster Observatory*.
4. Ketels C. & Protsiv S. (2021). Cluster presence and economic performance: a new look based on European data. *Regional Studies*, 55:2. 208-220. DOI: <https://doi.org/10.1080/00343404.2020.1792435>
5. Digitalisation in Europe 2022-2023: Evidence from the EIB Investment Survey. <https://www.eib.org/en/publications/online/all/digitalisation-europe-2022-2023-evidence-from-eib-investment-survey>
6. Digitalisation in Europe 2022-2023: Evidence from the EIB Investment Survey (2023). <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/cadc1015-00ee-11ee-87ec-01aa75ed71a1/language-en>
7. Monitoring the twin transition of industrial ecosystems – Agri-food (2023). <https://monitor-industrial-ecosystems.ec.europa.eu/sites/default/files/2023-12/EMI%20Agrifood%20industrial%20ecosystem%20report.pdf>
8. Ryzhakova, G., Petrukha, S., Petrukha, N., Krupelnyska, O. & Hudenko O. (2022). Agro-Food Value Added Chains: Methodology, Technique and Architecture. *Financial and Credit Activity: Problems of Theory and Practice*, 4 (45). 385–395. DOI: <https://doi.org/10.55643/fcaptop.4.45.2022.3809>

РИНОК ПРАЦІ УКРАЇНИ В УМОВАХ ВІЙНИ

Юлія Чернявська, доцент, к.е.н., доцент ¹ (ORCID: 0000-0003-1576-281X),

Надія Лисиця доцент, к.е.н., доцент ¹ (ORCID: 0000-0002-3353-8347),

¹ Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних сил 31, 03037, Україна

АНОТАЦІЯ. У статті «Ринок праці України в умовах війни» досліджено ключові трансформації, яких зазнала трудова сфера країни з початку повномасштабної агресії у 2022 році. На основі аналізу сучасної наукової та аналітичної літератури, статистичних даних і графічного моделювання автори висвітлюють динаміку попиту та пропозиції робочої сили у 2021-2025 роках. Особлива увага приділяється впливу війни на безробіття, міграційні процеси, регіональні диспропорції, а також специфіку відновлення ринку праці у різних галузях (IT, будівництво, охорона здоров'я, освіта). Результати дослідження демонструють що попри безпрецедентні втрати та структурні дисбаланси, ринок праці України поступово відновлюється, хоча конкуренція за робочі місця залишається високою, а дефіцит кадрів у ключових секторах стимулює зростання зарплат і покращення умов праці. Висновки статті підкреслюють стійкість українського ринку праці та його потенціал до подальшого розвитку у складних умовах воєнного часу.

Ключові слова: ринок праці; міграція робочої сили; попит на робочу силу; пропозиція робочої сили, війна, релокація бізнесу.

Вступ. Війна стала найсерйознішим викликом для ринку праці України за всю історію незалежності. З початку повномасштабного вторгнення у лютому 2022 року трудова сфера зазнала глибоких трансформацій, які продовжують впливати на економіку та життя мільйонів українців.

Аналіз літературних джерел. Дана тематика сколихнула суспільство, багато науковців почало шукати шляхи врегулювання національного ринку праці. Так, Близнюк В.В., Яценко О.А. у своїй монографії «Ринок праці України в умовах війни» аналізували загрози для ринку праці, спричинених воєнними діями, проблеми зайнятості через окупацію територій та руйнування підприємств [1], Панкрова О. і Касперович О. у статті проаналізували вплив міграції та скорочення можливостей для малого бізнесу [2], Аналітична записка НІСД [3] показала нам регіональні диспропорції на ринку праці, структурні та якісні зміни у сфері зайнятості, представила оцінку дослідницьких агенцій, а також проблеми адаптації економіки до воєнних умов. Війна, на жаль, не закінчується, а відтак дана тема потребує пошуку шляхів виходу з кризи та пристосування до умов в напруженому режимі форс-мажорних обставин.

Мета роботи. Метою дослідження є всебічний аналіз стану та трансформацій ринку праці в Україні в умовах повномасштабної війни, виявлення ключових викликів і тенденцій у сфері зайнятості, попиту та пропозиції робочої сили в період 2021-2025 років, а також оцінка впливу

воєнних дій, міграційних процесів і регіональних диспропорцій на функціонування ринку праці. Дослідження спрямоване на визначення перспектив відновлення та адаптації трудової сфери України в умовах воєнного часу з метою формування рекомендацій для стабілізації та розвитку національної економіки.

Матеріали і методи. Основними матеріалами для аналізу є науково-дослідна та аналітична література, яка торкається проблем вітчизняного ринку праці. Основними методами, що використовуються в роботі є аналіз, синтез, індукція, дедукція, науково-економічний експеримент, а також графічне моделювання на основі динамічного ряду.

Виклад основного матеріалу. Слід відзначити, що ринок праці України зазнав суттєвих і комплексних змін у період 2021–2025 років під впливом воєнних дій, масової міграції, мобілізації та релокації бізнесу. Ці трансформації охоплюють як кількісні, так і якісні аспекти зайнятості, відображаються у регіональних диспропорціях, структурних змінах попиту та пропозиції робочої сили, а також у специфіці відновлення різних галузей економіки. Проаналізуємо динаміку ринку праці, основні виклики та тенденції, що формують сучасний стан і перспективи розвитку трудової сфери України в умовах затяжної війни.

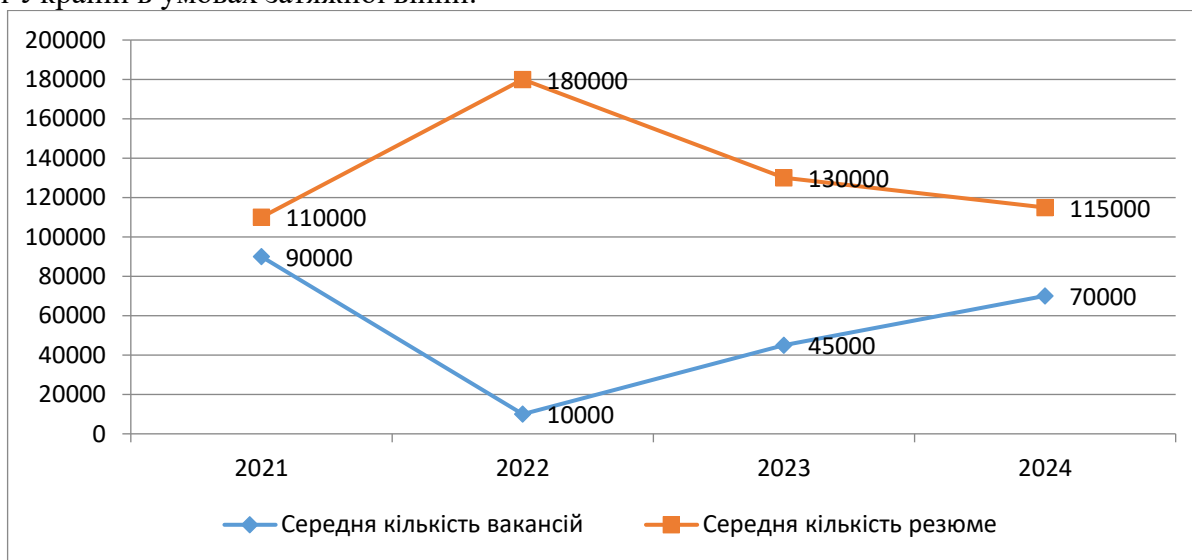


Рис.1 Динаміка попиту та пропозиції робочої сили в Україні в 2021-2024 н.р.

*Джерело: складено автором на основі [4]

Як бачимо з діаграми (Рис.1) у 2021-2024 роках ринок праці України зазнав драматичних змін під впливом війни, масової міграції, мобілізації та релокації бізнесу. В 2021 році ринок праці був відносно збалансованим. Спостерігався дефіцит кадрів у певних галузях (ІТ, медицина, будівництво). У 2022 році пропозиція робочої сили різко перевищила попит, безробіття зросло. У 2023 році попит на робочу силу почав зростати, але пропозиція залишилася значно більшою. І ситуація у 2024 році показує нам, що ринок праці оживає, але конкуренція за вакансії зберігається високою.

У галузевому розрізі спостерігаємо найшвидше відновлення попиту на спеціалістів ІТ-сфери, і навіть тут проявляється дефіцит кваліфікованих кадрів. Будівництво зазнало суттєвого спаду у 2022 році, та поступового зростання у 2023-2024 рр. завдяки відбудові. Стабільно високий попит у сфері охорони здоров'я, особливо медичних сестер і лікарів, у торгівлі та логістиці відновлено попит на спеціалістів у західних та центральних областях, освіта відновилася у безпечних регіонах.

2022 рік став роком найбільшого шоку для ринку праці: попит на робочу силу впав у 9 разів, а пропозиція різко зросла через масові звільнення. Масштабні руйнування інфраструктури, зупинка або знищення підприємств, окупація територій, вимушена міграція та мобілізація суттєво скоротили пропозицію робочої сили та кількість вакансій. А у перші місяці війни кількість вакансій зменшилася у 20 разів. Особливо постраждали Харківська, Дніпропетровська, Миколаївська та Київська області. Через мобілізацію та виїзд жінок із дітьми за кордон ринок праці скоротився більш ніж на 2,2 млн. осіб. До війни офіційних платників податків було 12,3 млн. нині – трохи більше 10

млн. [5]. Вимушена міграція, релокація бізнесу та адаптація підприємств до нових умов спричинили регіональні диспропорції: у західних областях кількість робочих місць зросла завдяки переміщенню підприємств із зони бойових дій [3].

2023-2024 рр. – ринок поступово відновлюється, але конкуренція за робочі місця залишається високою, дефіцит кадрів у ключових галузях зберігається через міграцію, мобілізацію та демографічні зміни.

У 2025 році тенденція зберігається: кількість резюме (пропозиція) 104000 стабільно перевищує кількість вакансій (попит) 62000, що свідчить про збереження конкуренції серед шукачів роботи. Загалом за чотири місяці 2025 року можна сказати, що ринок праці України поступово відновлюється, але конкуренція за робочі місця зберігається. Попит на робочу силу зростає, але ще не досяг довоєнного рівня. Пропозиція робочої сили залишається високою, хоча й спостерігається поступове скорочення розриву між кількістю резюме та вакансій. Дефіцит кадрів у ключових галузях може стимулювати подальше зростання зарплат і покращення умов праці [6].

Наразі найбільший в Україні сайт для пошуку роботи та працівників стверджує, що ринок праці відновився на 93% від довоєнного рівня. [7]. Частка зайнятих українців у I кварталі 2025 року досяг 52.4% - це найвищий показник за час повномасштабної війни. Частка безробітних скоротилася до 4,5%.

За оцінками Info Sapiens, у квітні 2025 року рівень безробіття становив 12,1% - це найнижчий показник від початку повномасштабної війни, хоча він все ще вищий за довоєнний рівень. А офіційна статистика фіксує історичний мінімум зареєстрованих безробітних: у грудні 2024 року їх було 94,2 тисячі осіб. [8].

Як бачимо економіка та ринок праці поступово відновлюються завдяки адаптації бізнесу, релокації підприємств, створенню нових робочих місць у безпечних регіонах. Водночас, структурні дисбаланси, дефіцит кваліфікованої робочої сили, складнощі з поверненням до мирної праці залишаються серйозними викликами для повноцінного відновлення. Прогнозуємо, що рівень безробіття поступово знижуватиметься, але залишатиметься вищим за довоєнний через довготривалі наслідки війни.

Висновки. Ринок праці України в умовах війни зазнав безпрецедентних втрат і трансформацій, але демонструє значну стійкість та адаптацію. Відновлення йде нерівномірно, зберігаються структурні дисбаланси та дефіцит кадрів, однак поступове зростання зайнятості та зниження безробіття свідчить про потенціал до подальшого відновлення та розвитку навіть в умовах затяжної війни.

Список використаних джерел:

1. Bliznyuk V.V., & Yatsenko, L.D. (2024). Rynok pratsi Ukrainy v umovakh viiny [Ukraine's labor market in wartime]. In Materialy mizhnarodnoi naukovoï konferentsii (pp. 1106-1113). <http://doi.org/10.30525/978-9934-26-223-4-137>
2. Pankova O.V., Kasperovich O.Yu. (2023) Sfera praci ta zainyatosti Ukrainy v umovah vijni: stan, problemi, dinamika zmin u konteksti povoyennogo vidnovlennya [The sphere of labor and employment in Ukraine during the war: status, problems, dynamics of changes in the context of post-war recovery] . Ekonomichnij visnik Donbasu - Economic Bulletin of Donbass, № 1(71), 26-35. [https://doi.org/10.12958/1817-3772-2023-1\(71\)-26-35](https://doi.org/10.12958/1817-3772-2023-1(71)-26-35)
3. Yatsenko, L. (2024). Vidnovlennya rinku pratsi v Ukraini v umovakh vijni: regionalni aspekti [Restoration of the labor market in Ukraine in wartime: regional aspects]. NISD <https://niss.gov.ua/doslidzhennya/sotsialna-polityka/vidnovlennya-rinku-pratsi-v-ukrayini-v-umovakh-viyny-rehionalni> (in Ukr.)
4. Derzhvna sluzhba statystyky Ukraine. (2025). <https://www.ukrstat.gov.ua/>
5. Miroshnychenko, O. (2024). Biznes vtrativ do 800 tysy cholovikiv: yak vijna i mobilizaciya vdarila po rinku pratsi v Ukraini [Business lost up to 800 thousand men: how war and mobilization hit the labor market in Ukraine] / Konfederatsiia robotodavtsiv Ukrainy. <https://employers.org.ua/news/id2595> (in Ukr.)
6. Derzhavnyi tsentr zainiatosti. (2025). Rinok pratsi Ukrainy 2024-2025: sho pokazalo doslidzhennya [Ukrainian labor market 2024-2025: what the study showed] <https://www.dcz.gov.ua/stat/statsurvey>
7. Rinok pratsi za tri roky vijni vidnovivsya na 93% (2025) [The labor market has recovered by 93% in three years of war]– Work.ua <https://forbes.ua/news/rinok-pratsi-za-tri-roki-viyni-vidnovivsya-na-93-doslidzhennya-workua-10032025-27873>
8. Ministerstvo finansiv Ukrainy (2024). Kil'kist zarejestrovanih bezrobitnih. [Number of registered unemployed] Minfin. <https://index.minfin.com.ua/ua/labour/unemploy/register/2024/>

РОЛЬ ЦИФРОВІЗАЦІЇ В УДОСКОНАЛЕННІ РОБОТИ ПРАЦІВНИКІВ БУДІВЕЛЬНОЇ СФЕРИ

Гаман Галина, доцент, кандидат економічних наук, доцент кафедри економічної теорії, обліку та оподаткування¹

¹Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, проспект Повітряних Сил, 31, 03037, Україна

АНОТАЦІЯ. *Визначено роль цифровізації в удосконаленні роботи працівників будівельної сфери через розкриття суті процесу цифровізації для сучасного суспільства, зокрема у будівельній галузі, окреслено позитивні складові та виділені недоліки цього процесу. Зазначені особливості роботи працівників на сучасному ринку праці, які через агресію РФ втратили своє місце праці на зруйнованих підприємствах, потрапили у тимчасову окупацію, або мігрували закордон. Засоби цифрових технологій допомогли їм знайти нове місце роботи, або сприяли продовженню праці на відстані за допомогою цифрових технологій. Виділені кроки подальшого удосконалення та впливу цифровізації на роботу працівників з урахуванням особливостей воєнного стану та перспектив післявоєнної відбудови, зокрема через роботизацію, дистанційну роботу, штучний інтелект, створення нових цифрових програм, засобів кібербезпеки у галузі будівництва.*

Ключові слова: *цифровізація; людський капітал; будівельна сфера; роботизація; штучний інтелект.*

Вступ. Важливість питання цифровізації як ніколи є нагальною для України та всіх галузей економіки. Цифровізація є однією з ключових тенденцій у розвитку людської цивілізації, яка сприяє вдосконаленню механізмів управління. Вона забезпечує розширений доступ до послуг у галузі охорони здоров'я, освіти, банківських послуг та підвищує якість надання державних послуг. Цифрові технології також сприяють розширенню можливостей співпраці між людьми та дають можливість скористатися більш широким асортиментом товарів за більш доступними цінами.

Будівництво є важливою галуззю економіки, яка впливає на багато аспектів нашого життя. Завдяки будівництву ми отримуємо нові будівлі, що сприяє розвитку вітчизняної інфраструктури. Крім того, будівництво забезпечує робочі місця та сприяє розвитку різних галузей економіки, а також важливе для покращення соціальних умов життя населення та створення комфортного середовища. Роль будівництва в умовах війни набирає ще більшого значення, адже Україна через російську агресію має зруйновані будівлі, підприємства, а також потребує укриттів, тимчасово обладнаних місць для життя людей, розвиток підприємств оборонної галузі та будівництва укріплень у зоні бойових дій. Для пришвидшення процесу післявоєнної відбудови доцільно розвивати процеси роботизації, автоматизації, залучення цифрових програм, штучного інтелекту.

Аналіз літературних джерел. Вітчизняні вчені [1-5] приділяли значну увагу питанням цифровізації сучасної економіки в різних сферах, проте недостатньо уваги було приділено її ролі в удосконаленні роботи працівників саме будівельної сфери. Зокрема, Маркевич К. розглядає цифровізацію як одну з визначальних тенденцій розвитку людської цивілізації, яка формує більш інклюзивне суспільство та кращі механізми управління [1]. Бондаренко Д. і Калашнікова К. розкривають стан цифровізації будівельної галузі України з наявними проблемами і перспектив її розвитку [2], проте роль цифровізації в удосконаленні роботи працівників не наводиться.

Мета роботи. Враховуючи важливість та актуальність даної теми, можна зазначити, що сучасні тенденції розвитку підтверджують необхідності використання нових цифрових технологій для ухвалення управлінських рішень у будівельній сфері. Ця мета дослідження визначається саме цим фактором і спрямовує розв'язання вищезначеної проблеми.

Виклад основного матеріалу.

Цифровізація – це цифрова трансформація сучасних процесів в економіці. Поява Covid-19 сприяли доцільності переходу в інші умови існування людства та розвитку процесу цифровізації, зокрема необхідності дистанційного процесу в навчанні, роботі. Адже сфера послуг цифрові технології дозволяють здійснювати діяльність з будь-якого місця на планеті, проводити відеоконференції, купувати продукти та інші речі для побуту через мережу Інтернет. Цифровізація сприяла вирішенню соціальних проблем, полегшуючи доступ до основних послуг у сфері охорони здоров'я (електронна система охорони здоров'я) та освіти (дистанційне навчання), наданню фінансових послуг, забезпечуючи прозорість та ефективність діяльності уряду (електронний уряд: система електронних регламентів та реєстрацій).

Цифровізація будівельної сфери як процес перетворення всіх процесів у будівництві в цифровий формат та використання сучасних технологій для скорочення термінів, підвищення якості будівництва, а також елемент удосконалення роботи працівників у даній сфері. Цифровізація має сприяти підвищенню продуктивності, поліпшенню контролю якості, зменшенню кількості помилок, екологічно орієнтованим, підвищенню безпеки робіт, особливо з урахуванням того, що, на жаль, чоловічо орієнтовані роботи перекладаються на жіночі плечі з урахуванням реалій війни та зростанню смертності населення втретє за час війни.

Цифровізація - це не лише про застосування технологій. Вона полягає у зміні культури, що впроваджується у всі сфери роботи та у перетворенні в управлінні різними командами. Зменшення витрат (цифровізація документів, що призводить до загальної оптимізації процесу), децентралізація виробництва, збільшення продуктивності та ефективності, швидке, більш ефективне прийняття рішень у реальному часі, підвищення рівня екологічності, виробництво нових продуктів, скорочення часу та витрат на розробку продукції, підвищення якості продукції та швидка реакція на зміни на ринку, диверсифікація виробництва різних виробів на численних майданчиках виробництва - це лише деякі переваги цифровізації.

Хоча цифровізація має свої позитивні аспекти, вона також стикається з численними викликами, на які може бути не готове суспільство і бізнес. Автоматизація та роботизація можуть призвести до змін на ринку праці, що може призвести до безробіття та нерівності доходів. Недостатній рівень довіри до цифрових технологій, обмежений доступ до них та недостатня кваліфікація можуть призвести до зростання цифрового розриву. Інші виклики включають проблеми з безпекою та конфіденційністю, збільшення соціальної відчуженості, етичні проблеми (такі як контроль над штучним інтелектом) та зниження рівня культурного розвитку [1].

Перетворення економічних відносин на інноваційні принципи неможливе без потоку інвестицій. Інвестиції повинні бути спрямовані у реальний сектор, який є ключовим фактором у розвитку національної економіки. Одним з важливих ресурсів, в інвестиції в який можна говорити про цифрову трансформацію, є людський капітал.

Прийняття рішень у процесі управління персоналом, за яке відповідає за кадровий менеджмент, є ключовим елементом розвитку людського капіталу підприємства. Управлінські рішення щодо персоналу є найбільш вагомими. У кадровому менеджменті, об'єктом якого є безпосередньо персонал, а суб'єктом - керівники, фахівці та інші працівники, які приймають управлінські рішення, важливо володіти професіоналізмом, уміннями управлінської та організаційної роботи, психологічними здібностями, досвідом та знаннями. Суттєвим аспектом управління персоналом є взаємодія та взаємозамінність працівників. Однак, головною метою управління персоналом є гарантування сталого розвитку організації [3].

В Україні відчутний на сьогоднішній день брак цифрових здібностей та знань. Впровадження нових технологій потребує кваліфікованих фахівців, яких може бути не вистачати. В Україні, де цифрові технології в будівництві тільки починають розвиватися, зараз існує гострий дефіцит кваліфікованих кадрів для роботи з новітніми цифровими рішеннями.

Впровадження цифрових технологій на будівельних підприємствах потребує великих інвестицій у придбання відповідного обладнання, програмного забезпечення та підготовку персоналу. Високі витрати на початкове впровадження цифрових технологій у компанії вважаються однією з головних причин їх недостатнього поширення. Велика увага на підприємствах має приділятися кібербезпеці, адже всі програмні продукти мають бути захищеними на світовому рівні від хакерів, вірусів та конкурентів.

Часто проходить багато років від моменту створення різноманітних інновацій до їх широкого впровадження, зокрема і навчання працівників, які покажуть результат лише через певний час. Тому шляхи прискорення темпів впровадження нових стратегій розвитку інформаційно-інноваційної діяльності на будівельних підприємствах у умовах цифрової трансформації є спільною проблемою для керівників різних організацій [4].

Створення цифрового простору є одним з ключових напрямків у будівництві у найближчому майбутньому, що сприятиме трансформації бізнес-моделі компаній, створює нові можливості для отримання конкурентних переваг, прибутку, поліпшує ефективність бізнес-процесів і, в кінцевому

підсумку, підтягує до переходу до цифрового бізнесу. Це ставить перед підприємствами конкретні завдання, вирішення яких полягає в застосуванні передових методів роботи та цифрового управління з метою збільшення прибутковості [5].

Висновки. Для подальшого розвитку цифровізації доцільно сприяти формуванню цифрової безпеки між країнами світу. Створення надійних Інтернет програм сприятимуть забезпеченню доступу всіх бажаючих, зменшать витрати та підвищували ефективність для малого та середнього бізнесу. Важливо, щоб цифрові інновації включали захист конфіденційності даних, ефективні системи онлайн-розв'язань та алгоритми, що не дискримінують жодного учасника через вікові, статеві, політичні особливості. Держава, як гарант, незважаючи на нестачу коштів та внутрішніх інвестицій, має створити законодавчо-нормативне поле для регулювання питань цифровізації, сприяти формуванню фонду підтримки даного процесу, що сприятиме розвитку цифрової інфраструктури в умовах відбудови економіки України. В цілому розробивши стратегію цифрової трансформації, держава може чітко поставити завдання у даному напрямі та чіткі механізми їх досягнення. Будівельна галузь має також долучати великі будівельні компанії до цієї розбудови та бути однією із перших для розробок інноваційного характеру в сфері цифровізації. Доцільно залучати до процесу зовнішніх інвесторів та їх сучасні розробки, а також поширення міжнародного досвіду навчання у сфері цифрових трансформацій задля майбутніх нових продуктів вітчизняного виробництва.

Список використаних джерел:

1. Markevych, K. (2021) Tsyfrovizatsiia: perevahy ta shliakhy podolannia vyklykiv [Digitization: benefits and ways to overcome challenges] Razumkov center. <https://razumkov.org.ua/statti/tsyfrovizatsiia-perevagy-ta-shliakhy-podolannia-vyklykiv> [in Ukrainian].
2. Bondarenko, D., Kalashnikova, K. (2024) Digitalisation of the construction industry in Ukraine: analysis of the state, problems and development prospects. *Economy and Society*, 65. <file:///C:/Users/User/Downloads/4340-%D0%A2%D0%B5%D0%BA%D1%81%D1%82%20%D1%81%D1%82%D0%B0%D1%82%D1%82%D1%96-4248-1-10-20240820.pdf> [in Ukrainian].
3. Haman, H. (2020) Application of economic models in the process of making management decisions in the personnel's sphere. *Pryazovskyi ekonomichnyi visnyk*, 6(23), 278-282. http://pev.kpu.zp.ua/journals/2020/6_23_ukr/51.pdf [in Ukrainian].
4. Buhaichuk, O. (2019) Vplyv tsyfrovizatsii na rozvytok informatsiino-innovatsiinoi diialnosti na pidpriemstvi [The impact of digitalization on the development of information and innovation activities in an enterprise]. *Humanities Bulletin of Zaporizhzhie State Engineering Academy*, <http://vestnikzgia.com.ua/article/view/188750> [in Ukrainian].
5. Marchenko, O., & Koliadenko, P. (2023). Tsyfrova transformatsiia budivelnoho biznesu: tendentsii ta perspektyvy [Digital transformation of the construction business: trends and perspectives]. *Digital Economy and Economic Security* (4 (04), 20-26. <https://doi.org/10.32782/dees.4-4> [in Ukrainian].

СУЧАСНІ НАПРЯМИ ФІНАНСОВОЇ НАУКИ

Корсун І.М. к.е.н., доцент¹ (ORCID: 0000-0002-4959-9056),

¹Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних сил 31, 03037, Україна

АНОТАЦІЯ. В тезах доповідей висвітлено актуальність фінансової науки та її масштабність, з точки зору напрацювань вітчизняних науковців. Визначено основні методи фінансової науки, доопрацьовано методику проведення наукових досліджень вітчизняними вченими через застосування штучного інтелекту, як методу. Вказано на те, що економіко-математичне моделювання займає важливе місце у фінансовій науці, зокрема в частині прогнозування обсягів і структури фондів фінансових ресурсів та сценарності розвитку економіки. Визначено основні сучасні напрями наукових досліджень у фінансах. Встановлено негативну динаміку кількості захищених дисертацій на здобуття наукових ступенів доктора та кандидата економічних наук за спеціальністю 08.00.08 – гроші, фінанси і кредит, упродовж 2020-2024 рр. Зроблено висновки.

Ключові слова: фінанси; фінансова наука; методи наукового дослідження; фонд фінансових ресурсів.

Вступ. Дослідження сучасних напрямів фінансової науки буде здійснено з огляду на те, що сучасна наука поповнюється новими методами проведення наукових досліджень та інструментами. Крім того, важливо враховувати вітчизняний стан розвитку фінансової науки.

Звернемося до термінології, зокрема тлумачення категорії «фінансова наука». Аналіз наукових підходів до пояснення сутності «фінансова наука» дозволив зафіксувати ключові складові поняття, а саме:

- Система знань; Механізми і принципи;
- Відносини; Суб'єкти економіки;
- Економічний інтерес;
- Гроші; Фонд фінансових ресурсів.

Аналіз літературних джерел. Розгорнуте пояснення економічної категорії «фінансова наука» наведено у підручнику вітчизняного науковця, Глущенко А.С., а саме: «...система упорядкованих знань про фінансові явища і процеси, з виявленими достовірними передумовами виникнення, механізмами та принципами функціонування, доказовими, обґрунтованими положеннями та висновками про їх вплив на людину, господарство, суспільство, цивілізацію, оцінкою здобутків, вигод, втрат...» [1, с. 8]. Вітчизняні вчені, Мочерний С. та Василик Д., пояснюють, що фінансова наука спрямована на дослідження проблематики обмеженості фінансових ресурсів, а від так ефективного формування і перерозподілу фінансових ресурсів на різних рівнях розвитку економіки за для задоволення потреб суспільства [2, с. 195]. Таким чином, вивчення об'єктивних законів, які впливають на обсяги і структуру фінансових ресурсів підкреслює актуальність та затребуваність фінансової науки.

Мета роботи. Проаналізувати сучасний стан та напрями фінансової науки.

Матеріали і методи. Основною науковою базою для проведення дослідження були сучасні фахові статті вітчизняних науковців, тематика досліджень дисертацій на здобуття наукового ступення кандидата та доктора наук за спеціальністю 08.00.08 – гроші, фінанси і кредит, показники Міністерства освіти і науки України.

Виклад основного матеріалу. Враховуючи сучасне наукове та практичне значення фінансової науки, можемо зробити висновки про її актуальність та системне оновлення в частині застосовуваної методики досліджень та результатів. Оскільки макроекономічне середовище постійно змінюється і переживає циклічні коливання - підйому, незначної фіксації та спаду. В таких умовах, і фінансова наука буде системно рухатися досліджувати виклики сьогодення та завчасно реагувати на них. Завчасність фінансової науки може бути досягнена на основі вже здобутих наукових і практичних напрацювань вітчизняних та зарубіжних науковців та на основі сучасних досліджень із застосуванням різних методів та інструментів.

Проаналізуємо сучасні методи фінансової науки, рис. 1.

Згідно з рисунку 1, основні методи наукового дослідження, які застосовуються вітчизняними науковцями у фінансовій науці поділяються на загальні, загальнонаукові, конкретно-наукові та спеціально-наукові.

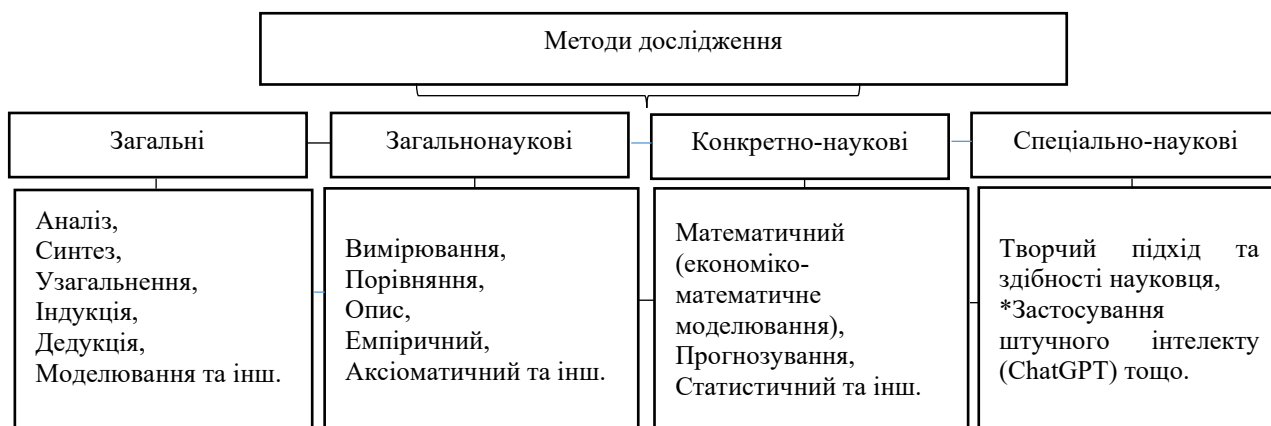


Рисунок 1. Методи наукового дослідження у фінансовій науці

Джерело: побудовано автором на основі ресурсу [3, с. 36] та доповнено автором*.

Принагідно відзначити, що важливу роль у сучасних наукових дослідженнях фінансової науки відіграє економіко-математичне моделювання, яке дозволяє дослідити проблематику фонду фінансових ресурсів в різних економічних сценаріях, наприклад оптимістичному сценарії економічного розвитку, інертному та песимістичному [4]. Здійснюючи економіко-математичне моделювання державних фінансів, колектив науковців НДФІ ДННУ «Академія фінансового управління», Богдан І.В. та Яра Т.Ю. запропонували застосувати динамічну чотирьохсекторну модель економіки України “Ekvilibro”, котра являє собою комплекс балансових і факторних взаємозв’язків зазначеного сектору з реальним, зовнішньо-економічним та грошово-кредитним секторами. У моделі реалізовано методичний підхід для оцінки розриву між фактичним і потенційним ВВП на основі багатомірного фільтра Кальмана та функціонального методу Оукена. Модель містить блок для розрахунку циклічно скоригованих фіскальних індикаторів і фіскального імпульсу [5].

Проаналізуємо основну проблематику фінансової науки, яка досліджується в Україні упродовж 2020 – 2024 рр. Упродовж 2020-2021 рр. активно досліджувалася проблематика впливу Covid-19 на державні фінанси. Переважно, фактор Covid-19 приймався як непередбачуваний (форс-мажорний) або як ефект «чорного лебедя», який різко і негативно впливає на державні фінанси та виявляє таким чином ефективність застосовуваної фінансової політики, фінансового планування та прогнозування. Активно підіймається проблематика страхування та планування фінансових резервів – як інструментів та методів реагування на ризики [6;7].

Упродовж 2021 – 2022 рр. активно досліджувалася проблематика застосування електронних грошей, зокрема пілотний проект е-гривня, альтернативних грошових знаків – криптовалюти тощо.

З початком повномасштабного вторгнення на початку 2022 – 2023 рр. вся увага науковців зосередилася на стані державних фінансів в умовах війни та мілітаризації економіки, передумов для стійкості бізнесу в умовах війни та застосування грантових програм в Україні за рахунок іноземних держав та міжнародних фінансових інституцій [8].

Упродовж 2023 – 2025 рр. досліджується проблематика страхування воєнних ризиків. Повоєнна відбудова України. Зокрема, Кизим М., Хаустова В., Трушкіна Н. дослідили успішні проекти фінансового забезпечення щодо відбудови критичної інфраструктури серед країн, які постраждали від збройних конфліктів і активних бойових дій [9, с. 267; 10].

Обговорення. Аналіз кількості кандидатських та доторських дисертацій за спеціальністю 08.00.08 – гроші, фінанси і кредит, упродовж 2024 р., показав, що захищено 6 докторських дисертацій та 4 кандидатські дисертації. Тематика дисертаційних досліджень дуже різноманісна, таблиця 1.

Згідно з даними таблиці 1, виявлено, що обсяг наукових досліджень для присудження наукових ступенів кандидата та доктора економічних наук з фінансів упродовж останніх декількох років дещо скоротився. У 2020 році було захищено 66 кандидатських дисертацій та 11 докторських дисертацій.

Тематика докторських та кандидатських дисертацій з фінансів, 2024 р.

№ з/п	Автор	Тема
Докторські дисертації		
1	Семеног Андрій Юрійович	Цифрові фінансові послуги в умовах формування цифрової економіки»
2	Сус Тарас Йосипович,	Фінансування інноваційного розвитку аграрного сектору
3	Тітенко Зоя Миколаївна	«Інвестиційно-інноваційне забезпечення фінансової безпеки аграрних підприємств»
4	Ткачик Федір Петрович	«Новітня архітектура фінансового федералізму
5	Лабенко Олександр Миколайович	«Формування фінансової політики природокористування в Україні
6	Сидорчук Анатолій Андрійович	«Забезпечення фінансової стійкості домогосподарств: теорія, методологія та практика
Кандидатські дисертації		
1	Вільчинський Олександр Миколайович	Державна фінансова політика активізації інвестиційної діяльності в Україні»
2	Гайдук Іван Степанович	Недержавне пенсійне забезпечення як чинник розвитку людського потенціалу в Україні»
3	Бондаренко Павло Валерійович	Система формування та використання фінансового потенціалу страховика»
4	Пінті Анастасія Валеріївна	Формування системи фінансового контролінгу підприємств

Джерело: складено автором на основі офіційних даних Міністерства освіти і науки України: <https://mon.gov.ua/nauka>.

Висновки. Таким чином, проведений аналіз дозволив дійти висновків, що фінансова наука має ґрунтовну науково-методологічну базу, яка є основою для подальших наукових досліджень та вдосконалень. Проблематика фінансової науки досить різноманітна і стосується переважно фондів фінансових ресурсів макро- та мікроекономічних рівнів. Тематика наукових досліджень відповідає вимогам сьогодення та постійно оновлюється. Негативним процесом у частині розвитку фінансової науки, вважаємо, суттєве скорочення кількості кандидатських та докторських дисертацій, зокрема у 2024 р. порівняно з 2020 р.

Таким чином, вважаємо за доцільне продовжити наукові пошуки з окресленої проблематики, зокрема дослідити зарубіжний досвід щодо темпів розвитку фінансової науки та нових досягнень.

Список використаних джерел:

1. Hlushchenko A.S. (2006) *Finansy: Navch. posib.* [Finance tutorial], Lviv «Mahnoliia. 2006, 2014, – 440 pp.
2. Yukhymenko P.I., Fedosov V.M., Lazebnyk L.L. ta in. (2010) *Teoriia finansiv: Pidruchnyk* [Theory of Finance: Textbook] / Za red. prof. V.M. Fedosova, S. I. Yuriia. K.: Tsentru uchbovoi literatury. P. 576.
3. Demianyshyn V. (2023) *Metodolohichni pidkhody do doslidzhennia derzhavnykh finansovykh resursiv ta finansovoi bezpeky subiektiv hospodariuvannia v umovakh reformuvannia upravlinnia publichnymy finansamy* [Methodological approaches to the study of state financial resources and financial security of business entities in the context of public finance management reform] / V. Demianyshyn, Z. Lobodina, V. Horyn, V. Demianyshyn / Naukovyi zhurnal «Svit finansiv». Vyp. 1 (74). S. 31-47.
4. Servatynska, I.M., Pasichnyk, Yu.V. (2016) *Finansove zabezpechennia funktsionuvannia derzhavnykh fondiv sotsialnoho strakhuvannia* : avtoreferat dysertatsii na здобуття наукового ступеня кандыдата економічних наук [Financial support

for the functioning of state social insurance funds]: 08.00.08 hroshi, finansy i kredyt; Lvivskiy natsionalnyi universytet imeni Ivana Franka. Lviv, 2016 r. 20 s.

5. Mazhara H.A., Hrekul A.O. (2023) *Ekonomiko-matematychne modeliuвання otsinky investytsiinoho potentsialu Ukrainy* [Economic and mathematical modeling of the assessment of the investment potential of Ukraine]. Elektronne fakhove vydannia «Ekonomika ta suspilstvo». Vypusk 52. Elektronnyi resurs. Rezhym dostupu: <https://economyandsociety.in.ua/index.php/journal/article/view/2520/2438>.
6. Varnalii Z.S., Cheberiako O.V., Bazhenova O.V., Nikytenko D.V., Bilyk R.R. (2020) *Stratehichni priorytety biudzhethnoi polityky Ukrainy v umovakh pandemii COVID-19*. Finansovo-kredytna diialnist: problemy teorii ta praktyky [Strategic priorities of Ukraine's budget policy in the context of the COVID-19 pandemic.]. 4(35). S. 170-179.
7. Fuhelo P., Savitska S. (2020) *Vplyv pandemii Covid-19 na napovnennia mistsevykh biudzhethiv* [The impact of the Covid-19 pandemic on local budgets]. Ekonomichnyi diskurs. № 2. S 86-94.
8. Steshenko O.D., Mozghovyi Ye.V. (2024) *Hrantovefinansuvannia yak zaporuka stabilnosti biznesu* [Grant financing as a guarantee of business stability]. Elektronnyi zhurnal «Zdobutky ekonomiky: perspektyvy ta innovatsii». Vyp. 8. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.12725693/>
9. Kyzym M.O., Khaustova V.Ye., Trushkina N.V. (2023) *Finansove zabezpechennia rozvytku krytychnoi infrastruktury v umovakh povoiennoi vidbudovy ekonomiky Ukrainy* [Financial support for the development of critical infrastructure in the context of post-war reconstruction of the Ukrainian economy]. Elektronne vydannia «BiznesInform» № 8. S. 263 – 274.
10. Shevchenko S.O., & Kukurudz O.M. (2024). *Stratehii finansuvannia povoiennoi vidbudovy: vyklyky ta perspektyvy dlia Ukrainy* [Post-war reconstruction financing strategies: challenges and prospects for Ukraine]. Akademichni vizii, (28). Elektronnyi resurs. Rezhym dostupu: <https://academy-vision.org/index.php/av/article/view/914/>

АНАЛІЗ ІНДИКАТОРІВ ЕКОНОМІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ІНВЕСТИЦІЙНОЇ ДІЯЛЬНОСТІ ПІДПРИЄМСТВ

Анатолій Чинчик, доцент, д.е.н., доцент¹ (ORCID: 0000-0003-4017-4753),

Степан Голубка, професор, д.е.н., професор², (ORCID: 0000-0002-3702-073X),

Віталій Пивовар, старший аналітик³,

Яна Локтіонова, доцент, к.е.н., доцент¹ (ORCID: 0000-0001-5634-4900)

¹ Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних сил 31, 03037, Україна

² ВНЗ "Національна академія управління", вул. Ушинського, 15, м. Київ, 03151, Україна

³ Бюро економічної безпеки України, вул. Шолуденка, 31, м. Київ, 04116, Україна

АНОТАЦІЯ. Проведено комплексний аналіз індикаторів економічної безпеки інвестиційної діяльності підприємств в умовах сучасної трансформації економіки України. Обґрунтовано актуальність дослідження у зв'язку з високим рівнем зовнішніх і внутрішніх ризиків, нестабільністю інституційного середовища та потребою в ефективному управлінні інвестиційними ресурсами. Виокремлено ключові макро- та мікроекономічні індикатори, зокрема рівень інвестиційного ризику, тінізацію економіки, інфляцію, фінансову стабільність підприємства, динаміку прибутковості та рентабельності інвестицій. Особливу увагу приділено аналізу секторальних показників і регіональних особливостей, що впливають на інвестиційний клімат. Запропоновано методичний підхід до комплексної оцінки економічної безпеки підприємства з урахуванням ризик-орієнтованої моделі. Результати дослідження можуть бути використані для розробки стратегії захисту інвестицій та управління фінансовою стійкістю суб'єктів господарювання.

Ключові слова: економічна безпека; підприємство; інвестиційна діяльність; індикатори.

Вступ. У сучасних умовах нестабільного економічного середовища, військової агресії та структурної трансформації ринку особливої актуальності набуває питання забезпечення економічної безпеки інвестиційної діяльності підприємств [1], [6], [7], [12], [14]. Інвестиції відіграють ключову роль у розвитку та відновленні національної економіки, проте вони супроводжуються високим рівнем ризиків і невизначеності. У зв'язку з цим виникає необхідність у розробці ефективних механізмів моніторингу та оцінки індикаторів, які відображають поточний стан і загрози для інвестиційної стабільності підприємств. Тому доцільно розглянути основні підходи до розуміння економічної безпеки в інвестиційній сфері та окреслити наукову й практичну значущість аналізу її показників [8], [11].

Аналіз літературних джерел. Питаннями економічної безпеки підприємств та комплексного її оцінювання займаються ряд українських вчених [1-14]. В джерелах [4], [9], [10] дані основні теоретичні підходи та індикатори економічної безпеки, у роботі проаналізовано методологічний

інструментарій економічної безпеки підприємств. У працях [2],[3], [5]. акцентується увага на важливості урахування умов цифрового розвитку, інформаційної безпеки та цифрової трансформації на економічну безпеку інвестиційної діяльності підприємств, регіонів, національної економіки в цілому.

Мета роботи. Метою статті є дослідження та систематизація ключових індикаторів економічної безпеки інвестиційної діяльності підприємств, а також розробка підходів до їх комплексної оцінки в умовах економічної нестабільності.

Матеріали і методи. Основними матеріалами для аналізу є науково-методична та довідкова література про індикатори економічної безпеки інвестиційної діяльності. Основними методами, що використовуються в роботі є У дослідженні використано сукупність загальнонаукових та спеціальних методів, що забезпечили комплексний підхід до аналізу індикаторів економічної безпеки інвестиційної діяльності підприємств. Основу дослідження склали статистичні дані Державної служби статистики України, звіти Національного банку України, аналітичні матеріали Державної податкової служби, а також публікації міжнародних організацій (World Bank, IMF, UNCTAD), що відображають тенденції інвестиційного клімату та фінансової стабільності. До методологічного інструментарію увійшли метод аналізу та синтезу – для вивчення наукових підходів до оцінювання економічної безпеки, індексний метод – для оцінки динаміки індикаторів безпеки в часі, метод узагальнених оцінок (scoring) – для формування комплексного показника економічної безпеки інвестиційної діяльності. Застосування цих методів дозволило глибше охарактеризувати сучасний стан інвестиційної безпеки підприємств в Україні та розробити обґрунтовані аналітичні висновки.

Виклад основного матеріалу. В умовах війни й трансформації економічної системи під дією низки зовнішніх чинників особливої ваги набуває формування інтегральної оцінки рівня економічної безпеки інвестиційної діяльності підприємств, яка повинна враховувати не лише фінансово-економічні показники, а й організаційно-управлінські, технологічні та репутаційні чинники. Ризик-орієнтована модель дозволяє об'єктивно визначити потенційні загрози інвестиційній стабільності та сформулювати стратегії мінімізації негативних впливів. При цьому важливу роль відіграють методичні підходи та індикатори, які дозволяють проводити об'єктивне оцінювання (табл. 1).

Таблиця 1- Ризикові індикатори економічної безпеки інвестиційної діяльності відповідно до підходів, прийнятих у вітчизняних методиках (ДСТУ, аналітика НІСД, МЕРТ, НБУ тощо).

№	Назва індикатора	Зміст / характеристика	Граничне / критичне значення
1	Рівень інвестиційного ризику (IR)	Узагальнений показник ризику втрати інвестицій через політичні, економічні або правові чинники	> 0,5 (на шкалі від 0 до 1)
2	Індекс легкості ведення бізнесу (Doing Business)	Міжнародний рейтинг, що відображає складність процедур для інвесторів	< 70 позицій у рейтингу
3	Частка тіньової економіки у ВВП	Свідчить про непрозорість бізнес-середовища	> 25 %
4	Індекс корупції (Transparency International)	Відображає рівень корупції у сфері регулювання інвестицій	< 35 балів зі 100
5	Індекс правового захисту інвестора	Оцінює ефективність судової системи, захист прав власності, дотримання контрактів	< 5 балів зі 10
6	Політична стабільність та відсутність насильства	Індикатор Світового банку, який показує політичні ризики	< -0.5 (за шкалою від -2.5 до +2.5)

7	Рівень інфляції	Висока інфляція погіршує прогнозованість інвестпланування	> 10 % річних
8	Коливання валютного курсу	Висока волатильність знижує інвестпривабливість	> ±10 % упродовж кварталу
9	Індекс боргового навантаження держави	Загальний державний борг до ВВП	> 60 %
10	Кількість корпоративних спорів / банкрутств	Вказує на нестабільність бізнес-середовища	Понад 15 % підприємств у ризикованому стані

У разі, якщо ≥ 3 –4 індикатори перебувають у «критичній зоні», це може свідчити про високу небезпеку інвестиційної діяльності в регіоні або країні.

1. Рівень інвестиційного ризику (IR). Це комплексний показник, який враховує ймовірність втрати інвестицій через політичну нестабільність, економічні шоки, регуляторні зміни або юридичну невизначеність. Якщо ризик перевищує 0,5 (на шкалі від 0 до 1), це свідчить про критичну інвестиційну небезпеку.

2. Індекс легкості ведення бізнесу (Doing Business). Цей міжнародний індекс показує, наскільки просто інвестору зареєструвати підприємство, отримати дозволи, підключитися до мереж, виконати контракти. Позиція країни нижче 70-го місця у світовому рейтингу сигналізує про надмірну зарегульованість.

3. Частка тіньової економіки у ВВП. Велика частка «тіні» в економіці означає відсутність прозорості, корупцію, високі фіскальні ризики для інвестора. Якщо показник перевищує 25 %, це вже створює значні загрози для планування і захисту капіталовкладень.

4. Індекс сприйняття корупції (Transparency International). Цей індикатор оцінює рівень корупції в державному управлінні. Показник нижче 35 балів зі 100 свідчить про високі ризики неформального тиску, відкатів, порушення прав інвестора та нерівні умови конкуренції.

5. Індекс правового захисту інвестора. Визначає якість судової системи, можливість захистити права власності, реалізувати контракт у судовому порядку. Якщо індекс нижче 5 балів зі 10 — це свідчення слабкості правових інституцій і загроза недотримання угод.

6. Політична стабільність та відсутність насильства. Цей індикатор враховує політичні протести, збройні конфлікти, зміну урядів, державні кризи. Низьке значення (менше -0.5 за шкалою Світового банку від -2.5 до +2.5) свідчить про високі ризики форс-мажорів.

7. Рівень інфляції. Високі темпи інфляції унеможливають стратегічне планування інвестицій, підвищують вартість будівництва, закупівель, логістики. Якщо інфляція перевищує 10 % річних — інвестування втрачає прогнозованість.

8. Коливання валютного курсу. Валютна нестабільність є особливо критичною для зовнішніх інвесторів. Якщо курс гривні змінюється більш ніж на 10 % упродовж кварталу, це підвищує ризик валютних втрат.

9. Боргове навантаження держави (держборг/ВВП). При перевищенні рівня 60 % держборгу до ВВП, країна наближається до боргової нестійкості, що стримує держфінансування інфраструктури та знижує інвестиційні гарантії.

10. Рівень корпоративних спорів і банкрутств. Зростання кількості судових справ та банкрутств серед компаній свідчить про нестабільне інвестсередовище. Якщо понад 15 % підприємств перебувають у зоні ризику — це сигнал про критичну корпоративну нестійкість.

Критичні значення кількох індикаторів одночасно (наприклад, інфляція, валютна нестабільність і високий рівень тіньової економіки) є сигналом для **перегляду інвестиційних стратегій, пошуку механізмів страхування ризиків або тимчасового зниження обсягів інвестицій у небезпечні проєкти/регіони.**

Обговорення. У ході дослідження виявлено, що індикаторами економічної безпеки інвестиційної діяльності можуть бути як макроекономічні (інфляція, валютна стабільність, інвестиційний клімат), так і мікроекономічні (рентабельність, платоспроможність, ліквідність)

індикатори. Розглянуто вплив зовнішніх і внутрішніх ризиків на інвестиційну активність підприємств, а також секторальні та регіональні особливості економічної безпеки. Запропоновано ризик-орієнтовану модель оцінювання з урахуванням інтегрального показника.

Висновки. У результаті проведеного дослідження було встановлено, що ефективне управління інвестиційною діяльністю підприємств вимагає постійного моніторингу та аналізу індикаторів економічної безпеки. Сучасне середовище функціонування бізнесу в Україні характеризується високим рівнем ризику, зокрема політичного, фінансового, правового та соціального, що значною мірою впливає на інвестиційні рішення як вітчизняних, так і іноземних інвесторів.

Розглянуті індикатори були класифіковані на макроекономічні (інфляція, курсова стабільність, державний борг, рівень інвестиційного ризику) та мікроекономічні (ліквідність, фінансова стійкість, рентабельність, оборотність активів), що дозволяє оцінити безпеку інвестицій з урахуванням як зовнішніх, так і внутрішніх факторів. Додатково було виділено секторальні показники, які враховують специфіку окремих галузей, таких як будівництво, промисловість, ІТ та інші.

Таким чином, підвищення економічної безпеки інвестиційної діяльності має базуватись на системному підході до управління ризиками, удосконаленні нормативно-правового середовища, забезпеченні прозорості та відкритості інформації, а також підвищенні професійної компетентності управлінських структур підприємств. Отримані результати можуть слугувати основою для подальших прикладних досліджень та розробки практичних рекомендацій у сфері стратегічного інвестування.

Список використаних джерел:

1. Sorokina, L., & Hoiko A. . (2023). Analysis of methods of assessing the risk of investment projects in the aspect of recovery of the national economy. *Ways to Improve Construction Efficiency*, 1(51), 52–73. [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2023.51\(1\).52-73](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2023.51(1).52-73). [in Ukrainian].
2. Stetsenko, S.P. (2022). Economics of a construction enterprise. Lira-K. [in Ukrainian].
3. Stetsenko, S.P., Tytok, V.V. & Emelianova O.M. (2020) Management of Adaptation of Organizational and Economic Mechanisms of Construction to Increasing Impact of Digital Technologies on the National Economy. *Journal of Reviews on Global Economic*, 9, 149–164.
4. Belenkova, O.Yu., & Antropov, Y.V. (2013). Economic sustainability of small construction enterprises of Ukraine: assessment, trends, prospects. *Problems of economy*. 3, 51-62..
5. Stetsenko, S., Sorokina, L., & Izmailova, K.. (2021) Model of a Company Competitiveness Control by Means of Artificial Intelligence Tools *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research*, 9(2), February, 60 – 65.
6. Olha, B., Halunka, O., & Matsapura, O. (2025). Targeted priorities and formalized toolkit for transformation of the management system for innovative development of participants of investment design projects and programs. *Economy and Society*, (71). <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2025-71-130>.
7. Stetsenko, S. P. (2014). Indicators of economic security of construction organizations. *Ways to increase the efficiency of construction in the conditions of the formation of market relations*. Issue 36. Part 2. 141-145..
8. Tugai, O.A. (2019) Organizational and technological, economic quality control aspects in the construction industry: collective monograph. Lviv-Toruń: Liha-Pres.
9. Sorokina, L.V., Goyko, A.F., Stetsenko, S.P., & Izmailova, K.V. (2017) Econometric tools for managing the financial security of construction enterprises: [monograph] / K.: KNUBA, Kryvyi Rih: Publisher FOP Chernyavskiy D.O. [in Ukrainian].
10. Bielienskova, O., Moholivets, A., Loktionova, Y. (2021). Measurement of the level of economic security of enterprises by the indicator of the attractiveness for hostile takeovers. *Baltic Journal of Economic Studies*, 7(5), 29-40. <https://doi.org/10.30525/2256-0742/2021-7-5-29-40>
11. Tugay, O.A., Pokolenko, V.O., Ryzhakova, G.M., Prykhodko, D.O., Lagutina, Z.V., & Stetsenko J.P. (2012). Development of modern analytical tools and organizational structures to ensure economically reliable investment in construction. *Ways to increase the efficiency of construction in the conditions of the formation of market relations*, 26, 87 – 89. [in Ukrainian].
12. Lysytsia, N. (2024). Methods and approaches for the diagnostics of the economic security of the enterprise. *Building Production*, (77), 11-17. <https://doi.org/10.36750/2524-2555.77.11-17>
13. Bielienskova, O. ., & Koval , O. . (2025). System for evaluating investment projects for reconstruction of the housing stock as a component of social protection of the population. *Ways to Improve Construction Efficiency*, 1(55), 285–295. [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2025.55\(1\).285-295](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2025.55(1).285-295)
14. Stetsenko, S., Kovtun, A., & Nemtyryev, O. (2025). The role of government policy in supporting sustainable construction development: macroeconomic approaches and financial instruments. *Sustainable Development of Economy*, (2 (53), 93-99. <https://doi.org/10.32782/2308-1988/2025-53-13>

СЕКЦІЯ 7

«ТЕХНОЛОГІЇ ЗАХИСТУ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА»

ТОКСИКОКІНЕТИЧНІ АСПЕКТИ УПРАВЛІННЯ ЕКОЛОГІЧНОЮ БЕЗПЕКОЮ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОНЕНТІВ ВІДХОДІВ ЕЛЕКТРИЧНОГО ТА ЕЛЕКТРОННОГО ОБЛАДНАННЯ (ВЕЕО)

Євгеній Гречанюк, аспірант¹ (ORCID: 0009-0008-5687-2269),

Віталій Іщенко, канд. техн. наук, доцент, завідувач кафедри екології, хімії та технологій захисту довкілля¹ (ORCID: 0000-0002-8464-1096),

¹Вінницький національний технічний університет, вул. Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, 21000, Україна

АНОТАЦІЯ. Полімерні компоненти ВЕЕО під час експлуатації та утилізації є джерелом надходження ксенобіотиків у довкілля, що зумовлює потребу глибокого аналізу їх токсикокінетики. У роботі розглянуто класичні фази взаємодії токсикантів із живими організмами (резорбція, розподіл, біотрансформація, елімінація) та процеси їх поведінки в екосистемах (міграція, персистування, біоаккумуляція, біотрансформація). Особливу увагу приділено характеристикам летких органічних сполук, бромованих антипіренів, важких металів та їх впливу на біоту і здоров'я людини. Порівняно нормативи для токсикантів відповідно до українських та міжнародних стандартів. Підкреслено необхідність міждисциплінарного підходу для оцінки ризиків, моніторингу забруднення та впровадження екологічно безпечних технологій поводження з ВЕЕО.

Ключові слова: ВЕЕО; токсикокінетика; полімерні компоненти; ксенобіотики; екологічна безпека.

Вступ. У процесі експлуатації та утилізації полімерні компоненти відходів електричного та електронного обладнання (ВЕЕО) стають джерелом надходження в довкілля ксенобіотиків: летких органічних сполук, бромованих антипіренів, стабілізаторів, пігментів, пластифікаторів і важких металів. Їх поведінка у біологічних і екологічних системах потребує вивчення класичної і екологічної токсикокінетики. Класична токсикокінетика охоплює резорбцію, розподіл, біотрансформацію та елімінацію токсикантів в організмі людини. Зокрема, фталати і бісфенол А легко проникають через шкіру і травний тракт, ліпофільні PBDE накопичуються в жировій тканині, а свинець та кадмій депонуються в кістках і печінці. Біотрансформація токсикантів може призводити як до зниження, так і до посилення їх токсичності, що важливо для оцінки ризиків для здоров'я людини. Екологічна токсикокінетика розглядає міграцію, персистування, біоаккумуляцію та біотрансформацію токсикантів у біоценозах. Ксенобіотики з полімерів можуть поширюватися повітрям, водою, накопичуватись у ґрунтах і водоймах, зберігаючи активність протягом десятиліть. Ліпофільні токсиканти біоакумулюються в організмах і передаються по трофічних ланцюгах, створюючи загрозу для людини через споживання забрудненої риби чи води. Мікробіологічна трансформація деяких речовин може призводити до утворення ще небезпечніших форм, як це спостерігалось у випадку метилртуті.

Аналіз літературних джерел. Аналіз останніх досліджень і публікацій у вітчизняній та закордонній літературі [1, 5, 7] описано токсичність бісфенолу А, фталатів, PBDE, кадмію та свинцю. Дослідження Кузнецової І.І. [1] висвітлюють особливості класичної та екологічної токсикокінетики. Європейські регламенти (REACH, RoHS) встановлюють жорсткі обмеження на вміст небезпечних речовин у ВЕЕО [2-4], однак в Україні ці вимоги частково інтегровані. Недостатньо опрацьованими залишаються питання біотрансформації домішок у полімерних ВЕЕО в умовах реального середовища. Таким чином, для ефективного управління екологічною безпекою необхідний міждисциплінарний підхід, що включає токсикокінетичні дослідження, моніторинг забруднення та впровадження екологічно безпечних технологій утилізації відходів електроніки [1].

Мета роботи. Аналіз токсикокінетичних аспектів полімерних компонентів ВЕЕО в контексті управління екологічною безпекою, з акцентом на класичну і екологічну токсикокінетику, порівняння нормативів та розробку рекомендацій щодо мінімізації екологічних ризиків.

Методи і матеріали. Наведено схему токсикокінетичного циклу токсикантів із полімерних ВЕЕО. Показано, що речовини з високою ліпофільністю (PBDE, фталати) мають тривалий період

напіввиведення та високий потенціал біоаккумуляції. Встановлено наявність розриву між українськими та міжнародними стандартами щодо допустимого вмісту токсикантів. Запропоновано адаптувати моделі токсикокінетики "організм–середовище" для прогнозу забруднення і визначення ризиків.

Виклад основного матеріалу. Класична токсикокінетика охоплює чотири ключові фази взаємодії токсиканту з організмом: резорбцію, розподіл, біотрансформацію та елімінацію [1].

Цей підхід дає змогу зрозуміти поведінку токсичних компонентів полімерів ВЕЕО після потрапляння в організм людини, що має критичне значення при оцінці санітарного ризику населення, яке проживає поблизу нелегальних звалищ електронних відходів або працює з вторинною сировиною [10].

Резорбція. Відомо, що токсиканти з полімерних матеріалів (наприклад, фталати, БФА, PBDE) здатні проникати в організм через шкіру, дихальні шляхи або шлунково-кишковий тракт. Вплив величини молекули, ліпофільності та ступеня дисоціації визначає ефективність проникнення через біологічні бар'єри [1,5]. Наприклад, фталати мають високу жиророзчинність і легко проникають через шкіру. Бісфенол А активно всмоктується при пероральному надходженні [5], що особливо актуально при споживанні води або харчових продуктів, що контактували з пошкодженими пластиками.

Розподіл. Ліпофільні речовини, такі як бромовані дифенілові ефіри (PBDE), накопичуються в жировій тканині, мозку та печінці [7]. Неорганічні компоненти, зокрема свинець або кадмій, депонуються в кістках або печінці завдяки високій спорідненості до біомолекул [1]. Зафіксовано, що у працівників підприємств із переробки електроніки концентрація свинцю в крові перевищує референтні межі у 2–5 разів.

Біотрансформація. В організмі більшість органічних речовин зазнає ферментативного окислення, гідролізу або кон'югації. Це може призводити як до інактивації токсиканту, так і до утворення ще більш токсичних метаболітів. Наприклад, бензо(а)пірен [1,8], який може утворюватися при термодеструкції пластмас, метаболізується до активних форм, що зв'язуються з ДНК і викликають мутації. Деякі побічні продукти біотрансформації здатні ініціювати пухлинний процес, пригнічувати імунітет або порушувати ендокринну регуляцію.

Елімінація. Основні шляхи виведення – нирки, печінка, легені. Ліпофільні речовини виводяться повільно, іноді – роками, що зумовлює їх хронічну токсичність та можливість біоаккумуляції. Наприклад, PBDE мають період напіввиведення з організму людини понад 2 роки, накопичуючись у грудному молоці [7], що створює загрозу впливу на немовлят.

Екологічна токсикокінетика аналізує поведінку ксенобіотиків у абіотичних і біотичних складових середовища [1,9]. Вона охоплює процеси перенесення, перетворення, накопичення та виведення речовин у межах біогеоценозів.

Міграція в екосистемах. Ксенобіотики з полімерів ВЕЕО поширюються повітрям, водою та ґрунтовими водами. Наприклад, бісфенол А активно вимивається з полімерів у водне середовище, а PBDE можуть переноситися пилом і осідати на ґрунтах [5,7]. Часто джерелами міграції є незаконні сміттєзвалища електронних відходів або неконтрольоване спалення пластиків, що спричиняє надходження діоксинів та фуранів у повітря.

Персистування. Багато сполук із полімерів є хімічно стабільними. Так, період напіврозпаду PBDE у ґрунті становить понад 10 років. Це створює довготривалу загрозу для довкілля. Наприклад, за даними моніторингу озера Онтаріо, пестицид мірекс було виявлено в донних відкладеннях через 20 років після припинення його використання. Аналогічно, бісфенол А, фталати та антипірени з полімерів зберігаються у ґрунтах понад 5-15 років [1,9].

Біоаккумуляція і біомагніфікація. Ліпофільні токсиканти, зокрема PBDE, здатні накопичуватися в організмах, зростаючи по трофічному ланцюгу. У рибах вміст PBDE може перевищувати концентрацію у воді [7] у десятки тисяч разів. Це створює загрозу для людини при вживанні забруднених продуктів. Особливо вразливими є мешканці прибережних зон, які вживають рибу з контамінованих водойм.

Біотрансформація у біоценозах. Мікроорганізми у ґрунтах та воді можуть частково трансформувати полімерні токсиканти. Проте, як у випадку з ртуттю в бухті Мінамато (Японія),

такі перетворення можуть призводити до утворення ще токсичніших сполук [6,8] (наприклад, метилртуть). Деякі пластмасові стабілізатори можуть перетворюватися в ендокринодеструктивні сполуки, які впливають на розмноження та поведінку диких тварин.

Порівняння з міжнародними стандартами та регламентами

Для ефективного управління екологічною безпекою важливо враховувати нормативні вимоги, прийняті на міжнародному рівні та в Україні. У таблиці 1 представлено приклад порівняння граничних концентрацій (ГДК) окремих токсикантів з полімерних компонентів ВЕЕО згідно з різними стандартами.

Таблиця.1

Порівняння нормативів для токсикантів із полімерних ВЕЕО

Речовина	ГДК в Україні (ДСП/ДСТУ)	ГДК у ЄС (REACH/CLP)	ГДК ВООЗ у питній воді	Коментар
Свинець (Pb)	0,03 мг/м ³ (повітря), 0,01 мг/л (вода)	0,05 мг/м ³ (робоча зона)	0,01 мг/л	Європейські регламенти передбачають жорсткі обмеження в електроніці (RoHS)
Кадмій (Cd)	0,01 мг/м ³ , 0,003 мг/л	0,01 мг/м ³	0,003 мг/л	Токсичний для нирок, накопичується в організмі
Бісфенол А (BPA)	немає окремої норми	0,04 мг/кг маси тіла/день (TDI)	0,005 мг/л	TDI – допустиме добове споживання (EFSA)
PBDE (декабромдифеніл)	відсутня	заборонений в REACH	відсутня	Активно вилучається з використання

Це порівняння демонструє різницю в підходах до токсичності та допустимих рівнів, що потребує гармонізації стандартів України з вимогами директив ЄС [2,3,4], зокрема:

- RoHS (2011/65/EU) - обмеження на використання свинцю, ртуті, кадмію, PBDE у ВЕЕО;
- REACH - реєстрація та обмеження хімічних речовин;
- Базельська конвенція - контроль трансграничного переміщення небезпечних відходів.

Схема токсикокінетичного впливу полімерних ВЕЕО

ТОКСИКОКІНЕТИЧНИЙ ЦИКЛ ТОКСИКАНТІВ

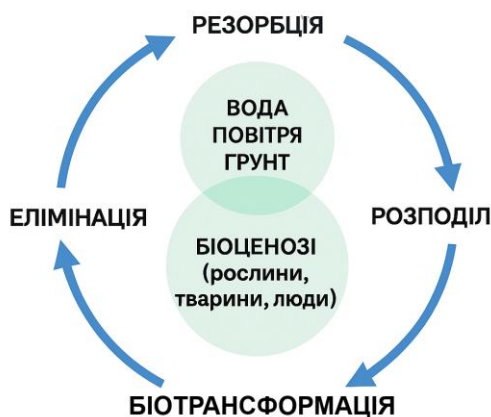


Рис.1 Схематичне представлення токсикокінетичного циклу токсиканту з полімерів ВЕЕО

1. Викид у довкілля (спалення, зберігання)
2. Міграція у воду, повітря, ґрунт
3. Резорбція організмом (через дихання, шкіру, травлення)
4. Розподіл (жирова тканина, мозок, печінка)
5. Біотрансформація (метаболіти – активні/неактивні)
6. Елімінація (нирки, печінка, грудне молоко)
7. Біоаккумуляція / Біомагніфікація (організми – трофічний ланцюг)

Цей цикл підкреслює важливість міждисциплінарного підходу до аналізу впливу БЕЕО та розробки заходів екобезпеки на різних рівнях - від індивідуального захисту до державної політики поводження з відходами.

Обговорення. Одержані результати свідчать, що полімерні компоненти БЕЕО є тривалим джерелом ксенобіотиків, здатних до резорбції, накопичення та трансформації як в організмах, так і в екосистемах. Висока ліпофільність таких сполук, як PBDE і фталати, сприяє їхньому біоаккумулятивному потенціалу та довготривалому збереженню в біоті. Це особливо небезпечно в умовах недостатньої регламентації обігу та утилізації БЕЕО в Україні, що зумовлює підвищені ризики для населення і навколишнього середовища. Порівняльний аналіз нормативів демонструє відставання національних стандартів від міжнародних вимог, що потребує термінової гармонізації законодавства. Токсикокінетичний підхід дозволяє не лише виявляти ризики, а й моделювати динаміку поширення токсикантів, що є ключовим для розробки ефективних стратегій моніторингу, санітарного контролю та екологічно безпечних технологій поводження з полімерними відходами електроніки. Особливо актуальним є залучення результатів таких досліджень до процесу ухвалення рішень на рівні державної екологічної політики та промислової екотехнологічної практики.

Висновки. Розуміння токсикокінетичних характеристик речовин із полімерних БЕЕО має ключове значення для формування ефективних систем моніторингу, санітарного контролю та екологічного менеджменту [1,10]. Це дозволяє:

- передбачати ризики забруднення та отруєння;
- розробляти методи детоксикації середовища (сорбційні бар'єри, фітоочищення);
- регулювати поводження з БЕЕО відповідно до принципів запобігання, переробки, безпечного зберігання.

Особливу увагу слід приділяти дослідженням метаболізму полімерних домішок, визначенню їх біодоступності та стійкості в умовах реальних біогеоценозів. Для цього рекомендується застосовувати моделі токсикокінетики «організм–середовище» із врахуванням сезонних, кліматичних і антропогенних факторів.

Список використаних джерел:

1. Kuznietsova, I. I. (2015). *Ekolohichna toksykolohiia ta ekotoksykokinetyka: Navchalnyi posibnyk* [Ecological toxicology and ecotoxicokinetics: Textbook]. Mykolaiv: MNAU. [in Ukrainian].
2. European Parliament and Council. (2011). Directive 2011/65/EU (RoHS II) on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment. Official Journal of the European Union, L174, 88–110.
3. European Parliament and Council. (2006). Regulation (EC) No 1907/2006 (REACH) concerning the Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals. Official Journal of the European Union, L396, 1–849.
4. World Health Organization. (2022). *Guidelines for drinking-water quality* (4th ed.). Geneva: WHO Press.
5. European Food Safety Authority. (2023). Scientific opinion on the risks to public health related to the presence of bisphenol A (BPA) in foodstuffs. *EFSA Journal*, 21(4), e08180. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2023.8180>.
6. Basel Convention on the Control of Transboundary Movements of Hazardous Wastes and Their Disposal. (1989). United Nations Environment Programme (UNEP).
7. Harrad, S., de Wit, C. A., Abdallah, M. A.-E., Bergh, C., Björklund, J. A., Covaci, A., ... & Huber, S. (2010). Indoor contamination with PBDEs, PCBs, and other persistent organic pollutants. *Environmental Science & Technology*, 44(8), 3221–3231. <https://doi.org/10.1021/es9037969>.
8. Ritter, L. (1995). *Persistent organic pollutants*. United Nations Environment Programme (UNEP).
9. Liagkouridis, I., & Cousins, I. T. (2019). Fate of additive chemicals from plastic consumer products in the environment. *Science of the Total Environment*, 685, 422–430. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.466>.
10. Shaparenko, O. V. (2020). *Upravlinnia povodzhenniam z vidkhodamy elektronnoho obladnannia: Normatyvno-ekolohichni aspekty* [Management of electronic equipment waste: Regulatory and environmental aspects]. Kyiv: NAU. [in Ukrainian].

ЗАСТОСУВАННЯ УЛЬТРАЗВУКОВИХ КАВІТАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ОБРОБКИ РІДИН З МЕТОЮ ЗНЕЗАРАЖЕННЯ ТА ОЧИЩЕННЯ ВІД МЕХАНІЧНИХ ДОМІШОК

Олександр Луговський, професор, д.т.н., професор¹ (ORCID: 0000-0003-1076-7718),

Андрій Зілінський, доцент, к.т.н., доцент¹ (ORCID: 0000-0003-4258-7738),

Ігор Гришко, доцент, к.т.н., доцент¹ (ORCID: 0000-0002-5709-1359),

Аліна Шульга, доцент, к.т.н., доцент¹ (ORCID: 0000-0002-6884-6518),

¹Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", м.Київ, Берестейський проспект, 37, 03056, Україна

АНОТАЦІЯ. Ультразвукова кавітація є потужною технологією, що знаходить все ширше застосування у промисловій обробці рідин. В даній роботі розглянуто основні напрямки використання ультразвукової кавітації, зокрема для дезінфекції промислових вод та очищення рідин від механічних домішок. Детально аналізуються фізико-хімічні механізми кавітації, що лежать в основі її бактерицидної дії та здатності руйнувати і диспергувати тверді частинки. Особливу увагу приділено ультразвуковому фільтруванню як перспективному методу підвищення ефективності розділення суспензій та очищення фільтруючих елементів. Обговорюються ключові технологічні параметри, типи обладнання та переваги ультразвукових технологій, такі як висока ефективність, екологічність та можливість інтенсифікації процесів.

Ключові слова: Ультразвукова кавітація; обробка рідин; дезінфекція; очищення; механічні домішки; ультразвукове фільтрування.

Вступ. Обробка рідин, таких як технологічні та стічні води, суспензії та емульсії, є критично важливим завданням у багатьох галузях промисловості. Ці рідини часто містять широкий спектр забруднень, включаючи патогенні мікроорганізми та різноманітні механічні домішки – від грубодисперсних частинок до колоїдів та емульгованих речовин. Наявність таких забруднень може суттєво погіршувати якість кінцевої продукції, знижувати ефективність технологічних процесів через засмічення обладнання або небажані побічні реакції, а також створювати значні екологічні ризики при скиданні у навколишнє середовище. Наприклад, у системах охолодження мікроорганізми можуть утворювати біоплівки, що знижують тепловіддачу та спричиняють корозію [1], а в стічних водах нафтохімічної промисловості присутні складні органічні сполуки та емульговані нафтопродукти, що потребують ефективного видалення.

У цьому контексті ультразвукові кавітаційні технології пропонують перспективний фізико-хімічний підхід до обробки рідин. Ультразвукова кавітація, що виникає при проходженні потужних ультразвукових хвиль через рідину, генерує екстремальні локальні умови, здатні інтенсифікувати масообмінні процеси, руйнувати клітини мікроорганізмів та диспергувати тверді частинки. Це відкриває можливості для ефективної дезінфекції та очищення рідин без використання або зі значним зменшенням кількості хімічних реагентів, що відповідає сучасним вимогам до екологічності промислових процесів. Зростаючий інтерес до "зелених" технологій підкреслює актуальність дослідження та впровадження ультразвукових методів як альтернативи традиційним.

Аналіз літературних джерел. Традиційні методи обробки промислових рідин, такі як хімічна дезінфекція (наприклад, хлорування) та механічна фільтрація, мають низку обмежень. Хімічні методи можуть призводити до утворення шкідливих побічних продуктів та вимагають обережного поводження з реагентами. Механічна фільтрація часто є неефективною для видалення дрібнодисперсних частинок та мікроорганізмів, а фільтруючі елементи швидко засмічуються, що призводить до значних експлуатаційних витрат та простоїв обладнання. Ці обмеження стимулюють пошук та впровадження нових, більш ефективних та екологічно безпечних технологій.

Основою ультразвукових технологій обробки рідин є явище акустичної кавітації. При проходженні ультразвукових хвиль високої інтенсивності через рідке середовище виникають чергувані цикли стиснення (високий тиск) та розрідження (низький тиск). Під час фази розрідження, якщо амплітуда звукового тиску перевищує сили міжмолекулярного зчеплення рідини, утворюються мікроскопічні порожнини або вакуумні бульбашки, відомі як кавітаційні зародки. Ці бульбашки можуть рости протягом кількох циклів тиску, накопичуючи енергію. Коли бульбашка

досягає критичного (резонансного) розміру, при якому вона більше не може поглинати енергію, вона зазнає швидкого адіабатичного колапсу (імплзії) під час наступної фази стиснення.

Колапс кавітаційних бульбашок супроводжується виділенням величезної кількості енергії в мікроскопічному об'ємі, що призводить до виникнення екстремальних локальних умов. Температура всередині бульбашки, що колапсує, може сягати приблизно 5000 К, а тиск – близько 10000 атмосфер. Також формуються високошвидкісні кумулятивні мікрострумені рідини, що рухаються зі швидкістю до 280 м/с, та потужні ударні хвилі. Ці фізичні ефекти – високі температури, тиски, мікрострумені та ударні хвилі – є основними рушійними силами для більшості застосувань ультразвукової кавітації, включаючи очищення поверхонь, диспергування частинок та руйнування клітинних структур. Інтенсивні зсувні напруження та турбулентність, що виникають внаслідок кавітації, також відіграють важливу роль.[2]

Окрім фізичних ефектів, кавітація спричиняє і хімічні перетворення, відомі як сонохімічні реакції. Екстремальні температури та тиски всередині бульбашок, що колапсують, призводять до гомолітичного розщеплення молекул води та розчинених газів з утворенням високореактивних вільних радикалів, таких як гідроксильні радикали ($\text{HO}\bullet$), гідропероксильні радикали ($\text{HO}_2\bullet$) та атомарний водень ($\text{H}\bullet$).[2] Ці радикали є потужними окисниками і можуть ініціювати або прискорювати різноманітні хімічні реакції, включаючи деградацію органічних забруднювачів та інактивацію мікроорганізмів. Здатність генерувати такі екстремальні умови на мікрорівні без суттєвої зміни макроскопічних параметрів рідини (наприклад, без значного підвищення її загальної температури) є однією з ключових переваг ультразвукової кавітації.

На основі цих механізмів, ультразвукова кавітація розглядається в літературі як ефективний метод знезараження рідин завдяки комбінованій дії фізичних та хімічних механізмів на мікроорганізми.[2] Також вона визнається ефективним інструментом для видалення та маніпулювання механічними домішками в промислових рідинах.

Мета роботи. Метою даної роботи є огляд сучасного стану застосування ультразвукових кавітаційних технологій для дезінфекції промислових рідин та їх очищення від механічних домішок. Особливу увагу буде приділено принципам та перевагам ультразвукового фільтрування як методу, що дозволяє подолати обмеження традиційних фільтраційних систем.

Виклад основного матеріалу.

Ультразвукова дезінфекція промислових рідин.

Механізми інактивації мікроорганізмів включають фізичне руйнування клітин ударними хвилями та мікроструменями та хімічну атаку вільними радикалами. Локальний нагрів та деагломерація також сприяють ефективності.[3]

Застосування:

- **Обробка стічних вод:** Зниження коліформ, *E. coli*. Приклад: обробка вторинних стоків (20 кГц, 400 Вт/л, 60 хв) знизилася *E. coli* на 2.9 log. Комбінація з УФ підвищує ефективність.[3] Гідродинамічна кавітація показує 100% видалення *E. coli*.

- **Дезінфекція баластних вод:** Інактивація морських організмів (20 кГц) без хімікатів, зниження бактерій та вірусів на 6-7 log.

- **Харчова промисловість:** Нетермічна пастеризація соків, молока. Приклад: 5-log зниження *E. coli* в яблучному соку за 35 с при 60°C.

Ефективність залежить від параметрів процесу та стійкості мікроорганізмів (наприклад, *Bacillus subtilis*). Часто використовується в комбінації з іншими методами (УФ, озон) для синергетичного ефекту.[3]

Ультразвукове очищення від механічних домішок

Принципи базуються на інтенсивних фізичних ефектах кавітації.

Принципи видалення домішок: Кавітаційне очищення поверхонь та деагломерація частинок. Мікрострумені та ударні хвилі руйнують адгезійні зв'язки забруднень з поверхнею, видаляючи пил, оксиди, жири. Ультразвук диспергує агломерати частинок. Акустичні радіаційні сили в стоячій хвилі можуть концентрувати частинки для відділення. [4]

Ультразвукове фільтрування:

● Інтенсифікація мембранного фільтрування: Зменшення концентраційної поляризації та забруднення мембран.[5] Кавітація руйнує осад на мембрані, збільшуючи потік пермеату та термін служби мембран.[6] Приклад: фільтрація вакуумного залишку з УЗ 1000 Вт знизила різницю тисків на 73 %.[6]

● Власне ультразвукові фільтри: Інтегровані випромінювачі для безперервного самоочищення або прямого розділення. [7]

Приклади видалення домішок:

● Тверді частинки: Стружка, абразиви, мікропластик.[8] Видалення мікропластику акустичним фокусуванням показало ефективність 70-82%.

● Колоїди та емульсії: Руйнування емульсій нафтопродуктів у воді. Очищення пластової води (39.5 кГц, 30 хв) знизило вміст нафти >95%.

● Очищення фільтрів та мембран: Видалення забруднень з металевих сіток, полімерних мембран.

Переваги та перспективи

Переваги: висока ефективність дезінфекції та видалення домішок [6], екологічність (зменшення хімікатів) , універсальність (в'язкі, непрозорі рідини) , інтенсифікація процесів 28, компактність та автоматизація обладнання.[4]

Обмеження: високі капітальні витрати, енергоспоживання, ерозія сонотродів, масштабування для великих об'ємів [9], необхідність оптимізації параметрів.

Перспективи: нові матеріали для випромінювачів, вдосконалені реактори, комбінування з іншими технологіями (мембрани, фотокаталіз, озон) для синергії.

Висновки. Ультразвукові кавітаційні технології є ефективним інструментом для дезінфекції та очищення промислових рідин від механічних домішок завдяки фізичним та хімічним ефектам кавітації. Ультразвукове фільтрування значно підвищує ефективність розділення суспензій та запобігає забрудненню мембран.

Незважаючи на виклики (вартість, енергоспоживання, масштабування), переваги (ефективність, екологічність) роблять ці технології привабливими. Подальші дослідження та розробки сприятимуть їх ширшому промислому застосуванню.

Список використаних джерел:

1. Xu, P., Xu, Z., Wang, J., Zhang, Y., & Zhang, L. (2012). MIC in Circulating Cooling Water System. *Journal of Water Resource and Protection*, 04(04). <https://doi.org/10.4236/jwarp.2012.44022>
2. Song, K., Liu, Y., Umar, A., Ma, H., & Wang, H. (2024). Ultrasonic cavitation: Tackling organic pollutants in wastewater. In *Chemosphere* (Vol. 350). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.141024>
3. Vajnhandl, S., Željko, T., Majcen Le Marechal, A., & Valh, J. V. (2015). Feasibility study of ultrasound as water disinfection technology. *Desalination and Water Treatment*, 55(5). <https://doi.org/10.1080/19443994.2014.927331>
4. Луговський, О. Ф., Мовчанюк, А. В., Шульга, А. В., Берник, І. М., Гришко, І. А., & Зілінський, А. І. (2022). Ультразвукові кавітаційні технології. Знезараження та фільтрування. ФОП Кушнір Ю.В. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/47461>
5. Muthukumar, S., Kentish, S. E., Stevens, G. W., & Ashokkumar, M. (2006). Application of ultrasound in membrane separation processes: A review. In *Reviews in Chemical Engineering* (Vol. 22, Issue 3). <https://doi.org/https://doi.org/10.1515/REVCE.2006.22.3.155>
6. Lin, W., Wang, J., & Wang, S. (2024). Numerical and experimental investigation of ultrasound effects on filtration process in wire-wrapped filter tube. *Ultrasonics Sonochemistry*, 109, 106991. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2024.106991>
7. Луговський, О. Ф., Зілінський, А. І., Шульга, А. В., & Гришко, І. А. (2020). Можливості регенерації фільтруючих перегородок. *Mechanics and Advanced Technologies*, 89, 55–64. <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2020.89.211225>
8. Hu, M., Zhu, D., Pan, J., Guo, Z., Yang, C., Li, S., & Cao, W. (2025). Efficient Removal of Impurities from Refractory Oolitic Magnetite Concentrate via High-Pressure Alkaline Leaching and Ultrasonic Acid Leaching Process. *Minerals*, 15(3). <https://doi.org/10.3390/min15030220>
9. Ashokkumar, M. (2016). *Advantages, Disadvantages and Challenges of Ultrasonic Technology*. https://doi.org/10.1007/978-3-319-28974-8_3

ТЕХНОЛОГІЇ ВІДЕОСПОСТЕРЕЖЕННЯ – ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИЙ ЗАХИСТ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

Вячеслав Курепін, доцент, канд.екоп.наук, доцент¹ (ORCID ID:0000-0003-4383-6177),

Валерія Іваненко, головний спеціаліст відділу планування та координації дій у надзвичайних ситуаціях²,

¹Миколаївський національний аграрний університет, вулиця Георгія Гонгадзе, 9, 54000, Україна

²Управління з питань надзвичайних ситуацій та цивільного захисту населення Миколаївської міської ради

АНОТАЦІЯ. У тезах розглядаються сучасні технології захисту довкілля як ключовий інструмент сталого розвитку, найбільш ефективні екологічні інновації, їх вплив на зменшення техногенного навантаження, а також перспективи їхнього впровадження в Україні. У сучасних умовах для охорони навколишнього середовища дедалі більшого значення набуває застосування систем відеоспостереження. Розглянуто інноваційні підходи до моніторингу екологічної ситуації; виявлення порушень природоохоронного законодавства; контролю за станом атмосферного повітря, водних ресурсів, лісових та степових масивів з використанням відеоспостереження. Розкривається потенціал таких технологій у запобіганні екологічним катастрофам та збереженню природного середовища для майбутніх поколінь.

Ключові слова: екологічні межі; інноваційні підходи; природні ресурси; відеообладнання; екологічні проблеми

Вступ. В умовах інтенсивного техногенного навантаження на природне середовище дедалі більшої актуальності набуває екологічна безпека суспільства. Здобутки людини у продовж її існування у інноваційних процесах розвитку, зрозуміло, приносило/приносить користь. Але не всі технології розвитку людської діяльності були для самої людини безпечними [1]. Забруднення атмосфери, гідросфери, літосфери несе загрозу, як довкіллю, так і здоров'ю людей. У зв'язку з цим, суспільство чекає від науки і техніки ефективних рішень для зменшення цього впливу. Вони повинні гармонізувати потреби суспільства з екологічними межами планети та відіграти важливу роль у забезпеченні сталого розвитку, як окремого регіону, так і країни в цілому

Аналіз літературних джерел. Наукові публікації таких вчених, як Борисова-Ярига А.М., Галєєва А.П., Горбенко О.А., Лимар О.О. свідчать про велику увагу, яку приділяють технологіям захисту довкілля. В роботах науковців-дослідників розглядаються системи біологічного очищення води, аналізуються ефективність використання технічних засобів захисту від забруднення природи від промисловості. Описуються інноваційні підходи до зниження викидів CO₂ та утилізації відходів, застосування екологічно безпечних технологій.

Мета роботи. Метою роботи є вивчення сучасних технологій захисту навколишнього середовища, аналіз їх ефективності та можливостей застосування в умовах України.

Виклад основного матеріалу. Людська цивілізація усі роки свого існування відзначалася активним споживанням та переробкою природних ресурсів. Бурхливий розвиток інноваційно-технічного прогресу провокує зростання обсягів промислового виробництва, але неминуче тягне за собою зростання викидів шкідливих речовин у навколишнє середовище. При збільшенні екологічного навантаження на навколишнє середовище стає актуальним для розвитку нових технологічних процесів захисту довкілля.

До природних ресурсів змінити ставлення людей можуть інноваційні технології та ідеї. Здійснити моніторинг навколишнього середовища можна багатьма способами [2]. Ми обговоримо один, на нашу думку, найефективніший. Для продуктивного та точного моніторингу навколишнього середовища стали використовувати відеоспостереження.

Із за інтенсивного економічного розвитку і зростання промисловості продовжується тиск на світ природи. Людство повинно зрозуміти, воно несе відповідальність за вплив на середовище існування та довкілля. У цьому контексті дуже важлива мінімізація людської діяльності щодо впливу її на навколишнє середовище. Можливо, таку діяльність треба було розпочинати раніше.

Відеотехнологію в галузі охорони навколишнього середовища вважають інноваційним інструментом. За рахунок використання в HD-камерах відеоспостереження технологій штучного інтелекту вони стали неймовірно потужними та допомагають якісно та безперервно здійснювати моніторинг навколишнього середовища. HD-камери можуть поєднуватися з різними пристроями інтернет технологій: розумні датчики, безпілотні літальні апарат (БЛА), різноманітне

відеообладнання тощо. Дослідники та практики можуть збирати та аналізувати будь-яку інформацію для екологічних проєктів; дані про повітря, воду, ґрунт [3]; проводити оцінку екологічних показників на будь-якій ділянці місцевості в поточному часі. Надійність та достовірність даних спонукає нас розглянути деякі поточні застосування цієї технології докладніше.

1. Запобігання та гасіння лісових пожеж. Для природних екосистем, місць проживання людей, тварин, які мешкають у лісах, самих людей лісові пожежі (особливо верхові, вогневі шторми) мали руйнівні, а подекуди катастрофічні наслідки. Тому дуже важливо виявити пожежу на ранній стадії загоряння. В сучасних умовах за допомогою технології відеоспостереження (ТВ) виявити початкову стадію пожежі, перш ніж вона повністю спалахне, нескладно.

Тепловізори та оптичні камери за допомогою використання технології Deep learning та штучного інтелекту своєчасно запускають алгоритми виявлення пожежі та забезпечать надходження до операторів рятувальних служб високоточних сигналів тривоги на ранній стадії загоряння. Цю технологію можна використовувати в інтелектуальній системі раннього попередження та контролю за лісовими масивами. Така система спроможна безперервно цілодобово моніторити лісові угіддя та запобігати катастрофі [4].

2. Контроль якості повітря.

Боротьба із забрудненням повітря в урбанізованому середовищі постійно ускладнюється, а деяких випадках стає неможливим завданням. В інтенсивних дискусіях фахівці, науковці, практики шукають надійні результативні шляхи зменшення забруднюючих речовин у повітрі міст з інтенсивними виробничими процесами.

У міських районах: на будівельних майданчиках, підприємствах з постійним викидом пилу та газів, відкритих майданчиках з установками які виділяють вагому кількість вихлопних газів, для контролю за якістю повітря вже використовують комплексне відеоспостереження. За допомогою БЛА в масштабах міста моніторять навколишнє середовище IP-камери відеоспостереження, у промислових зонах, допомагають менеджерам-екологам відстежувати викиди газу на об'єктах господарювання в режимі поточного часу.

3. Боротьба із небезпечним забрудненням води. Інтелектуальні інструменти відеоаналітики можуть допомогти усунути небезпечне забруднення води. За допомогою відео технології можна віддалено здійснювати контроль джерел води [5]. Компактність та надійність сучасних ТВ допомагають вирішувати різноманітні проблеми: вони здатні виявити об'єкти, що плавають; зміну кольору води; незаконне скидання відходів тощо. В поєднанні з іншими допоміжними рішеннями, вони здатні виявити злив стічних вод у водойми, незаконне використання водних ресурсів тощо. Вони не мають будь-яких потенційних обмежень при роботі в більш складних умовах. Тепловізійні камери на БЛА - це гарантія чітких вигляд і вдень, і вночі.

4. Міста без сміття та відходів. Упор на скорочення, відновлення, використання та видалення небезпечного сміття стає все більше та більше популярним серед міських жителів урбанізованого середовища. Гарантія прозорого та інтелектуального керування відходами (від виробництва до транспортування та утилізації) – використання ТВ з різними підтримуючими технологіями. Для точного сортування та відстеження відходів на етапі виробництва використовують обладнання для радіочастотної ідентифікації [6]. Транспортні засоби, які перевозять сміття оснащуються мобільним обладнанням відеоспостереження. Будь яке порушення у процесі утилізації відходів та сміття можуть зафіксувати супутникові навігаційні рішення. Вони здатні через високошвидкісну мережу передачі даних передати відеозображення про порушення до центру управління в режимі поточного часу. Для підвищення безпеки процесу утилізації відходів на сміттєспалювальних заводах використовують пожежні датчики (для запобігання загорянням) та вуличні IP камери.

5. Екологічний інтелектуальний нагляд та захист. На сьогодні вразливими природними об'єктами є заповідні місця. Вони чутливі до будь якого забруднення [7]. Використовуючи IP камери відеоспостереження, можна змінити традиційні процеси екологічного нагляду. Адже для природи неодноразові поїздки на транспортних засобах можуть містити масу трудомістких процесів та навіть завдавати шкоди природі. За допомогою IP камер, не ступаючи до вразливих районів, можна відстежувати екологічні проблеми, дистанційно керувати різними об'єктами. Незаконне

будівництво в захищених місцях, браконьєрство, проникнення зловмисників заповідних зон легко виявляється безпілотниками з камерами відеоспостереження, тепловізійним обладнанням тощо.

Висновки. Системи відеоспостереження, це потужний засіб захисту природи, який поєднує технології та екологічну відповідальність. Ефективний засіб екологічного контролю може виявити екологічні порушення у режимі реального часу. Сучасні системи не тільки знімають відео, а й аналізують дані. Відеоспостереження допомагає запобігати екологічним катастрофам.

Список використаних джерел.

1. Kurepin, V. M., & Ivanenko, V. S. (2023, November 15). *Ecology and war: A look through the past into the future, global challenges and threats* [Conference presentation abstract]. *Ekologia i racjonalne zarządzanie przyrodą: edukacja, nauka i praktyka* [Ecology and Rational Nature Management: Education, Science and Practice]: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference. MANS in Łomża, Łomża–Zhytomyr, Poland–Ukraine. <https://dspace.mnau.edu.ua/jspui/handle/123456789/16200>.
2. Makeiev, V. V. (2025, April 25). *Monitoring of emergencies in Ukraine* [Conference presentation abstract]. Problems of civil protection and life safety: Modern realities of Ukraine: Proceedings of the 11th All-Ukrainian Correspondence Scientific and Practical Conference. Dragomanov Ukrainian State University, Kyiv, Ukraine. <https://dspace.mnau.edu.ua/jspui/handle/123456789/21290>.
3. Pindera, M. (2022, October 5–6). *Environmental safety of territories in the combat zone* [Conference presentation abstract]. Youth, Science, Business: Proceedings of the All-Ukrainian Internet Conference of Higher Education Applicants and Young Scientists. Mykolaiv National Agrarian University, Mykolaiv, Ukraine. <https://dspace.mnau.edu.ua/jspui/handle/123456789/11861>.
4. Yurchenko, K. D. (2024, October 23–25). *Improving the state of the environment: The life cycle concept* [Conference presentation abstract]. Ecological and social aspects of economic development under the conditions of European integration: Proceedings of the 10th All-Ukrainian Scientific and Practical Conference. Mykolaiv National Agrarian University, Mykolaiv, Ukraine. <https://dspace.mnau.edu.ua/jspui/handle/123456789/18923>.
5. Ivanenko, V. S., & Kurepin, V. M. (2022, March 22). *Protection of water resources and water supply sources* [Conference presentation abstract]. Protection of water resources – Global challenges, threats of desertification of territories, international obligations of world states: Proceedings of the annual thematic round table. Mykolaiv National Agrarian University, Mykolaiv, Ukraine. <https://dspace.mnau.edu.ua/jspui/handle/123456789/11213>.
6. Zahliada, A. O. (2024, October 17–18). *Development of environmentally safe production: Key directions for further growth of environmentally clean products* [Conference presentation abstract]. Development of the agricultural sector and implementation of scientific developments into production: Proceedings of the 7th International Scientific and Practical Conference. Mykolaiv National Agrarian University, Mykolaiv, Ukraine. <https://dspace.mnau.edu.ua/jspui/handle/123456789/19610>.
7. Ivanenko, V. S. (2022, October 27–28). *Environmental problems of use and protection of rivers in the Pripjat basin* [Conference presentation abstract]. Transboundary Dniester River Basin Management and EU Integration – Step by Step: Proceedings of the International Conference. Eco-TIRAS, Chişinău, Moldova. <https://dspace.mnau.edu.ua/jspui/handle/123456789/11848>.

БАЗАЛЬТОВИЙ ТУФ У ТЕХНОЛОГІЯХ ЗАХИСТУ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

Вадим Радіонов¹, аспірант ([ORCID:0009-0001-0439-492X](https://orcid.org/0009-0001-0439-492X)),

¹Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, вул. Черноголазовская, 17, 61002, Україна

АНОТАЦІЯ. У статті досліджено можливості використання базальтового туфу як природного фільтрувального та сорбційного матеріалу у сучасних екотехнологіях. На основі аналізу фізико-хімічних властивостей туфу та практик його застосування в Україні та Європі, визначено ключові напрямки його використання для очищення води, рекультивації ґрунтів і створення екологічно безпечних будівельних матеріалів. Особлива увага приділена підходам, що відповідають стратегії Nature-Based Solutions (NBS) та принципам циркулярної економіки. Доведено, що базальтовий туф має кілька властивостей, які можуть позитивно впливати на процес компостування органічних відходів. Підкреслюється, що базальтовий туф забезпечує доступ кисню, необхідного для аеробного розкладання органіки мікроорганізмами, також він здатний адсорбувати аміак, сірководень та інші леткі сполуки, що знижує неприємний запах. Розглядається, що завдяки мінеральному складу, туф слугує джерелом мікроелементів для ґрунтових мікроорганізмів. Підтверджено, що туф збагачує компост мінералами, покращуючи його агрохімічні властивості.

Ключові слова: базальтовий туф; захист довкілля; фільтрація; сорбенти; природні матеріали; циркулярна економіка; NBS; екотехнології

Вступ. Сучасна концепція охорони навколишнього природного середовища передбачає перехід до екологічно безпечних, ресурсощадних технологій і матеріалів. Проблеми забруднення довкілля, деградації ґрунтів і вод, зростаюча кількість промислових і побутових відходів формують нагальну потребу у впровадженні новітніх природоорієнтованих технологій. Важливою передумовою сталого розвитку є переорієнтація з енергоємних, синтетичних рішень на екологічно безпечні природні матеріали, які можуть ефективно виконувати функції очищення, фільтрації, рекультивації та ізоляції. У цьому контексті базальтовий туф як доступний та багатоцільовий геоматеріал набуває особливої актуальності. Його унікальні фізико-хімічні властивості дозволяють ефективно використовувати туф у системах очищення середовища, як альтернативу енергоємним технологіям.

Базальтовий туф має високий потенціал як природний фільтрувальний та сорбційний матеріал. Його мінералізована пориста структура дозволяє ефективно затримувати важкі метали й органічні забруднювачі з води та ґрунтів [1]. У дослідженнях, проведених у межах проєктів Horizon 2020, природні вулканічні матеріали, зокрема туфи, були класифіковані як низькоенергоємні фільтрувальні середовища для очищення промислових стоків і сільськогосподарських дренажів [2].

Аналіз літературних джерел. Muller-Soykher зазначає позитивний вплив базальтового туфу на родючість ґрунтів та екологічну безпеку [3]. Rašek, J. досліджує використання базальтового туфу як джерела калію, магнію та кремнію [4]. Вітчизняні дослідники Кондратюк, Ю. В., Савчук, Л. О. розглядають застосування мінералів вулканічного походження у технологіях рекультивації ґрунтів [5]. Ґрунтозахисні технології в Україні з використанням базальтових матеріалів geodar.info – ГеоДар Україна [2]. Мельничук, М. М., Ковальчук, І. П. розглядають використання базальтового туфу як фільтраційного матеріалу, мінерального добрива і сорбента [6]. Експериментальні дані про поліпшення структури ґрунтів після внесення базальтового туфу сповіщає Український науково-дослідний інститут екологічних проблем [7].

Метою статті є обґрунтування доцільності та перспектив використання базальтового туфу в технологіях охорони довкілля. Дослідження спрямоване на висвітлення фізико-хімічних властивостей базальтового туфу, аналіз прикладів його застосування в Україні та країнах ЄС, а також визначення потенціалу цього матеріалу як елемента екологічно орієнтованих рішень і природоорієнтованих технологій.

Методи дослідження: міждисциплінарний підхід, порівняльний аналіз, геоекологічний та біотехнологічний аналіз, використання геоінформаційних джерел.

Виклад основного матеріалу. Базальтовий туф за кордоном досить активно застосовується в екологічних технологіях, особливо в захисті та відновленні ґрунту. Насамперед, для рекультивації забруднених і деградованих земель. Сорбційна активність базальтового туфу дає змогу зв'язувати важкі метали та інші токсиканти в ґрунтах. Застосовується під час рекультивації шахтних відвалів, промислових зон, звалищ. У поєднанні з компостом/біогумусом покращує структуру і родючість ґрунту. У нашій країні та Польщі проводилися досліді з внесення базальтового туфу на забруднені ділянки, що знижувало рухливість важких металів на 30-60%. Знижує кислотність ґрунту, діючи як природний меліорант, покращує аерацію і водоутримувальну здатність ґрунту, сприяє розвитку корисної мікрофлори і мікоризних грибів.

Ефективний як компонент геотехнічних бар'єрів на полігонах відходів, бо вбудовується в шари між ґрунтом і джерелом забруднення, запобігаючи міграції токсикантів. Мелений базальтовий туф застосовують як мінеральну підгодівлю, бо повільно вивільняє мікроелементи, знижує потребу в хімічних добривах, при цьому безпечний для ґрунтових організмів. У цьому контексті його можливо використовувати в органічному землеробстві. Базальтовий туф є вулканогенно-осадовою гірською породою, що виникла внаслідок інтенсивної взаємодії лавових потоків із водними масами. Цей процес супроводжувався різким охолодженням, спінюванням та фрагментацією лавового матеріалу, що призвело до формування пористої структури з домішками гідроокислів і мінеральних залишків. Згідно з [1], він має низьку щільність, високу пористість та хімічну інертність, що робить його придатним до застосування у фільтраційних і сорбційних системах.

Запаси базальтових туфів на території України за оцінками екологів сягають 1 млрд. т. [8]. Це зафіксовано переважно на території Житомирської області (зокрема Овруцький район), що підтверджується геологічними картами на сайті Geodag.info. Вік цих формацій сягає понад 1,8 млрд років, що робить їх одними з найдавніших у Східній Європі. Українські поклади, зокрема в Рівненській області, активно досліджуються як джерело техногенно чистої сировини [2]. До найважливіших властивостей базальтового туфу належать:

Пористість (30–50%) – забезпечує високу сорбційну здатність;

Мала густина (1,3-1,5 г/см³) – дозволяє використовувати його як легкий будівельний та дренажний матеріал;

хімічна інертність – туф не виділяє токсичних сполук, не взаємодіє з кислотами й лугами;

механічна міцність – підходить для навантажених конструкцій;

термостійкість і морозостійкість – забезпечують довговічність експлуатації.

Завдяки цим властивостям базальтовий туф розглядається як природна альтернатива активованому вугіллю, перлітам, синтетичним сорбентам і гравію у різноманітних технологіях екологічного захисту. Базальтовий туф широко застосовується у біофільтрах та штучних водно-рослинних системах для доочищення стічних вод. Його структура створює оптимальні умови для адсорбції важких металів (Pb, Zn, Cu), амонію, фосфатів і органіки. Крім того, на його поверхні активно розвивається мікробіота, що каталізує біологічні процеси очищення.

У проєктах ЄС, таких як LIFE MINERAL CIRCLE, туфи досліджуються як компонент пасивних фільтрувальних бар'єрів [9]. Дослідження в Чехії та Польщі доводять здатність базальтового туфу поглинати до 95% важких металів у стічних водах [10].

Додавання туфу до деградованих ґрунтів покращує їх водно-фізичні властивості, сприяє зниженню кислотності та накопиченню мікроелементів. У поєднанні з фіторе mediaційними культурами він може виступати носієм мікродобрив або як середовище для мікробіологічної ремедіації. Такім чином, у суміші з органічними добривами базальтовий туф покращує структуру ґрунту, підвищує буферність та затримує забруднювачі. Це важливо для рекультивації територій поблизу гірничодобувних підприємств.

Базальтовий туф використовується як дренажний та теплоізоляційний матеріал у екодомах, системах «зелених дахів» та урбаністичних дренажних інфраструктурах (SUDS). Завдяки легкості й пористості він дозволяє зменшити навантаження на будівлі, затримує дощову воду й очищає її. Застосування базальтового туфу як добавки до цементу дозволяє зменшити вуглецевий слід. За даними European Raw Materials Alliance, туф використовується для створення CO₂-нейтральних бетонів [11].

Згідно з доповіддю Європейського екологічного агентства, природні мінеральні матеріали розглядаються як ключові у розробці Nature-Based Solutions [10]. Базальтовий туф є прикладом ресурсу, що відповідає як екологічним, так і економічним критеріям сталого розвитку. У країнах ЄС базальтові туфи застосовуються також у зелено-архітектурних рішеннях, наприклад, для облаштування водозатримувальних зелених дахів та міських фільтраційних зон. У рамках ініціатив European Raw Materials Alliance, базальтові туфи вивчаються як вторинна сировина для екологічно чистих будматеріалів і заміни цементу в CO₂-нейтральному будівництві [11].

Використання базальтового туфу також ефективно як функціональної добавки у процесі компостування органічних відходів. Завдяки своїм фізико-хімічним та мікробіологічним властивостям базальтовий туф позитивно впливає на ключові параметри компостування, сприяючи підвищенню ефективності процесу та якості отриманого компосту.

По-перше, базальтовий туф має високу пористість і питому поверхню, що забезпечує поліпшену аерацію компостної маси. Наявність дрібнодисперсної фракції розміром до 5 мм дозволяє ефективно інтегрувати туф у субстрат і забезпечити кращий доступ кисню до мікроорганізмів, що беруть участь в аеробному розкладанні органічної речовини.

По-друге, туф виступає як природний сорбент летких сполук, зокрема аміаку, сірководню та інших речовин, що викликають неприємні запахи. Його використання дозволяє знизити емісію шкідливих газів під час компостування, що має суттєве значення з екологічного погляду.

По-третє, мінеральний склад базальтового туфу (зокрема наявність Fe, Mg, Ca, K, P і Si) слугує додатковим джерелом мікроелементів, необхідних для розвитку корисної мікрофлори. Дослідження показують, що введення туфу у компостну масу у концентраціях 3–10% від об'єму сприяє підвищенню мікробіологічної активності та пришвидшенню процесу розкладання.

Крім того, базальтовий туф виконує буферну функцію, стабілізуючи pH середовища та запобігаючи різким кислотним або лужним зсувам, які можуть пригнічувати діяльність мікроорганізмів. Як наслідок, утворюється компост з покращеними агрохімічними характеристиками, підвищеною вологомісткістю та стійкою структурою.

В умовах України потенціал використання базальтового туфу для потреб екологічної утилізації органічних відходів набуває особливої актуальності. Як засвідчено на сайті Geodar.info, родовища базальтового туфу присутні у декількох регіонах, що відкриває можливості для створення локальних технологій замкнутого циклу з використанням природної сировини.

У системі циркулярної економіки, базальтовий туф має низку переваг:

місцеве походження – знижує логістичні витрати й вуглецевий слід;

повторне використання – після регенерації його можна повторно застосовувати в системах фільтрації або як дорожній матеріал;

мінімальна енергоємність обробки – видобуток і підготовка не потребують складних технологічних циклів.

Таким чином, цей матеріал повністю відповідає принципам «еко-дизайну», «zero waste» та «nature-based solutions». Важливо підкреслити значення геологічної спадщини не лише як об'єкта туризму, а й як потенційного ресурсу екотехнологій. На сайті Geodar.info базальтовий туф розглядається як геологічна пам'ятка з науковим, освітнім і практичним значенням. Інтеграція таких об'єктів у програми освіти, науки та екологічного інжинірингу створює передумови для синергії між геологією, технологіями та екологією.

Висновки. Базальтовий туф є перспективним природним матеріалом для впровадження у технології захисту довкілля, зокрема у сферах водоочищення, рекультивації ґрунтів, екобудівництва. Його широке застосування може сприяти зниженню антропогенного навантаження, розвитку локальної геоekonomіки та реалізації цілей сталого розвитку.

Базальтовий туф є ефективним природним матеріалом для: сорбції важких металів; відновлення деградованих земель; поліпшення агрохімічних властивостей ґрунтів; створення природних бар'єрів проти міграції забруднень.

Його застосування активно вивчається та впроваджується в Україні, Німеччині, Чехії, Польщі, Італії, Японії. Наукові підходи до його вивчення потребують міждисциплінарної інтеграції, зокрема в галузі геоeкології, біотехнологій, хімії довкілля та геоінформаційних систем.

Базальтовий туф має значний потенціал для екологічно орієнтованих технологій. Його впровадження може сприяти досягненню цілей Європейського зеленого курсу, розвитку циркулярної економіки та зміцненню екологічної безпеки в Україні.

Застосування базальтового туфу як функціональної добавки у процесі компостування сприяє підвищенню екологічної ефективності та економічної доцільності технологій управління органічними відходами.

Список використаних джерел:

1. Merta, M., & Zajac, B. (2019). Application of volcanic tuff as reactive material in permeable reactive barriers. *Environmental Geotechnics*, 6(1), 50–59. URL: <https://doi.org/10.1680/jenge.17.00048>
2. Heoinformatsiyna platforma [Geoinformation platform] URL: Geodar. info - <https://geodar.info>
3. Muller-Soykher, K. et al. (2012). Application of volcanic tuff for soil amendment in contaminated agricultural land. *Environmental Earth Sciences*, 65(4), 1239-1248.
4. Pašek, J. et al. (2017). Volcanic tuff as a natural mineral fertilizer in organic farming. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 17(3), 543-550.
5. Kondratyuk, Yu. V., Savchuk, L. O. (2021). Zastosuvannya mineraliv vulkanichnoho pokhodzhennya u tekhnolohiyakh rekul'tyvatsiyi gruntiv [Application of minerals of volcanic origin in soil remediation technologies] *Ecological Safety and Nature Management*. №2 (34), с. 46–51. [in Ukrainian].
6. Melnychuk, M. M., Kovalchuk, I. P. (2019). The influence of volcanic rocks on the ecological stability of degraded soils/ *Bulletin of Agricultural Science*, No.3, с. 34–39. [in Ukrainian].
7. Ukrainian Research Institute of Environmental Problems (UNRIEP). Research Report No. 141/2020. [in Ukrainian].
8. Sorption properties of basalt tuff and the possibility of its use in agriculture. URL: <https://www.agroone.info/agronews/sorbcijni-vlastivosti-bazaltovogo-tufu-ta-mozhlivist-jogo-vikoristannja-u-silskomu-gospodarstvi/> [in Ukrainian].
9. European Commission (2021). Horizon 2020 Project: LIFE MINERAL CIRCLE. URL: <https://cordis.europa.eu/project/id/LIFE17/ENV/IT/000324>
10. European Environment Agency (EEA). (2021). Nature-based solutions in Europe. URL: <https://www.eea.europa.eu/publications/nature-based-solutions>
11. European Raw Materials Alliance (ERMA). (2020). Raw materials for a sustainable and green Europe. URL: <https://erma.eu/>

ГІС-ТЕХНОЛОГІЇ ЯК ЕФЕКТИВНИЙ ІНСТРУМЕНТ УПРАВЛІННЯ ТА КОНТРОЛЮ СТАНУ ПИТНОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ УРБООКОСИСТЕМ

Павло Старжинський, аспірант¹,

Ігор Прокопенко, аспірант¹,

Олена Жукова, к.т.н, доцент¹ (ORCID: 0000-0003-0662-9996),

¹Київський національний університет будівництва та архітектури, м. Київ, пр-т Повітряних Сил, 31, 03037, Україна

АНОТАЦІЯ. Питання управління, використання та охорони водних ресурсів є ключовим для забезпечення питного водопостачання урбоекосистем, особливо в умовах антропогенного впливу та кліматичних змін. У роботі проаналізовано проблеми оцінки якісних і кількісних параметрів водних об'єктів на прикладі річки Дніпро, яка є основним джерелом водопостачання в Україні (Hilschewski, 2022). Запропоновано інтегрований підхід до оцінки якості води, що базується на критеріях трансформації забруднюючих речовин, здатності водного середовища до самоочищення та біогенного навантаження. Особливу увагу приділено застосуванню ГІС-технологій для моніторингу, моделювання гідрологічних і гідрохімічних процесів та розробки заходів з охорони водних ресурсів (Мкртчян, 2003). ГІС-технології дозволяють підвищити точність оцінок, оптимізувати управління річковими басейнами та забезпечити екологічну безпеку урбоекосистем, що є ключовим для сталого розвитку регіонів.

Ключові слова: водопостачання; урбоекосистеми; ГІС-технології; екологічна безпека; річковий басейн; управління водними ресурсами

Вступ. Доступ до безпечної питної води є передумовою для підтримки життя та сталого розвитку урбоекосистем. В Україні, де 75% систем водопостачання залежать від поверхневих джерел, стан водних ресурсів погіршується через забруднення, неефективне водокористування та сучасні виклики, такі як кліматичні зміни та наслідки війни, зокрема руйнування Каховської ГЕС у 2023 році (EUWI+, 2023). ГІС-технології стають ефективним інструментом для аналізу,

прогнозування стану водних об'єктів, особливо в урбанізованих регіонах, таких як Київ, де попит на воду зростає через урбанізацію (Тев'яшев et al., 2017).

Аналіз літературних джерел. Проблеми управління водними ресурсами досліджували Г. Красовський, Ю. Лебединський, С. Левківський, В. Сахаєв, В. Сташук, В. Степанов, В. Хільчевський, А. Яцик та інші, які пропонували вдосконалення механізмів водокористування (Хільчевський, 2020, цит. за Hilschewski, 2022). Застосування ГІС-технологій для моніторингу водних ресурсів розглядали Є. Анпілова, О. Трофімчук, а також міжнародні дослідники (*Water Resources Management, Journal of Hydrology*) (Мкртчян, 2003). Ці роботи підкреслюють ефективність ГІС у створенні баз даних, моделюванні гідрологічних процесів і прогнозуванні екологічних ризиків. Однак бракує прикладів їх застосування в урбоєкосистемах України за умов воєнних викликів.

Мета роботи. Дослідження можливості застосування ГІС-технологій для оцінки стану водних ресурсів, що використовуються для питного водопостачання урбоєкосистем, з урахуванням воєнних і кліматичних факторів. Розробка рекомендації щодо використання індексів якості води (наприклад, WQI) та моделей для оперативного прийняття управлінських рішень, спрямованих на покращення екологічного стану річкових басейнів.

Виклад основного матеріалу. ГІС-технології інтегрують гідрологічні, гідрохімічні та геологічні дані для створення динамічних карт і моделювання водних процесів (Тев'яшев et al., 2017). У басейні річки Дніпро вони застосовуються для:

- Моніторингу якості води: аналіз даних із супутників Landsat, Sentinel та програм ArcGIS дозволяє відстежувати концентрацію забруднюючих речовин нітратів, фосфатів і важких металів (EUWI+, 2023).
- Оцінки гідрологічних процесів: моделювання сезонних коливань рівня води та паводкових ризиків.
- Виявлення джерел забруднення: ідентифікація скидів стоків у містах та промислових зонах.
- Планування заходів: визначення зон для створення буферних смуг чи водно-болотних угідь.

Загальні прогнозні ресурси підземних вод України становлять 61 689,2 тис. м³/добу, з яких тільки 57 458,1 тис. м³/добу придатні для питного водопостачання (EUWI+, 2021). Розподіл прогнозних ресурсів підземних вод по регіонах є нерівномірним, а саме: Чернігівська область має 8 326,7 тис. м³/добу, тоді як південні регіони обмежені (наприклад, Миколаївська – 441,6 тис. м³/добу). У 2023 році експлуатаційні запаси підземних вод зменшилися на 109,985 тис. м³/добу, що підкреслює потребу в раціональному водокористуванні (Hilschewski, 2022).

Приклади застосування:

1. У рамках проєкту EUWI+ (2021–2023) створено ГІС-базу для моніторингу басейну Дніпра, яка виявила критичні зони забруднення в Канівському та Кременчуцькому водосховищах. Використання ArcGIS дозволило розробити рекомендації щодо модернізації очисних споруд у містах.
2. Після підриву дамби в селі Демидів (25 лютого 2022 року) на річці Ірпінь, що спричинив паводок і затоплення територій Київської області, для оцінки масштабів затоплення та аналізу гідрологічних змін у річках Дніпро та Ірпінь, були застосовані інструменти ГІС. Рис.1 та Рис.2 наочно ілюструють як за допомогою супутникових даних Sentinel-2 європейської космічної місії Copernicus було створено карту зони затоплення. Рис.1 відображає стан р. Ірпінь до події. Рис.2 показує розширення водної поверхні на 30% у районах Горностайполя та Семипілок (Copernicus Open Access Hub, 2022).

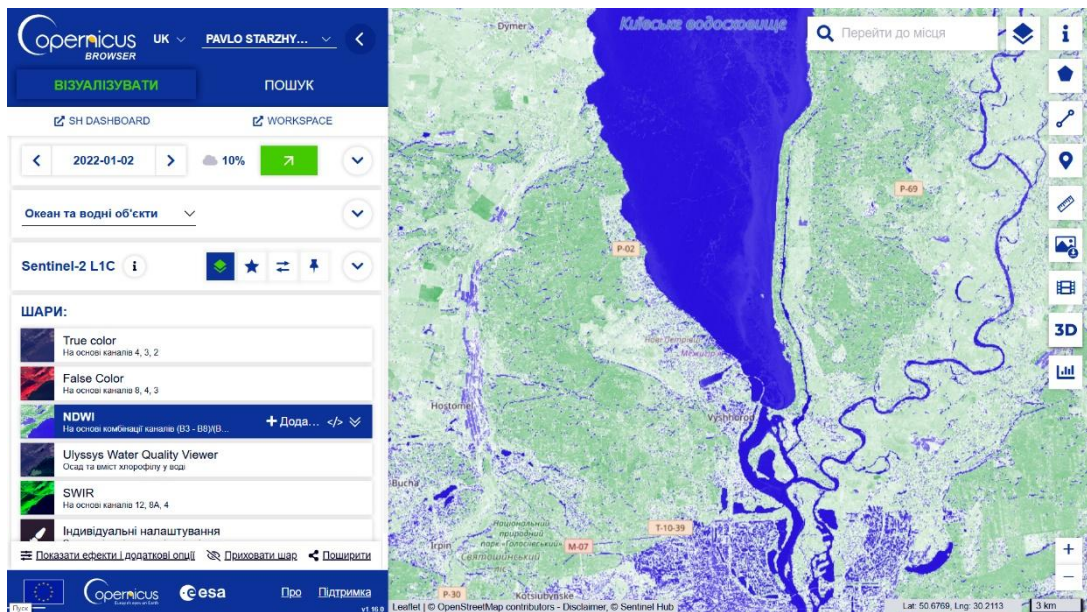


Рис.1 Карта до затоплення, 02.01.2022 (NDWI, Sentinel-2)

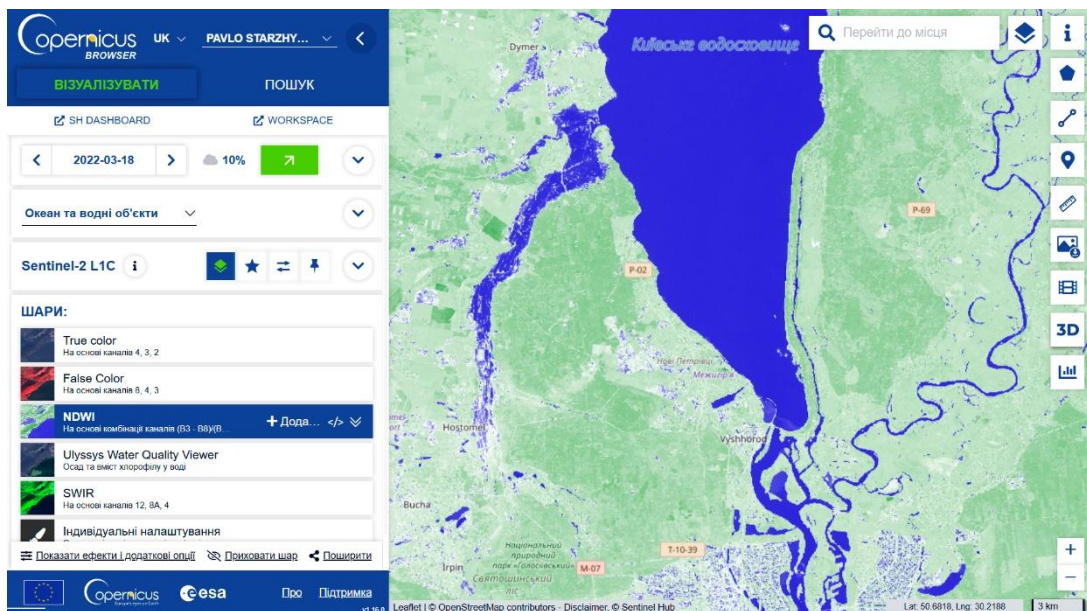


Рис.2. Карта після затоплення, 18.03.2022 (NDWI, Sentinel-2)

Важливість гіс-технологій для оцінки річок. ГІС-технології є незамінними для оцінки стану річкових басейнів, зокрема Дніпра, що забезпечує водою мільйони українців (Мкртчян, 2003). Їх головні переваги:

- Динамічний моніторинг: створення карт розподілу забруднень у реальному часі (наприклад, завислих речовин та вміст хлорофілу в воді) за даними із супутників Landsat чи Sentinel (див. Рис.3)

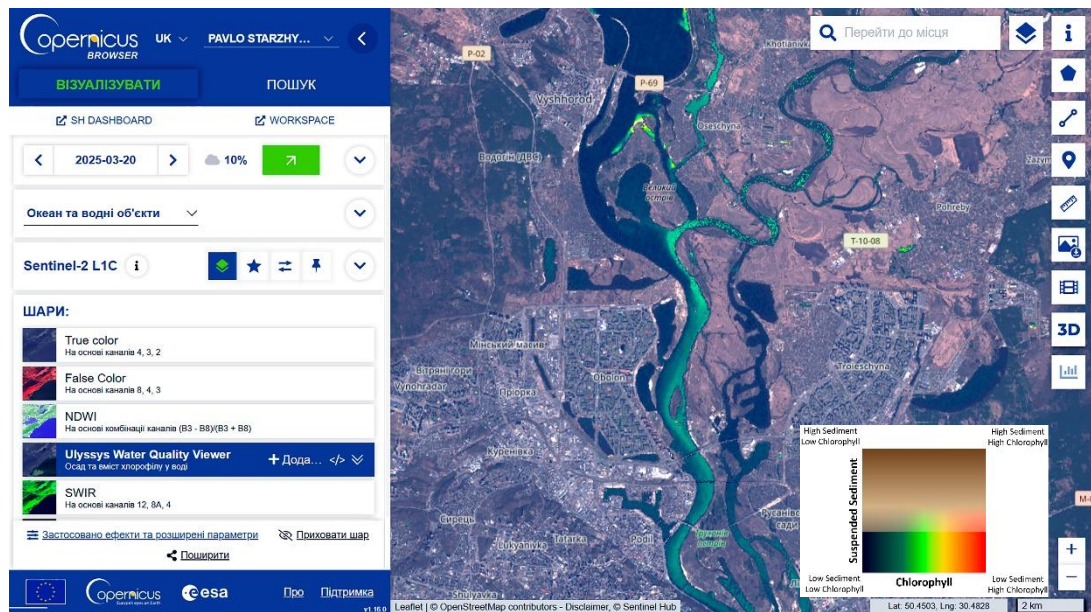


Рис.3. Розподіл хлорофілу та завислих речовин у Дніпрі, Київ, 2025 (UWQV, Sentinel-2)

- Прогнозування ризиків: моделювання паводків і посух на основі кліматичних моделей (Hilschewski, 2022).
- Виявлення антропогенного впливу: локалізація скидів стоків та оцінка їх впливу на якість води. Наприклад, ГІС-аналіз показав, що 30% забруднення Дніпра в районі Києва пов'язане з побутовими стоками, та результатами воєнних дій РФ, наслідком яких став масштабний паводок на р. Ірпін.
- Інтеграція з урбоекосистемами: оцінка впливу урбанізації на водозбірні площі та планування інфраструктури водопостачання.
- Підтримка природоохоронних заходів: визначення оптимальних місць для відновлення екосистем (наприклад, створення штучних водно-болотних угідь).

У 2023 році ГІС-аналіз у басейні Дніпра виявив зони підвищеного біогенного навантаження в районі Кременчука, що дозволило розробити план рекультивації прибережних зон (EUWI+, 2023).

Висновки. ГІС-технології є потужним інструментом для управління водними ресурсами урбоекосистем, забезпечуючи інтеграцію даних, точний моніторинг і прогнозування (Тев'яшев et al., 2017). Вони дозволяють виявляти та локалізувати джерела забруднення річок; моделювати гідрологічні процеси для прогнозування ризиків; розробляти науково обґрунтовані стратегії сталого водокористування; а також враховувати сучасні виклики, такі як кліматичні зміни та наслідки війни (руйнування Каховської ГЕС).

Використання ГІС у басейні Дніпра сприяє підвищенню екологічної безпеки, оптимізації водопостачання міст і збереженню водних ресурсів для майбутніх поколінь.

Список використаних джерел:

1. EUWI+. (2021). *План розвитку моніторингу підземних вод в Україні*. European Union Water Initiative Plus. <https://euwipluseast.eu/en/>
2. EUWI+. (2023). *Моніторинг басейну річки Дніпро на основі ГІС: Звіт про проєкт*. European Union Water Initiative Plus. <https://euwipluseast.eu/en/>
3. Hilschewski, V. K. (2022). Water quality assessment in Ukraine: Current state and challenges. *Journal of Hydrology*, 610, 127–135. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127>
4. Мкртчян, О. С. (2003). Моделювання басейнових систем у базі даних ГІС [Modeling of basin systems in the GIS database]. *Наукові праці УкрНДГМІ*, 251, 45–53.
5. Тев'яшев, А. Д., Ткаченко, В. П., & Губат, М. І. (2017). *Геоінформаційні системи: Вступний курс*. Харківський національний університет радіоелектроніки.

APPLICATION OF SATELLITE MONITORING TECHNOLOGY TO PROVIDE MANAGEMENT MECHANISMS FOR ENVIRONMENTAL CONTROL IN UKRAINE

Dmytro Todchuk, director of Budget Institution "National Center for GHG Emission Inventory"¹ (ORCID: 0009-0006-4672-9368)

Alexander Apostolov, candidate of geological sciences, senior researcher at the Scientific Centre for Aerospace Research of the Earth of the IGS of the NAS of Ukraine² (ORCID: 0000-0003-3470-7613)

Igor Onopchuk, deputy director of Budget Institution "National Center for GHG Emission Inventory"¹ (ORCID: 0009-0005-0735-4594)

Lesya Yelistratova, senior researcher, candidate of geographical sciences, head of department Scientific Centre for Aerospace Research of the Earth of the IGS of the NAS of Ukraine² (ORCID: 0000-0002-7823-5841)

¹Budget Institution "National Center for GHG Emission Inventory", Vasyl Lypkivskoho Str., 35, Kyiv, 03035, Ukraine

²Scientific Centre for Aerospace Research of the Earth of the IGS of the NAS of Ukraine, Olesia Honchara Str., 55-b, Kyiv, 01054, Ukraine

ABSTRACT. *The paper considers the application of remote sensing data, which plays a significant role in ensuring management mechanisms in environmental issues. The relevance of integrating satellite technology into environmental research is revealed using the example of a study of forest cuttings. A conceptual basis for using satellite data is developed, and methodological approaches to assessing the state of the natural environment of Ukraine are proposed. Examples of the results obtained are also given, namely, monitoring the state of forest stands is shown using the example of cuttings, and the consequences of the impact on the processes of the carbon cycle in the atmosphere are analyzed accordingly. Only from a small local area of 0.13 km², the lack of absorption of CO₂ from the atmosphere amounted to 0.4 - 2 tCO₂. Conclusions are drawn based on the proposed study on the application of satellite technology for making management decisions regarding the protection of the natural environment.*

Key words: *satellite technology; remote sensing data; natural environment; cuttings; management decisions*

Introduction. Satellite Earth observation technologies are an innovative method of environmental monitoring and control over the natural environment. Satellite observations allow us to identify large sources of pollutant emissions, deforestation, fires, and other negative processes in the natural environment, to monitor greenhouse gas emissions. There is a significant number of works on the use of satellite data, which highlight the results of inventory, monitoring, and understanding of natural and artificial ecosystems of the Earth [1-4]. In Ukraine, aerospace monitoring is also widely used for studying the natural environment [5-6]. The authors of [7] applied satellite agroecological monitoring in the system of sustainable environmental management. The results of environmental monitoring during military operations in Ukraine using satellite information are given in the works [8].

The next stage of development will be an increase in the number of satellites, which will mean wider access to timely, accurate, and cost-effective information.

The purpose of the work is to develop a conceptual framework for the implementation of satellite monitoring to ensure management mechanisms for controlling the natural environment of Ukraine.

Presentation of the main material. A conceptual framework has been developed for the implementation of satellite monitoring technology for environmental assessment to ensure management control mechanisms. The use of satellite technology allows for the acquisition, accumulation, analysis, and processing of spatial data, modeling processes, visualization of data, results of models and processes, and provision of recommendations. The conceptual framework of the technology is shown in Fig. 1.

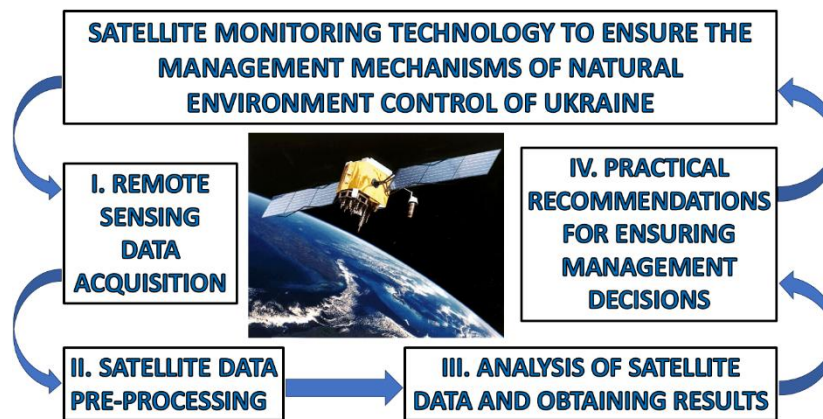


Fig. 1. Using satellite monitoring technology to control the natural environment of Ukraine

The technology consists of 4 stages. First stage: satellite data is obtained, usually using the worldwide Internet. Since the volumes of information received from the network can be up to 100 GB, it is necessary to have both a place to store such information and the ability of the equipment to ensure a high speed of information transmission. The second stage is characterized by preliminary work with the received data. It is necessary to bring all the input data to one coordinate system to improve the image quality, perform radiometric correction of the received satellite data, etc. For this, programs for processing satellite images, Erdas Imagine, ENVI, etc., are used. This stage ends with the formation of a database in the geographic information system of all the input information, both satellite and ground-based. In the third stage, using classification methods, analysis of changes in the values of indicative indicators, and other approaches, satellite images are analyzed to solve the problems of monitoring the state of the natural environment. The result of this stage is maps of changes in the state of the natural environment with clear spatial coordinates and boundaries of areas that have changed. In the fourth stage, based on the results obtained, a recommendation is made to the relevant governing bodies.

The practical application of the proposed control technology (using data from the WordView-2 satellite) for the state of forest stands (using the example of cutting) is shown in Fig. 2. The corresponding negative consequence of the cutting process is also considered.

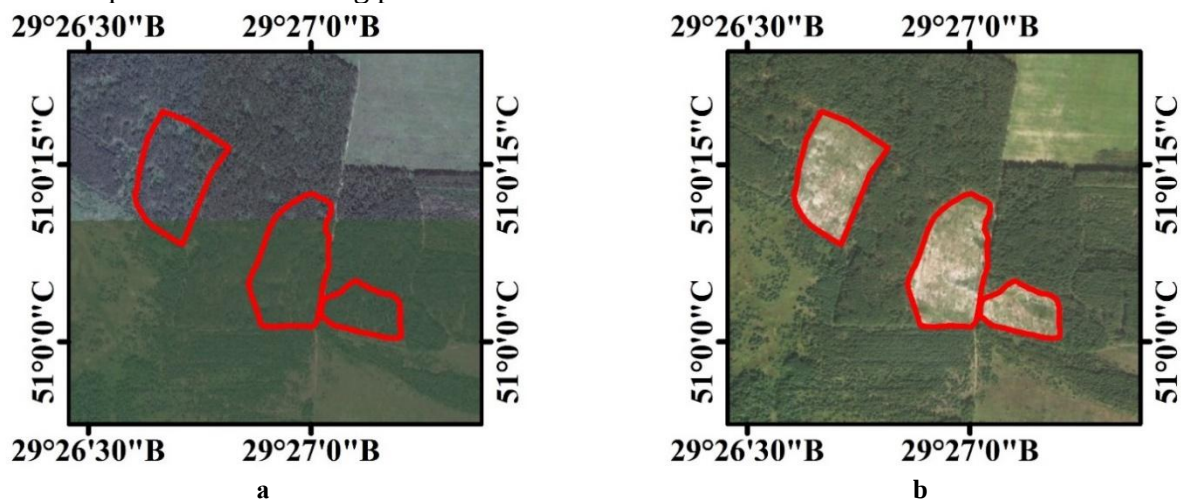


Fig. 2. An example of using satellite monitoring technology to detect cuttings in Ukraine. The state of the study area: a) in 2016, b) in 2017

Fig. 2 shows an example of using technology to monitor the state of the country's forest fund at the *local* level using satellites with ultra-high spatial resolution. According to data from the WorldView-2 satellite, spatial resolution up to 2 meters, the boundaries of the 3rd forest areas that were cut down with a total area of 0.13 km² as of 2017 have been established in the Zhytomyr region. In addition to establishing the area of cutting, it is possible to assess this impact on the processes of removals of CO₂ from the atmosphere. As is known, forests are the lungs of the planet, so let's calculate the impact of deforestation on the processes of carbon cycling in the atmosphere. For these 3 areas, it was established that the net

absorption of CO₂ per year was 0.05 - 0.25 tCO₂. Thus, over the 8 years that have passed since the cutting of forests in these local areas, the shortfall in CO₂ removals from the atmosphere amounted to 0.4 - 2 tCO₂.

This result can be used by regulatory bodies responsible for the state of forestry and environmental protection and for decision-making to develop a forestry management strategy, as well as to assess the impact of illegal human activities on the environment, i.e., ensuring legal protection of the environment. In addition, this technology allows us to observe individual territories where the practice of environmental crimes has historically developed (illegal cutting, landfills of household waste, etc.), that is the technology allows you to register activities that cause damage.

Conclusions.

The use of satellite technology to control the natural environment can be used as an alternative measure of monitoring the natural environment and collecting evidence of its violations. In turn, this will allow for the effective use of budget funds and staff involved in control and management decisions by responding to information obtained using satellite technology.

References

1. Ncube, M.M., Ngulube, P. (2024). Enhancing environmental decision-making: a systematic review of data analytics applications in monitoring and management. *Discover Sustainability*. 5(290). <https://doi.org/10.1007/s43621-024-00510-0>
2. Peter, N. (2004). The use of remote sensing to support the application of multilateral environmental agreements. *Space Policy*, 20(3), 189–195. <https://doi.org/10.1016/j.spacepol.2004.06.005>
3. Pavlovic, M., Ilic, S., Antonic, N., & Culibrk, D. (2022). Monitoring the Impact of Large Transport Infrastructure on Land Use and Environment Using Deep Learning and Satellite Imagery. *Remote Sensing*, 14(10), 2494. <https://doi.org/10.3390/rs14102494>
4. Atesoglu, A., Ozel, H. B., Varol, T., Cetin, M., Baysal, B. U., & Bulut, F. S. (2025). Monitoring Land Cover/Use conversions in Türkiye wetlands using collect Earth. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*. <https://doi.org/10.1007/s12524-024-02111-w>
5. Eiter, S., Fjellstad, W., Puschmann, O., & Krøgli, S. O. (2019). Long-Term Monitoring of Protected Cultural Heritage Environments in Norway: Development of Methods and First-Time Application. *Land*, 8(5), 75. <https://doi.org/10.3390/land8050075>
6. Apostolov, A., Yelistratova, L., Todchuk, D., Onopchuk, I. (2024). *Dynamics assessment of changes in forest cover area on the Ukraine territory in the 21th century based on satellite data*. Proceedings of the 24th International Multidisciplinary Scientific GeoConference: Water Resources. Forest, Marine and Ocean Ecosystems, SGEM 2024. Vienna. 27 - 30 November, 24(3.2), 269 – 276. <https://doi.org/10.5593/sgem2024v3.2/s13.33>
7. Tarariko, O., Iliencko, T., Kuchma, T., & Novakovska, I. (2019). Satellite agroecological monitoring within the system of sustainable environmental management. *Agricultural Science and Practice*, 6(1), 18-27. <https://doi.org/10.15407/agrisp6.01.018>
8. Yelistratova, L., Apostolov, A., Lyalko, V., Tomchenko, O., Khyzhniak, A., Hodorovsky, A. (2022). The results of socio-ecological monitoring during military operations in Ukraine using satellite information. *Rev. Roum. Géogr./Rom. Journ. Geogr.*, 66(2), 117–136. http://www.rjgeo.ro/issues/revue_roumaine_66_2/yelistratova%20et%20al..pdf

**MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE
KYIV NATIONAL UNIVERSITY OF CONSTRUCTION AND
ARCHITECTURE
ACADEMY OF CONSTRUCTION OF UKRAINE
STATE ENTERPRISE “STATE RESEARCH INSTITUTE OF
BUILDING CONSTRUCTIONS”
UKRAINIAN COUNCIL OF CIVIL ENGINEERS
CONSTRUCTION CHAMBER OF UKRAINE**



**Conference proceedings
of
VI International scientific-practical conference
«ENERGY-SAVING MACHINES AND
TECHNOLOGIES»**

Dedicated to the 95th Anniversary of KNUCA's Founding

20-21.05.2025

Kyiv 2025