



ТЕЗИ ДОПОВІДЕЙ

ТРИДЦЯТЬ ШОСТОЇ ВСЕУКРАЇНСЬКОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ

«НОВІ ТЕХНОЛОГІЇ В МАШИНОБУДУВАННІ»

2 - 4 вересня 2026 р.



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний аерокосмічний університет
«Харківський авіаційний інститут»

Акціонерне товариство «ФЕД»

Державне підприємство «ІВЧЕНКО-ПРОГРЕС»

Державне підприємство «Харківське агрегатне конструкторське бюро»

ТЕЗИ ДОПОВІДЕЙ

ТРИДЦЯТЬ ШОСТОЇ ВСЕУКРАЇНСЬКОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ

«НОВІ ТЕХНОЛОГІЇ В МАШИНОБУДУВАННІ»

2 – 4 вересня 2026 р.

Харків «ХАІ» 2026

Рекомендовано до друку рішенням Вченої ради Національного аерокосмічного університету
«Харківський авіаційний інститут» (протокол № 3 від 23.09.2026)

Нові технології в машинобудуванні [Текст]: тези доп. Тридцять шостої
Н73 Всеукр. конф. 2–4 верес. 2026 р. – Харків : Нац. аерокосм. ун-т
«Харків. авіац. ін-т», 2026. – 240 с.

ISBN 978-966-662-995-4

Матеріали доповідей Всеукраїнської конференції містять результати досліджень за такими напрямками: загальні питання машинобудування; сучасні технології проектування, виготовлення й зміцнення деталей агрегатів та різального інструменту; процеси автоматизації та роботизації; функціональні комплекси логістичних систем; питання проектування роботів; технології обладнання з ЧПК; процеси фізико-технічної обробки та нанотехнології; системи автоматичного керування і діагностики; інноваційні інформаційні технології.

Для здобувачів освіти, викладачів і наукових працівників.

Програмний комітет конференції

Голова: Литвинов О. М. – д-р юрид. наук, професор, ректор ХАІ.

Заступник голови: Баранов О. О. – д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій Харківського національного університету міського господарства ім. О. М. Бекетова.

Відповідальний секретар: Сисоєв Ю. О. – д-р техн. наук, професор кафедри теоретичної механіки, машинознавства та роботомеханічних систем ХАІ.

Члени комітету:

Кравченко І. Ф. – д-р техн. наук, професор, член-кореспондент НАН України, генеральний конструктор - директор ДП «Івченко-Прогрес»;

Попов В. В. – д-р техн. наук, голова правління АТ «ФЕД»;

Бобирь М. І. – д-р техн. наук, професор, член-кореспондент НАН України, директор механіко-машинобудівного інституту «КПІ ім. Ігоря Сікорського»;

Широкий Ю. В. – канд. техн. наук, декан факультету авіаційних двигунів ХАІ;

Клименко С. А. – д-р техн. наук, професор, професор Інституту надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля, член-кореспондент Національної академії наук України;

Пермяков О. А. – д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів ХПІ;

Федорович О. Є. – д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри комп'ютерних наук та інформаційних технологій ХАІ;

Планковський С. І. – д-р техн. наук, професор, директор Навчально-наукового інституту енергетичної, інформаційної та транспортної інфраструктури Харківського національного університету міського господарства ім. О. М. Бекетова;

Добротворський С. С. – д-р техн. наук, професор Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Україна, Познанського університету природничих наук, Польща;

Сметанкіна Н. В. – д-р техн. наук, професор, завідувач відділу вібраційних і термоміцнісних досліджень Інституту енергетичних машин і систем ім. А. М. Підгорного НАН України.

УДК 621.002:620.3:004.9(063)

© Національний аерокосмічний університет
«Харківський авіаційний інститут», 2026

ISBN 978-966-662-995-4

ЗМІСТ

1. ЗАГАЛЬНІ ПИТАННЯ МАШИНОБУДУВАННЯ.....	9
Богдан В.В., Лещенко Ю.О. Моделювання процесів технічного обслуговування автомобілів.....	9
Каграманян А.О., Аракелян Т.А. Критичний огляд нормативних вимог до вузлів опираючих котлів цистерн	12
Московська Н.М. Особливості використання чисельних методів при моделюванні НДС конструкцій зі скла за стандартом EN 1288-3.....	13
Onishchenko A.M., Semenenko O.D. Remote investigation of the chemical composition of the Martian surface using the ChemCam complex of the Curiosity rover.....	14
Рузайкін В.І., Лукашов І.М., Косенко О.В. Адіабатичні втрати тиску на тертя для однофазних та двофазних потоків у горизонтальних квадратних і прямокутних гладких каналах.....	16
Світличний С.П. Модель прогресуючого руйнування тканинного композиційного матеріалу	18
Шатохін В.М. Про моделювання динамічних процесів у вібраційних технологічних апаратах з асинхронним електроприводом.....	22
2. СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ ПРОЄКТУВАННЯ, ВИГОТОВЛЕННЯ Й ЗМІЦНЕННЯ ДЕТАЛЕЙ АГРЕГАТИВ ТА РІЗАЛЬНОГО ІНСТРУМЕНТУ	27
Zhexin W. Modelling of multi-stage local electrohydraulic loading of large-dimensional sheet parts	27
Гнисько О.М., Кузнецова А.В. Модель переміщення стружки інструментом при фрезеруванні профільних пазів.....	32
Дмитренко Д. Ю., Воронько В.В. Матеріалознавчі особливості проєктування потайних заклепкових з'єднань тонкостінних елементів з алюмінієвих сплавів.....	33
Костомаха Д.Є., Комбаров В.В. Параметричне моделювання несучої системи двокоординатного технологічного верстата.....	37
Кузнецова А.В., Гнисько О.М. Дослідження зношування двоопукло-ввігнутих зубців конічних передач.....	41
Малков І.В. Метод проєктування композитних елементів конструкцій літальних апаратів.....	42
Мінгалєєв А.М., Білецький І.В. Аналіз технологічних параметрів спірального формування труб великого діаметра з порожнистих термопластичних профілів.....	47
Мурадян Т.К., Мсаллам К.П., Перехрест Н.В. Параметричне моделювання у системах автоматизованого проєктування як засіб професійної підготовки інженерів.....	52
Нарижний О.Г., Тараненко М.Є., Косенко О.В. Електрогідравлічне штампування коробчастої деталі в матрицю	54

Нарижний О.Г., Торосян О.В. Моделювання і аналіз електрогідравлічної вільної роздачі трубчастої заготовки.....	58
Поліщук Д.В., Холодний Ю.Ф., Алтухов П.М. Застосування сучасних матеріалів у виробництві деталей автомобільних трансмісій	61
Сула М.П., Семененко О.Д., Рябенков І. О. Аналіз методів поверхневого пластичного деформування для підвищення втомної міцності деталей авіаційних двигунів.....	64
Труш В.С., Рівера Р.Р., Гасій О.Б. Зміцнення поверхневих шарів титанових деталей літальної та наземної техніки лісового господарства оксидуванням як засіб підвищення їх ресурсу.....	66
3. ПРОЦЕСИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ТА РОБОТИЗАЦІЇ	69
Добров А.В., Аксьонов Є.О. Автоматизована система контролю робочих параметрів транспортних засобів	69
Криживець Є.О., Комбаров В.В. Аналіз кінематичних параметрів автоматизованого намотування відводів склопластикових трубопроводів високого тиску	71
Малохвей М.О., Аксьонов Є.О. Автоматизація тестування програмного забезпечення мікроконтролерних систем.....	76
Піддубна Л.В., Масолітін О.О. Автоматизована технологія намотування склопластикових труб високого тиску	78
Малохвей М.О., Аксьонов Є.О. Автоматизація тестування програмного забезпечення мікроконтролерних систем.....	81
Робота М.В., Аніщенко А.І. Автоматизація бетононасоса для проведення відновлювальних робіт	83
Семененко Ю.О., Сорока А.С., Семененко О.Д. Підвищення енергоефективності житлової інфраструктури на базі екосистеми «Розумний дім»	85
Серокуров І.П., Яшина О.С. Виявлення дронів на зображеннях та відео з застосуванням комп'ютерного зору.....	87
Торосян О.Д., Торосян О.В. Інтеграція робототехніки та біотехнологій у сучасному виробництві.....	91
Федорович О.Є., Єлізева А.В., Єременко Н.В. Моделювання протидій від атакуючих дронів противника	93
Федорович О.Є., Попов І.Є., Діденко С.І. Моделювання використання дронів-імітаторів для проведення фальш-атак.....	94
Федорович О.Є., Попов А.В., Лещенко Ю.О. Моделювання послідовності дій щодо проведення повітряних військових місій з використанням дронів	95
Фомін О.В., Черкашин О.П., Безлуцький В.О. Ключові аспекти інтелектуальної технології контролю технічного стану автозчепних пристроїв залізничного транспорту	96
Шевченко М.А., Селютін Д.А. Експериментальне дослідження ефективності методу структурно-семантичного контролю створення програмного коду	99

Щербаков І.В., Яшина О.С. Інтелектуальний аналіз даних для прогнозування навантаження обчислювальної інфраструктури.....	102
--	-----

4. ФУНКЦІОНАЛЬНІ КОМПЛЕКСИ ЛОГІСТИЧНИХ СИСТЕМ НА ВИРОБНИЦТВІ.....106

Гомес Іглесіас О.О. Цифрові технології управління логістичними потоками машинобудівного підприємства	106
--	-----

Гриневич П.С., Яшина О.С. Застосування методів глибокого навчання для оптимізації поставок в складній логістичній системі	110
---	-----

Слізева А.В. Розробка моделі управління логістичними процесами виробничого підприємства	113
---	-----

Меняйлова Г.Є. Інтеграція виробничого та складського комплексів у логістичній системі машинобудівного підприємства	114
--	-----

Поліщук Д.В., Рудь Ю.Л. Функціональна інтеграція автомобільного транспорту в логістичну систему виробничого підприємства.....	117
---	-----

Рудь Ю.Л. Стратегії управління логістичними комплексами машинобудівного підприємства	120
--	-----

Федорович О.Є., Губка О.С., Малєєва Ю.А. Моделювання постачання комплектуючих в різномірному транспортному середовищі.....	124
--	-----

Федорович О.Є., Коновалова О.В., Пісклова Т.С. Моделювання вузьких місць логістики постачання виробництва високотехнологічної продукції	125
---	-----

Федорович О.Є., Малєєв Л.В., Федорович В.А. Моделювання впливу загроз на постачання комплектуючих для високотехнологічного виробництва.....	126
---	-----

Фомін О.В., Мамонтов В.В. Оптимізація параметрів завантаження вагона-платформи з контейнерами-цистернами для підвищення стійкості колісних пар у кривих малого радіуса	127
--	-----

Фомін О.В., Мартиненко В.І., Мартиненко Д.І. Визначення раціональних параметрів роботи суднового устаткування з урахуванням конструктивних особливостей вагонів-цистерн	132
---	-----

Харченко М.В. Проєктування функціональних комплексів логістичних систем у виробничих процесах машинобудування	134
---	-----

5. ПРОЄКТУВАННЯ РОБОТІВ.....138

Бабаєв В.В., Кулаєнко О.О. Багатокоординатний робот-маніпулятор на основі крокових двигунів	138
---	-----

Голуб А.О., Степаненко Д.Р. Моделювання мобільного робота з дистанційним керуванням	140
---	-----

Григоров К.О., Семененко О.Д. Екстремальна робототехніка: комплексні інженерні рішення для роботи в умовах іонізуючого випромінювання та агресивного водного середовища.....	142
--	-----

Левада Д.О., Степаненко Д.Р. Моделювання системи дистанційного контролю зусилля затиску захоплюючого пристрою маніпулятора	144
--	-----

Мажара В.А., Тененика С.А. Оптимізація структури роботизованих комплексів для багатомономенклатурного виробництва	147
6. ТЕХНОЛОГІЯ АГРЕГАТОБУДУВАННЯ	150
Бреус А.О., Малашта П.П., Головка С.Т. Розробка блоку узгодження сигналів для вакуумно-дугового двигуна супутника формату CubeSat.....	150
Василевський Д.В., Семененко О.Д. Аналіз основних компонентів газотурбінних двигунів та вимоги до них	152
Зенін Д.А., Саєнко Л.В. Удосконалення конструкції робочого органа віброгазобетонозмішувача для підвищення ефективності приготування газобетонної суміші	154
Ігнатенко М.О., Саєнко Л.В. Удосконалення технології вібропресування бетонних георешіток для підвищення ефективності виробництва	156
Назін В.І. Автомобіль з розширеними функціональними можливостями	158
Сафаров Р.Е., Саєнко Л.В. Удосконалення конструкції барабанно-валкового млина для механічної обробки шлакових сумішей у виробництві стінових блоків	161
Сорока А.С., Белявський О.В., Косенко О.В. Моделювання об'ємних втрат гідравлічного обладнання.....	163
Усік В.В., Кладова О.Ю., Косенко О.В. Порівняння кінематичних характеристик планетарних і диференціальних механізмів авіаційних редукторів	165
Чоломбисько Р.М., Блажко В.В. Моделювання процесу аеродинамічного розділення дрібнодисперсних сипких матеріалів	170
Шатохін В.М. Алгоритм діагностики зносу циліндро-поршневих пар насоса гідрооб'ємної передачі з кульковими поршнями.....	172
Шугай Є.М., Блажко В.В. Дослідження конструкцій центрифуг та режимів їх роботи при виробництві безнапірних залізобетонних труб.....	177
7. ПРОЦЕСИ ФІЗИКО-ТЕХНІЧНОЇ ОБРОБКИ ТА НАНОТЕХНОЛОГІЇ.....	179
Баранова Є.О., Бреус А.О. Концепція плазмово-асистованого одержання беззв'язувальних Ni–Fe–O-анодів на нікелевій сітці	179
Бреус А.О., Торосян О.В. Дослідження впливу острівкової фази розподілу зерен на формування якісних характеристик покриття.....	181
Даценко В.А., Шорінов О.В., Бондаренко О.В. Газодинамічне напилювання функціональних покриттів на деталі, виготовлені адитивними методами	183
Довженко О.В., Безпалов Д.І. Перспективні теплозахисні покриття на основі оксиду гафнію для авіаційних ГТД	184
Засід Є.С., Баранов О.О. Плазмове формування беззв'язувальних Cu–Ni–O-анодів для карбамід-асистованого одержання водню	186
Петренко В.В., Цегельник Є.В. Аналіз чинників стабільності міжелектродного зазору під час прецизійного електрохімічного оброблення.....	188

Пилипенко М.М., Янко Т.Б., Стаднік Ю.С. Електронно-променеве рафінування цирконію від кисню через субоксид Al_2O_3	193
Савченко Н.В., Шорінов О.В. Термодинамічне прогнозування фазоутворення в композиційних матеріалах системи Ni–Al–Ti отриманих методом холодного газодинамічного напилення.....	196
Семененко О.Д., Широкий Ю.В., Фесенко Є.І. Перспективні напрями дослідження можливостей отримання наноструктур.....	198
Сібільов А.І., Сисоєв Ю.О. Обґрунтування математичної моделі впливу концентрації хрому та ванадію в вакуумно-дугових покриттях на їх зносостійкість.....	200
Степаненко Д.Р., Баранова Є.О., Баранов О.О. Фізичні засади тискозалежного опису вольт-амперної характеристики планарного магнетронного розряду	202
Шорінов О.В., Білан Д. О. Підвищення зносостійкості деталей авіаційної техніки шляхом нанесення металокерамічних композиційних покриттів методом холодного газодинамічного напилення	204
8. СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ ВИРОБНИЦТВОМ.....	206
Sorokin M, Moiseev A. Hybrid method for smoothing noisy experimental data with B-splines	206
Довгань Д.І., Цегельник Є.В. Моделювання узгодженого поступального та обертального руху виконавчих органів верстата з ЧПК	209
Кулягін А.І. Інтеграція автономних ШІ-агентів у системи автоматичного управління технологічним обладнанням машинобудівного виробництва.....	213
Петров Є.О., Аніщенко А.І. Автоматизація технологічного обладнання для виробництва декоративних елементів мощення	216
Піддубна Л.В., Вишняков К.Ю. Підвищення точності та розширення функціоналу деревообробного устаткування з ЧПК	218
Протас Є.С., Белявський О.В., Косенко О.В. Аналогово-цифровий перетворювач на базі ПЛК	221
Худяков Є.О., Аніщенко А.І. Автоматизація комплексу обладнання для виробництва будівельної суміші з синтетичною фіброю	224
9. ІННОВАЦІЙНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ В ЕКОНОМІЦІ ПІДПРИЄМСТВА	226
Губка О.С., Губка С.О. Розробка навчальної системи вивчення архітектур операційних систем	226
Заярний О.В., Попов А.В. Генеративний простір навчання: сучасний стан та перспективи розвитку	227
Іванченко Д.А., Фоміна А.М., Ганжеєв Д.І. Підвищення ефективності автотранспортних підприємств шляхом інтеграції інженерних розрахунків	228
Момот М.О., Давиденко К.І. Розробка комп'ютерної 3D-гри в жанрі First-Person Shooter на основі ігрового рушія Godot	231

Радченко Є.П., Лещенко Ю.О. Прогнозування ефективності спортсменів з використанням методів машинного навчання.....	234
Романов М.С. Трансформація систем управління вартістю виробництва та кадровим потенціалом сучасного механоскладального виробництва	235
Фролов В.В., Лещенко Ю.О. Імітаційне моделювання процесів обслуговування пацієнтів клініки.....	238

1. ЗАГАЛЬНІ ПИТАННЯ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 004.8

Богдан В.В., магістр
k302@khai.edu
Лещенко Ю.О., к.т.н, доцент
j.leshhenko@khai.edu

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ АВТОМОБІЛІВ

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Україна

Постановка проблеми. Безпека перевезення рідких та небезпечних вантажів залізничним транспортом значною мірою визначається надійністю вузлів опирання котла цистерни на раму вагона. Зростання швидкостей руху, підвищення осьових навантажень та інтенсифікація перевізного процесу актуалізують питання відповідності чинної нормативно-стандартизаційної бази реальним умовам експлуатації. Водночас критичний аналіз показує, що значна частина чинних вимог сформована десятиліття тому і не повною мірою враховує сучасні досягнення матеріалознавства, цифрового моніторингу технічного стану та методів розрахунково-експериментального обґрунтування міцності. Це обумовлює потребу в окремому критичному перегляді саме нормативів, що стосуються вузлів опирання котлів цистерн, а не лише несівної конструкції вагона в цілому.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Питанням нормативного забезпечення конструкцій вагонів-цистерн присвячено низку робіт. Законодавчі ініціативи США [1; 2] спрямовані на модернізацію парку цистерн, посилення контролю технічного стану та впровадження цифрового моніторингу, проте мають переважно організаційно-правовий, а не технічно-розрахунковий характер. Нормативні документи 49 CFR Part 179 [3–5] встановлюють вимоги до товщини елементів котла та специфікацій DOT-117, DOT-117R, однак ці вимоги є переважно параметричними й слабко пов'язаними з фактичним ресурсом опорних вузлів. У роботах [6–10] досліджено навантаження несівної конструкції вагона-цистерни за різних умов експлуатації – перевезення порошком, модернізація візків типу Y25, передача поздовжніх сил, динамічна взаємодія котла з рамою через пружні зв'язки, що формує розрахункове підґрунтя, яке, втім, не знайшло прямого відображення в чинних нормативних документах. Праці [11–13] узагальнюють підходи до проектування несівних систем рухомого складу та оцінки його надійності методом RCM, підкреслюючи системну важливість опорних вузлів. Європейські технічні специфікації інтероперабельності TSI WAG [14; 15] деталізують вимоги до конструкції котла та опорних елементів у межах гармонізованого європейського простору, однак залишають значний простір для інженерного трактування без чітких кількісних критеріїв. Узагальнюючи, можна констатувати, що більшість проаналізованих джерел або має організаційно-правовий характер, або зосереджена на загальній міцності рами вагона, тоді як вузькоспеціалізований критичний аналіз вимог саме до вузлів опирання котла залишається фрагментарним.

Виділення невирішених частин загальної проблеми. Незважаючи на наявність значного масиву нормативних документів, низка питань залишається невирішеною: відсутній єдиний методологічний підхід до оцінки втомної міцності вузлів опирання; недостатньо деталізовані вимоги до якості зварних з'єднань опорних елементів; відсутні уніфіковані критерії розташування датчиків моніторингу ударних навантажень і температури на опорах; зберігаються суттєві розбіжності між прескриптивним північноамериканським і перформансним європейським підходами до нормування, що ускладнює міжнародну гармонізацію стандартів; не врегульовано застосування композитних матеріалів у конструкціях опорних вузлів.

Мета статті. Метою дослідження є критичний аналіз чинних нормативних вимог до вузлів опирання котлів залізничних цистерн у північноамериканській та європейській

системах стандартизації, виявлення їхніх внутрішніх обмежень і суперечностей, а також визначення пріоритетних напрямів удосконалення нормативної бази.

Виклад основного матеріалу. Чинні вимоги до вузлів опирання котлів цистерн формуються двома основними регуляторними системами – північноамериканською (49 CFR Part 179, специфікації DOT-117/DOT-117R) та європейською (RID, TSI WAG, стандарти UIC та EN). Критичний аналіз кожної з них дозволяє виявити їхні переваги та обмеження.

Північноамериканська система встановлює чіткі кількісні параметри: мінімальну товщину головних щитів захисту днища 1/2 дюйма (12,7 мм); товщину термозахисної ковдри не менше 1/2 дюйма з металевою оболонкою не менше 11 калібру (≈ 3 мм); вимогу до захисного кожуха верхньої арматури, міцність на розрив якого не повинна перевищувати 70 % міцності з'єднання патрубків з котлом, що має забезпечити контрольоване руйнування саме кожуха, а не патрубка; мінімальні швидкості удару без розгерметизації – 12 миль/год (19,3 км/год) у бічну частину та 18 миль/год (29 км/год) у головну частину. Перевагою такого підходу є однозначність і перевірюваність вимог, що спрощує сертифікацію. Водночас критичним обмеженням є те, що зазначені параметри ґрунтуються переважно на статичних та ударних випробуваннях і не містять експліцитних критеріїв оцінки втомної довговічності вузлів опирання за умов циклічного навантаження впродовж усього терміну експлуатації цистерни, що створює ризик прихованого накопичення пошкоджень, не виявленого чинними процедурами контролю.

Європейська система (RID, TSI WAG, EN-стандарти) зосереджена на структурних вимогах до несучого кузова та з'єднання «котел-рама», залишаючи більше простору для інженерних рішень за умови підтвердження загальної механічної міцності та інтероперабельності. Це дозволяє впроваджувати інноваційні конструктивні рішення, проте критичний недолік такого перформансного підходу полягає в недостатній деталізації вимог до якості зварних з'єднань опорних вузлів та відсутності уніфікованої методики підтвердження відповідності, що на практиці спричиняє розбіжності в інтерпретації норм різними виробниками та сертифікаційними органами.

Окремої критичної уваги потребує нормативне забезпечення цифровізації. Законодавча ініціатива American Tank Car Modernization Act of 2025 передбачає обов'язкове оснащення цистерн датчиками моніторингу ударних навантажень, температури коліс і буксових вузлів, стану гальм та внутрішньої температури котла, однак не визначає стандартизованих місць встановлення таких датчиків саме на вузлах опирання, що знижує практичну цінність зібраних даних для прогнозування відмов опорних елементів. Аналогічна прогалина простежується і в європейській нормативній базі.

Позитивною тенденцією є розвиток гібридних стандартів, зокрема підходу DOT-117P, який дозволяє підтверджувати безпеку конструкції за результатами комп'ютерного моделювання та фізичних випробувань замість суворого дотримання таблиць товщини. Орієнтація провідних виробників (наприклад, Greenbrier) на одночасне виконання вимог RID, TSI та EN свідчить про практичний рух до глобальної гармонізації, проте уніфікованого міжнародного стандарту, що поєднував би прескриптивні й перформансні критерії саме для вузлів опирання котла, на сьогодні не існує. Поза увагою чинної нормативної бази також залишається застосування композитних матеріалів в опорних конструкціях, що потребує розроблення принципово нових вимог.

Обговорення отриманих результатів. Проведений критичний аналіз засвідчив, що чинна нормативна база переважно регламентує пасивний захист та ударостійкість вузлів опирання, тоді як питання втомної довговічності, якості зварних з'єднань, стандартизації цифрового моніторингу та застосування нових матеріалів врегульовані недостатньо. Розбіжність між прескриптивним і перформансним підходами до нормування створює додаткові бар'єри для гармонізації стандартів і виходу вітчизняної продукції на міжнародні ринки.

Висновки. За результатами критичного огляду нормативних вимог до вузлів опирання котлів цистерн встановлено, що: 1) чинна база (49 CFR Part 179, DOT-117/117R, RID/TSI/EN) забезпечує переважно вимоги до пасивного захисту й ударостійкості, але не містить

уніфікованих критеріїв оцінки втомної довговічності опорних вузлів; 2) недостатня деталізація вимог до якості зварних з'єднань створює ризики прихованих дефектів як у північноамериканській, так і в європейській системах; 3) інтеграція цифрового моніторингу потребує окремого нормативного врегулювання щодо місць встановлення датчиків на опорах; 4) перспективним напрямом удосконалення є розвиток гібридних стандартів типу DOT-117P та розроблення нормативних вимог до застосування композитних матеріалів в опорних вузлах. Подальші дослідження доцільно спрямувати на розроблення уніфікованої методики оцінки втомної міцності вузлів опираючого, придатної для застосування в обох регуляторних системах.

Список використаних джерел

1. American Tank Car Modernization Act of 2025 : H.R. 2515, 119th Congress (2025) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.govinfo.gov/content/pkg/BILLS-119hr2515ih/xml/BILLS-119hr2515ih.xml>
2. Railway Safety Act of 2025 : H.R. 928, 119th Congress (2025) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.congress.gov/119/bills/hr928/BILLS-119hr928ih.htm>
3. Non-pressure tank car tanks (Classes DOT-111AW, 115AW, and 117AW) : 49 C.F.R. Part 179 Subpart D (2025) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.ecfr.gov/current/title-49/subtitle-B/chapter-I/subchapter-C/part-179/subpart-D>
4. Retrofit standard requirements (DOT-117R) : 49 C.F.R. § 179.202-13 (2026) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.ecfr.gov/current/title-49/subtitle-B/chapter-I/subchapter-C/part-179/subpart-D/section-179.202-13>
5. Specifications for non-pressure tank car tanks (Classes DOT-111AW, 115AW, and 117AW) – Thickness of plates : 49 C.F.R. § 179.200-6 (2024) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.ecfr.gov/current/title-49/subtitle-B/chapter-I/subchapter-C/part-179/subpart-D/section-179.200-6>
6. Fomin O., Vatulina G., Lovska A., Gerlici J., Kravchenko K. Determination of the loading of the carrying structure of a tank wagon during transportation by a railway ferry // TransNav. – 2021. – Vol. 15, No. 2. – P. 321–327. – DOI: <https://doi.org/10.12716/1001.15.02.07>
7. Fomin O., Lovska A., Ivanchenko K., Medvediev I. Justifying the prolongation of the service life of the bearing structure of a tank car when using Y25 bogies // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2021. – Vol. 6, No. 7. – P. 21–29. – DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.231622>
8. Kuba E., Moravčík M., Pavelčík V. Experimental verification of tank wagon's ability to transmit longitudinal forces in opposite track curves // Transportation Research Procedia. – 2021. – Vol. 55. – P. 767–774. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.07.045>
9. Gerlici J., Lovska A., Dizo J. Examination of structural properties of a new railway wagon design for flammable substance transportation // Transportation Research Procedia. – 2021. – Vol. 55. – P. 760–766. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.07.043>
10. Fomin O., Vatulina G., Lovska A. та ін. Determination of dynamic loading of a tank wagon with malleable links between the pot and the frame // Procedia Structural Integrity. – 2022. – Vol. 36. – P. 239–246. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.01.030>
11. Ihme J. Supporting structures and superstructures of railway vehicles // Rail Vehicle Technology. – Cham : Springer, 2022. – P. 215–270. – DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-658-36969-9_6
12. Tomaszewski F. та ін. Ultralight drive systems structures of freight wagons – possibilities and limitations resulting from regulations // Engineering Reports. – 2024. – DOI: <https://doi.org/10.1002/eng2.12787>
13. Ghorbani M. та ін. Identifying critical components for railway rolling stock reliability using RCM approach // Scientific Reports. – 2024. – Vol. 14. – Art. 62841. – DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-62841-2>
14. European Commission. Technical specifications for interoperability relating to freight wagons (including tank wagons). – Official Journal of the European Union, 2025.
15. European Union Agency for Railways. Technical specification for interoperability (WAG TSI) – tank wagons requirements. – 2025.

КРИТИЧНИЙ ОГЛЯД НОРМАТИВНИХ ВИМОГ ДО ВУЗЛІВ ОПИРАННЯ КОТЛІВ ЦИСТЕРН

Український державний університет залізничного транспорту, Україна

В останні роки з метою підвищення надійності редукторів важконавантажених машин застосовують конічні зубчасті передачі із двоопукло-ввігнутими зубцями (ДОВ-зубцями). Однак, якщо дослідженню роботи зубців циліндричних і конічних передач приділяється велика увага, то конічні передачі з ДОВ-зубцями є недостатньо вивченими.

Для математичного опису профільної поверхні зуба розроблено математичну модель. За допомогою систем автоматизованого тривимірного проєктування за отриманими залежностями були створені тривимірні моделі шестірні й колеса. Після введення шестірні й колеса у зачеплення було перевірено й підтверджено сталість передатного відношення.

Швидкості ковзання профілів, що знаходяться в контакті, обчислювалися за наступною залежністю:

$$V_{CK} = L_{KP} \cdot (\omega_1 + \omega_2)$$

де L_{KP} – відстань від полюса зачеплення до точки контакту;

ω_1, ω_2 – кутові швидкості шестірні й колеса відповідно.

Графік зміни швидкостей ковзання V_{CK} залежно від кута повороту шестірні φ наведений на рисунку 1.

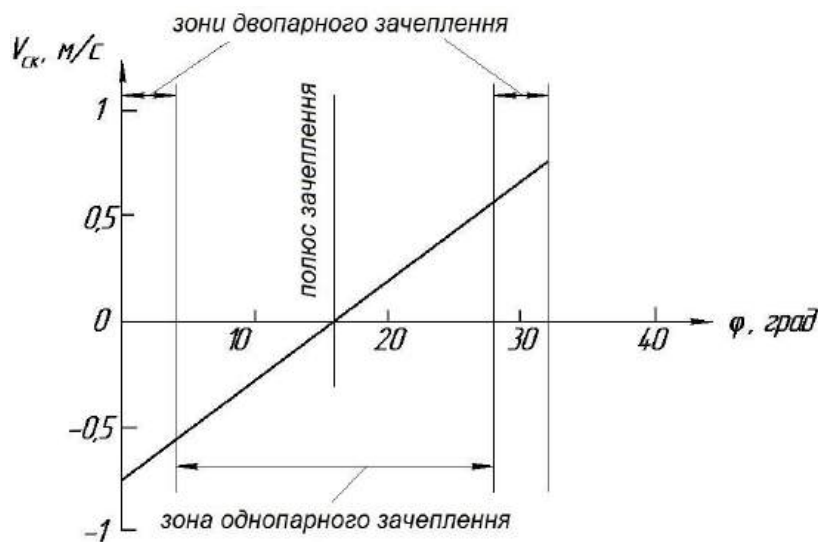


Рис. 1. Графік зміни швидкостей ковзання в зачепленні

Як бачимо, розподіл швидкостей ковзання являє собою пряму лінію, що цілком відповідає теоретичним даним. Надалі можливо використання вищевикладеної математичної моделі для прогнозування довговічності конічних коліс із ДОВ-зубцями. В даній моделі дотримується сталість передатного відношення в процесі обертання шестірні й колеса, а розподіл швидкостей ковзання являє собою пряму лінію. Отже, конічні колеса із ДОВ-зубцями становлять значний інтерес для дослідження.

ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ЧИСЕЛЬНИХ МЕТОДІВ ПРИ МОДЕЛЮВАННІ НДС КОНСТРУКЦІЙ ЗІ СКЛА ЗА СТАНДАРТОМ EN 1288-3

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Україна

Традиційною проблемою при верифікації характеристик міцності конструкцій, у тому числі, виготовлених зі скла, є висока вартість натурних випробувань та значні витрати часу на їх проведення. Рішенням цієї проблеми є точне віртуальне прогнозування руйнування скляної конструкції шляхом створення валідної скінченно-елементної моделі (СЕМ) для розрахунку НДС скла та порівняння її результатів з вже відомими результатами досліджень. Такий підхід дозволить використовувати отримані моделі та задіяні програмні продукти для інших варіантів конструкцій без необхідності їх руйнування при випробуванні.

У якості базового варіанту застосування чисельних методів для вирішення цієї задачі доцільно використання СЕМ для розрахунку НДС скла з подальшим порівнянням результатів із нормативними вимогами стандарту EN 1288-3. Така модель вимагатиме розгляду скла як ізотропного пружного тіла. При цьому необхідним є моделювання взаємодії "ролик - прокладка - скло" за допомогою контактних наборів (Contact Sets). Також обов'язковим є врахування нелінійності (Large Displacement) через великі прогини скла, що пов'язані з геометричними параметрами зразка (1100x360 мм) та стандартною схемою розстановки опор (1000 мм та 200 мм). Реалізація цього підходу планується шляхом співставлення теоретичного розрахунку за формулою стандарту EN 1288-3 та даних, отриманих у SolidWorksSimulation (епюри розподілу напружень за фон Мізесом та головних напружень (Principal Stresses)).

Зважаючи на те, що скло – крихкий матеріал, варто акцентувати увагу не на напруженнях за фон Мізесом (які краще підходять для металів), а на першому головному напруженні (1st Principal Stress), оскільки саме воно відповідає за виникнення тріщин розтягу. Відповідно руйнування скла за стандартом EN 1288-3 відбувається шляхом розкриття мікротріщин на поверхні під дією розтягу. 1st Principal Stress демонструє саме той вектор сили, який умовно «розриває» матеріал. При чотириточковому згині, характерному для цього стандарту, нижня поверхня скла розтягується, а верхня стискається. Використання 1st Principal Stress дозволить ігнорувати зони стиску (де скло залишається міцним) і зосередитися на нижній поверхні, де напруження розтягу досягають критичного значення. Таким чином можна зазначити, що у той час як напруження за фон Мізесом враховує реакцію на стиск як потенційне руйнування, перше головне напруження фокусується на розтягу, майже ігноруючи реакцію на стискання.

Зважаючи на вищезазначене, можна зробити наступні висновки щодо перспектив застосування моделювання конструкцій зі скла у SolidWorksSimulation за стандартом EN 1288-3:

1. Аналіз епюр напружень: при моделюванні збірки (метал плюс скло) для металевих опор доцільно використовувати критерій фон Мізеса, тоді як для скляної панелі необхідно аналізувати 1st Principal Stress.
2. Зона руйнування: максимальні значення 1st Principal Stress у моделі повинні збігатися з нижньою поверхнею скла в прольоті між внутрішніми роликами, що відповідає фізиці процесу випробування за EN 1288-3.
3. Критерій руйнування: скло вважатиметься зруйнованим, коли 1st Principal Stress перевищуватиме межу міцності на вигин, розраховану за формулою стандарту.

REMOTE INVESTIGATION OF THE CHEMICAL COMPOSITION OF THE MARTIAN SURFACE USING THE CHEMCAM COMPLEX OF THE CURIOSITY ROVER

National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Ukraine

This paper considers the operating principle of the ChemCam complex installed on the Curiosity rover of the NASA Mars Science Laboratory mission. The features of Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) and the Remote Micro Imager (RMI), which provide remote determination of the chemical composition of the Martian surface and documentation of the geological context of the investigated objects, are analyzed. The importance of integrating these technologies to improve the efficiency of planetary research is demonstrated.

Mars remains one of the most intensively studied objects of modern space exploration due to the potential possibility of habitable conditions in the past and the presence of geological processes similar to those on Earth. To obtain information about the composition of the planet's surface, automated research platforms equipped with high-precision measurement systems are used. One of the most technologically advanced instruments of the Curiosity rover is the ChemCam (Chemistry and Camera) complex, which provides rapid remote determination of the elemental composition of rocks and soil [1].

The ChemCam complex consists of two interconnected subsystems:

- Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS);
- Remote Micro Imager (RMI).

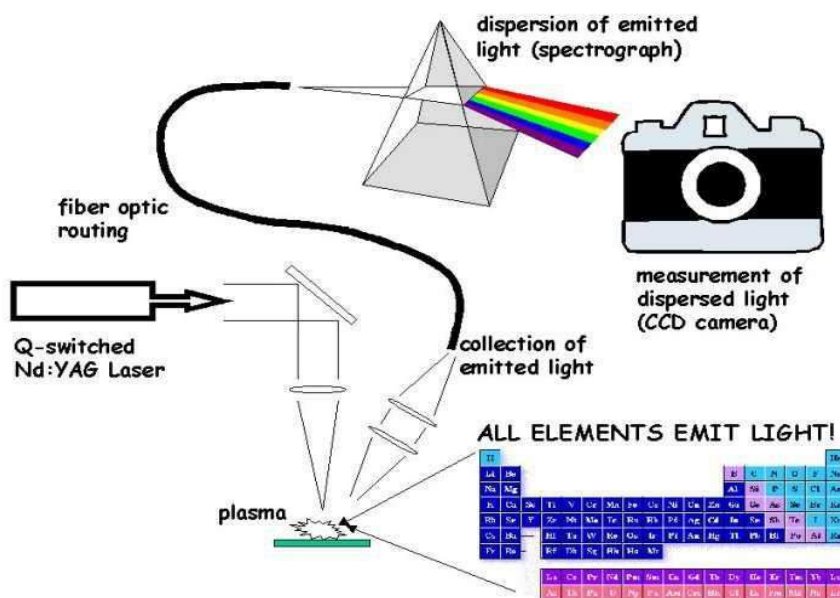


Fig. 1. Operating principle of Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) [2]

LIBS technology is based on the use of short-pulse high-energy laser radiation. The laser creates a localized impact on the surface of the investigated object and initiates the process of laser ablation.

A plasma plume containing atoms and ions of the material is formed in the irradiation zone. During the cooling process, the plasma emits electromagnetic radiation at characteristic wavelengths.

Spectral analysis of the emitted radiation makes it possible to determine the elemental composition of the sample and obtain information about the concentration of individual components.

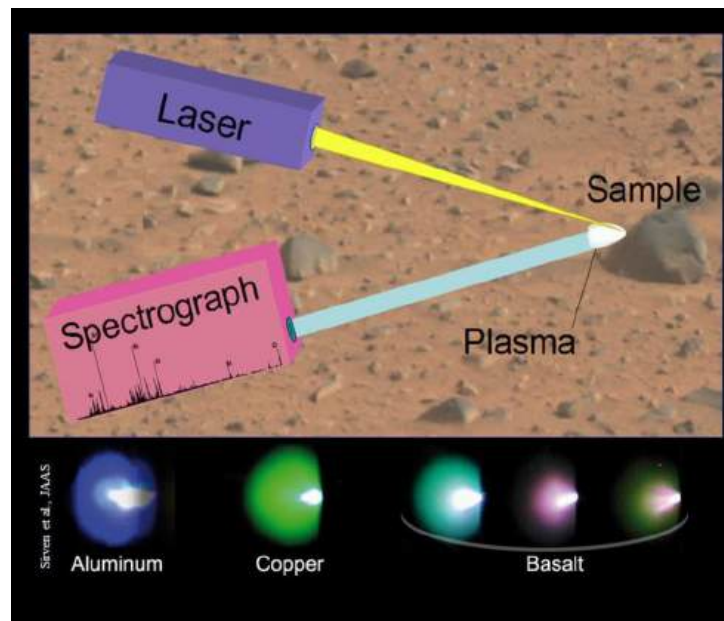


Fig. 2. Illustration of the ChemCam complex operation and analysis of elemental spectral lines [3]

The ChemCam complex enables analysis at distances of several meters from the rover without mechanical contact.

The RMI camera is designed to obtain detailed images of the area where spectral analysis is performed.

The main functions of the camera include: documenting the laser impact point; determining the geological context; remote surface observation; and supporting the interpretation of LIBS results. High spatial resolution makes it possible to identify structural features of rocks, fractures, layers, and traces of erosion processes. The combined use of LIBS and RMI forms an integrated approach to the investigation of the Martian surface.

The application of the complex has provided new data regarding: the mineral composition of rocks in Gale Crater; sediment formation processes; and the presence of chemical elements associated with water-related processes. The use of remote analysis significantly reduces experiment time and minimizes the risk of damage to the rover's mechanical systems. Technologies implemented in ChemCam may be applied in future interplanetary missions for studying the Moon, asteroids, and other planets.

The ChemCam complex is an effective instrument for remote analysis of the Martian surface, combining Laser-Induced Breakdown Spectroscopy with a high-precision visual observation system. The integration of spectral analysis and optical monitoring improves the accuracy of determining surface composition and accelerates scientific investigations. The obtained results demonstrate the prospects of applying remote spectral technologies in the space industry.

References

1. Maurice S., Wiens R. C., Saccoccio M. et al. The ChemCam Instrument Suite on the Mars Science Laboratory Rover: Science Objectives and Instrument Description // *Space Science Reviews*. 2012. Vol. 170. P. 95–166.
2. Wiens R. C., Maurice S., Barraclough B. Laser-Induced Breakdown Spectroscopy for Planetary Exploration // *Spectrochimica Acta Part B*. 2005. Vol. 60. P. 1472–1485.
3. Grotzinger J. P., Crisp J., Vasavada A. Mars Science Laboratory Mission and Science Investigation // *Space Science Reviews*. 2012. Vol. 170. P. 5–56.

Рузайкін В.І.¹, к.т.н., с. н. с.
vasyl.ruzaikin@kname.edu.ua
Лукашов І.М.¹, к.т.н., с. н. с.,
Ivan.Lukashov@kname.edu.ua
Косенко О.В.², асистент
o.kosenko@khai.edu

АДІАБАТИЧНІ ВТРАТИ ТИСКУ НА ТЕРТЯ ДЛЯ ОДНОФАЗНИХ ТА ДВОФАЗНИХ ПОТОКІВ У ГОРИЗОНТАЛЬНИХ КВАДРАТНИХ І ПРЯМОКУТНИХ ГЛАДКИХ КАНАЛАХ

¹ Харківський національний університет міського господарства
імені О.М. Бекетова

² Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут»

Новітні виробничі технології та постійно зростаючий попит на підвищення ефективності в галузях генерації енергії, опалення та охолодження вимагають оновлення й перепроєктування різноманітних теплогідравлічних систем. Використання тепломасообмінних каналів зі специфічною площею поперечного перерізу, зокрема прямокутною або квадратною, дозволяє суттєво зменшити загальний термічний опір активних теплообмінних контурів. Такі рішення є критично важливими для енергоефективного охолодження складної електроніки як у наземних, так і в космічних застосуваннях. Однак геометрична оптимізація каналів потребує надійних інструментів для прогнозування інтенсивності теплообміну та розсіювання механічної енергії. Хоча існуючі феноменологічні кореляції ефективні для однофазних застосувань, прогнозування втрат тиску для двофазних потоків значно ускладнюється через інтенсивну взаємодію між рідкою та паровою фазами, що робить традиційний підхід із використанням гідравлічного діаметра недостатньо обґрунтованим без експериментальної перевірки. Метою даного дослідження є експериментальне визначення втрат тиску на тертя при однофазному та двофазному потоках аміаку в горизонтальних квадратних і прямокутних каналах. В якості робочої рідини було обрано аміак завдяки його унікальним теплофізичним характеристикам - густині та в'язкості рідини, що значно відрізняються від традиційних холодоагентів і води [1]. Дослідження проводилися для різних профілів з гідравлічними діаметрами від 4 до 8 мм у широкому діапазоні робочих параметрів: температура насичення від 35 °С до 60 °С, масова швидкість потоку від 50 до 300 кг•м⁻²•с⁻¹ та масовий паровміст від 0,1 до 0,9. Вимірювання абсолютного тиску, перепаду тиску та температур здійснювалося на спеціалізованому стенді. Результати дослідження однофазного потоку рідкого аміаку продемонстрували високу точність класичних моделей. Встановлено, що найпростіша кореляція Блазіуса, яка використовує еквівалентний гідравлічний діаметр, дозволяє прогнозувати втрати тиску на тертя з відхиленням у межах ±10%. Аналіз експериментальних даних не виявив суттєвого впливу співвідношення сторін каналу на коефіцієнт тертя, що повністю підтверджує надійність використання гідравлічного діаметра для розрахунків потоку рідкого аміаку в таких гладких каналах. Для двофазних процесів тести виявили сильну залежність фактора двофазності від масової швидкості потоку (особливо в діапазоні від 50 до 100 кг•м⁻²•с⁻¹) для каналів з малим поперечним перерізом. При цьому для великих каналів такий вплив виявився помірним, що пояснюється зміною структури двофазного потоку залежно від розміру профілю. Оцінка існуючих прогностичних інструментів на базі 519 тестових точок з літературних джерел [2, 3] показала, що класичний підхід Мюллера-Штайнхагена і Хека найточніше прогнозує двофазні втрати тиску на тертя. Запропонована в роботі модифікація цієї моделі із введенням коефіцієнта, що залежить від масової швидкості потоку, суттєво покращує точність розрахунків (похибка знижується до 16,5% для вимірюваних параметрів) і є особливо точною безпосередньо для аміаку.

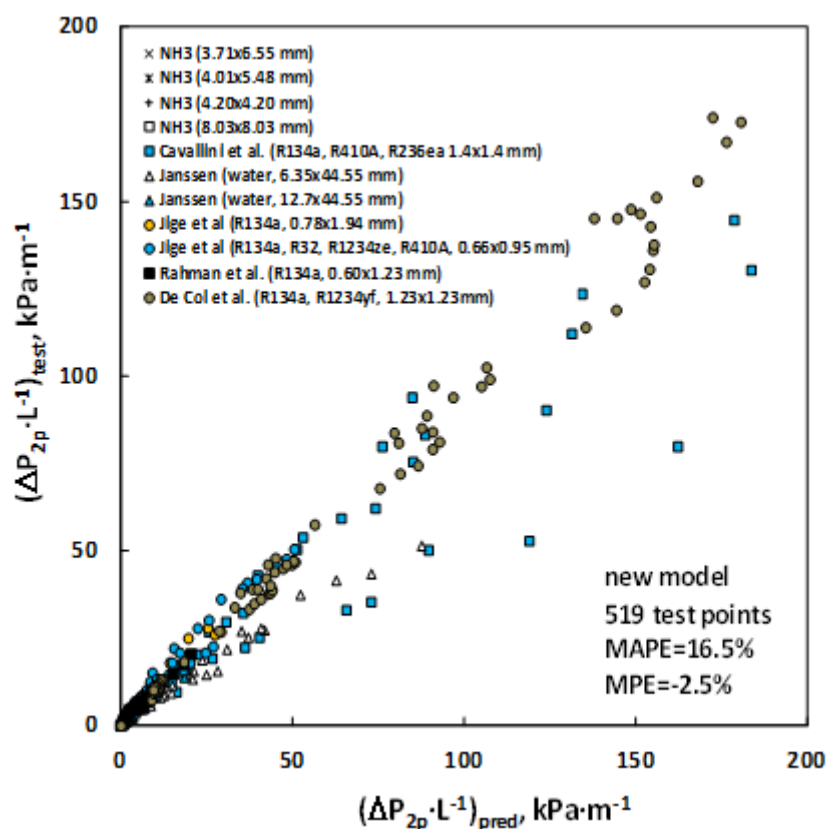


Рис. 1. Прогнози нової моделі порівняно з експериментальними даними щодо втрат тиску на тертя в горизонтальних квадратних і прямокутних каналах

Список використаних джерел

1. Ruzaikin, V. Ammonia single-phase and two-phase frictional pressure losses in horizontal smooth and straight inner-grooved tubes // V. Ruzaikin, I. Lukashov, A. Breus. – International Journal of Refrigeration. – 2024. – Vol. 161, pp. 124-134.
<https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2024.02.029>
2. Xu, Y. Experimental investigation on adiabatic two-phase frictional pressure drop of R1234ze (E) and R134a in a horizontal minichannel // Y. Xu, Z. Yan, L. Li. – Journal of Thermal Science and Engineering Applications. – 2022. – Vol. 14(2), p.021003
<https://doi.org/10.1115/1.4051134>.
3. Chen, Y. Two-phase frictional pressure drop in small rectangular channels. // Y. Chen, Y.M. Chen, J.S. Liaw, C.C. Wang. – Experimental thermal and fluid science. – 2007. – Vol. 32(1), pp.60-66. DOI:10.1016/j.expthermflusci.2007.01.005

МОДЕЛЬ ПРОГРЕСУЮЧОГО РУЙНУВАННЯ ТКАНИННОГО КОМПОЗИЦІЙНОГО МАТЕРІАЛУ

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Україна

Тканинні композиційні матеріали (ТКМ) завдяки високій міцності, жорсткості та стійкості до удару набули поширення у високотехнологічних галузях таких як аерокосмічна, оборона промисловість і автомобілебудування. Конструювання виробів з ТКМ потребує розробки вдосконалених моделей поведінки матеріалу з метою вивчення його механічного відгуку на різні види навантаження.

В цій роботі розглянуто модель механічної поведінки тканинного композиційного матеріалу з використанням макромасштабного підходу. У цьому підході матеріал моделюється як еквівалентне однорідне середовище без розрізнення між волокнами та матрицею.

Для опису поведінки тканинного композиційного матеріалу у випадку впливу на нього високих швидкостей деформацій та тисків застосовано модель пружного ортотропного тіла. Зв'язок між другим тензором напружень Піола-Кіргофа та тензором деформацій Гріна – Сен Венана має вигляд:

$$S = C \cdot E = T^T C_1 T \cdot E, \quad (1)$$

де T – матриця перетворення розміром 6×6 :

$$T = \begin{bmatrix} l_1^2 & m_1^2 & n_1^2 & l_1 m_1 & m_1 n_1 & n_1 l_1 \\ l_2^2 & m_2^2 & n_2^2 & l_2 m_2 & m_2 n_2 & n_2 l_2 \\ l_3^2 & m_3^2 & n_3^2 & l_3 m_3 & m_3 n_3 & n_3 l_3 \\ 2l_1 l_2 & 2m_1 m_2 & 2n_1 n_2 & (l_1 m_2 + l_2 m_1) & (m_1 n_2 + m_2 n_1) & (n_1 l_2 + n_2 l_1) \\ 2l_2 l_3 & 2m_2 m_3 & 2n_2 n_3 & (l_2 m_3 + l_3 m_2) & (m_2 n_3 + m_3 n_2) & (n_2 l_3 + n_3 l_2) \\ 2l_3 l_1 & 2m_3 m_1 & 2n_3 n_1 & (l_3 m_1 + l_1 m_3) & (m_3 n_1 + m_1 n_3) & (n_3 l_1 + n_1 l_3) \end{bmatrix},$$

де l_i, m_i, n_i – напрямні косинуси, $i = 1, 2, 3$.

Зв'язок між осями глобальної системи координат та системи координат шару (матеріальної системи координат) визначають співвідношенням:

$$x'_i = l_i x_1 + m_i x_2 + n_i x_3, \quad i = 1, 2, 3$$

Тут $x_1 = X, x_2 = Y, x_3 = Z$ – осі глобальної системи координат та напрямок осі x'_3 співпадає з напрямком осі x_3 (рис. 1).

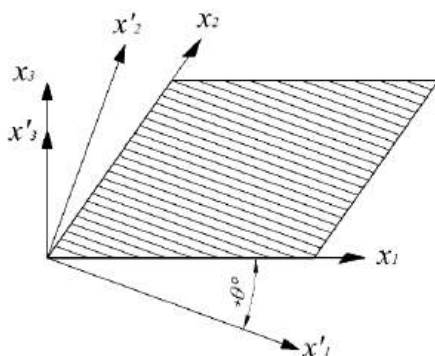


Рис. 1. Зв'язок між осями глобальної системи координат та системи координат шару

У випадку тканинного композиційного матеріалу напрямок 1 відповідає основі тканини, а напрямок 2 – утку тканини.

Матрицю жорсткості $[C]$, що входить у співвідношення (1) отримуємо шляхом обертання матриці податливості $[S]$, тобто $[C] = [S]^{-1}$.

Для врахування деградації властивостей композиційного матеріалу у разі руйнування окремих його шарів у матриці податливості додано скалярні параметри руйнування ω_i , де $i = 1, \dots, 6$. Дані параметри набувають значення в діапазоні від 0 (непошкоджений матеріал) до 1 (руйнування шару). Тоді з урахуванням введених параметрів руйнування ω_i матриця податливості має вигляд:

$$[S] = \begin{bmatrix} \frac{1}{(1-\omega_1)E_{11}} & \frac{-\nu_{21}}{E_{22}} & \frac{-\nu_{31}}{E_{33}} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{12}}{E_{11}} & \frac{1}{(1-\omega_2)E_{22}} & \frac{-\nu_{32}}{E_{33}} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{13}}{E_{11}} & \frac{-\nu_{23}}{E_{22}} & \frac{1}{(1-\omega_3)E_{33}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{(1-\omega_4)G_{12}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{(1-\omega_5)G_{23}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{(1-\omega_6)G_{31}} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

де $E_{11}, E_{22}, E_{33}, \nu_{12} = \nu_{21}, \nu_{23} = \nu_{32}, \nu_{13} = \nu_{31}, G_{12}, G_{23}$ и G_{31} – модулі пружності, коефіцієнти Пуассона та модулі зсуву композиційного матеріалу пластини у матеріальній системі координат x'_1, x'_2, x'_3 . Для збалансованого композиційного матеріалу матриця податливості є діагональною та симетричною та визначається дев'ятьма незалежними пружними константами матеріалу E_{ii}, ν_{ij} и G_{ij} .

Для врахування деформаційного зміцнення матеріалу після виникнення у ньому пошкоджень застосовано модель, яку описано в роботі [1]:

$$\omega_i = 1 - e^{-\frac{1}{m_i} r_i^{m_i}}, \quad (3)$$

де $i = 1, \dots, 6, m_i$ – константа, що описує характер зміни пружних властивостей матеріалу на етапі деформаційного розміцнення, r_i – монотонно зростаюча порогова функція, що визначає початок руйнування.

На рис. 2 показано залежність безрозмірних напружень від безрозмірних деформацій для різних значень параметру m . На рис. 2 прийнято такі позначення: σ_y – границя плинності матеріалу, а ϵ_y – деформація матеріалу, що відповідає значенню напружень σ_y . При дуже високих додатних значеннях параметру m залежність між напруженнями і деформаціями за межами границі плинності є такою, як у випадку крихкого руйнування. При значеннях параметру m близьких до нуля, ця залежність є майже такою, як у випадку ідеальної пластичності.

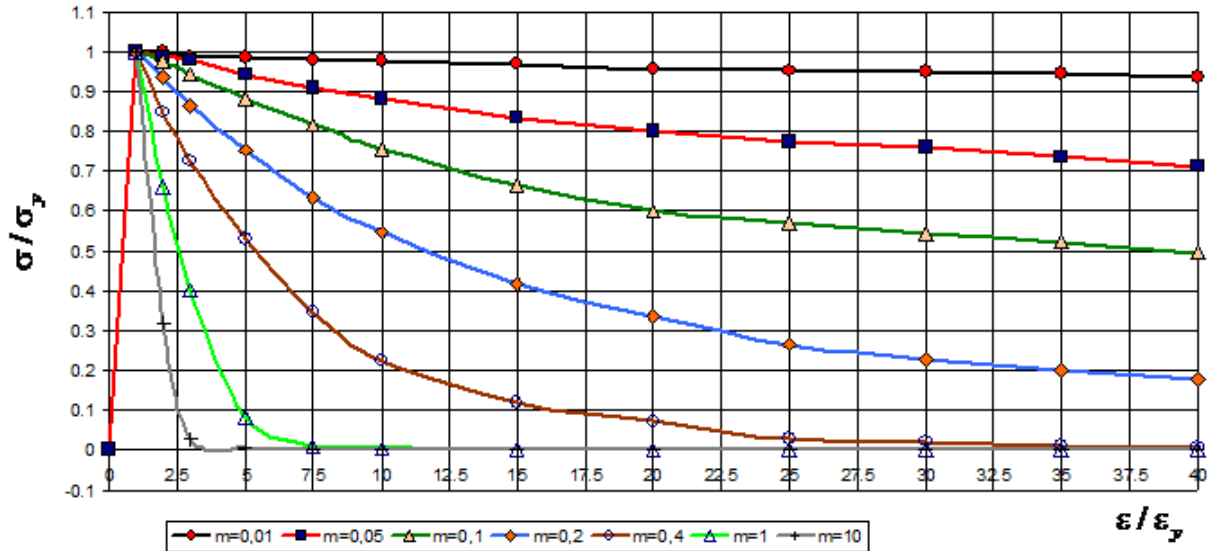


Рис. 2. Вплив параметру m на поведінку матеріалу за границею плинності

Для опису режимів руйнування волокон та матриці тканинного композиту застосовували критерій руйнування Хашина:

Режим 1: розтяг-зсув волокон у напрямку 1 (уток) та площині 31:

$$f_1 - r_1^2 = \left(\frac{E_{11} \langle \varepsilon_{11} \rangle}{X_{1T}} \right)^2 + \left(\frac{G_{31} \varepsilon_{31}}{X_{1FS}} \right)^2 - r_1^2 = 0. \quad (4)$$

Режим 2: розтяг-зсув волокон у напрямку 2 (основа) та площині 23:

$$f_2 - r_2^2 = \left(\frac{E_{22} \langle \varepsilon_{22} \rangle}{X_{2T}} \right)^2 + \left(\frac{G_{23} \varepsilon_{23}}{X_{2FS}} \right)^2 - r_2^2 = 0. \quad (5)$$

Режим 3: стискання волокон у напрямку 1 (уток):

$$f_3 - r_3^2 = \left(\frac{E_{11} \langle \varepsilon_{11}' \rangle}{X_{1C}} \right)^2 - r_3^2 = 0 \rightarrow \varepsilon_{11}' = -\varepsilon_{11} - \langle -\varepsilon_{33} \rangle \frac{E_{33}}{E_{11}}. \quad (6)$$

Режим 4: стискання волокон у напрямку 2 (основа):

$$f_4 - r_4^2 = \left(\frac{E_{22} \langle \varepsilon_{22}' \rangle}{X_{2C}} \right)^2 - r_4^2 = 0 \rightarrow \varepsilon_{22}' = -\varepsilon_{22} - \langle -\varepsilon_{33} \rangle \frac{E_{33}}{E_{22}}. \quad (7)$$

Режим 5: руйнування волокон у напрямку 3:

$$f_5 - r_5^2 = \left(\frac{E_{33} \langle -\varepsilon_{33} \rangle}{X_{FC}} \right)^2 - r_5^2 = 0. \quad (8)$$

Режим 6: зсув матриці у площині 12:

$$f_6 - r_6^2 = \left(\frac{G_{12} \varepsilon_{12}}{X_{12}} \right)^2 - r_6^2 = 0. \quad (9)$$

Тут X_{1T} і X_{2T} – межа міцності матеріалу волокон при розтягуванні у напрямках 1 і 2 відповідно; X_{1FS} і X_{2FS} – межа міцності матеріалу волокон при зсуві у напрямках 1 і 2 відповідно; $\langle \rangle$ – дужки Макалея; X_{1C} і X_{2C} – межа міцності матеріалу волокон при стисканні у напрямках 1 і 2 відповідно; X_{FS} – міцність волокна при роздавлюванні (стисканні) у напрямку 3; X_{12} – межа міцності матриці при зсуві у площині 12.

Висновки:

1. Описано модель прогресуючого руйнування тканинного композиційного матеріалу.
2. Для врахування деградації властивостей композиційного матеріалу у разі руйнування окремих його шарів у матриці податливості додано скалярні параметри руйнування ω_i , які у свою чергу визначаються двома параметрами m_i і r_i .
3. На відміну від існуючих моделей ушкодження в даній моделі вибрано експоненційний закон зміни параметра ушкодження, що більш реалістично описує морфологію руйнування матеріалу.
4. Для визначення початку руйнування у шарах композиційного матеріалу в моделі реалізовано критерій руйнування Хашина, який описує шість можливих режимів руйнування волокон та матриці.

Список використаних джерел

1. LS-DYNA Theory Manual. 22. Material Models. 22.112. Material Models 161 and 162: Composite MSC. Damage Model. Режим доступа: https://ftp.lstc.com/anonymous/outgoing/jday/manuals/DRAFT_Theory.pdf – 20.06.2026. – Назва. з екрану.

ПРО МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ У ВІБРАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ АПАРАТАХ З АСИНХРОННИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Україна

Вступ. Застосування вібраційних технологій дозволяє інтенсифікувати виробничі процеси, підвищувати якість робіт, створювати матеріали з новими властивостями, знижувати матеріало- та енергоємність обладнання. Низку переваг мають вібраційні апарати на пружних опорах з ексцентриковим ротором, дебалансами та асинхронним електроприводом (АД).

Конструкції пристроїв є відносно простими, проте вибір їх параметрів утруднений складністю моделювання динамічних процесів. Додаткові труднощі викликає коректний опис динамічної характеристики АД при перехідних режимах та навантаженні, що має коливальний характер. Дослідження відносно моделювання динамічних процесів у зазначених пристроях, вибору їх параметрів, прогнозування технологічних якостей мають актуальний характер.

Аналіз останніх досягнень та публікацій. Конструктивні особливості, принцип дії вібраційних технологічних пристроїв на пружних опорах з ексцентриковим ротором, дебалансами розглядаються, наприклад, роботах [1, 2]. Деякі питання опису динамічних характеристик асинхронного електродвигуна під час пуску апарату та коливального навантаження досліджуються в монографії [3]. У роботі [4] отримані рівняння руху найпростішої моделі механізму на усталених режимах роботи, однак у більшості випадків характерними режимами роботи пристроїв є часті запуски та зупинки, що робить актуальними розрахунки перехідних процесів. Використання для опису динамічної характеристики асинхронного електродвигуна (АД) при перехідних режимах і навантаженні, яке має коливальний характер, лінеаризованих статичних характеристик [5], або лінеаризованих диференціальних рівнянь [6] призводить до суттєвого завищення розрахункового моменту в АД порівняно з експериментальним [7]. У роботах автора [2, 8] запропоновано комплексну модель динамічних процесів у пристроях з АД у формі системи автономних нелінійних диференціальних рівнянь зі змінними коефіцієнтами. Динамічна характеристика АД, яка представлена диференціальним рівнянням другого порядку, дозволяє досить адекватно описувати перехідні режими при запуску пристрою і коливальний характер навантаження на сталих режимах роботи.

Перспективними є дослідження щодо подальшого вивчення впливу найважливіших параметрів пристроїв на їх технологічні характеристики та динамічні показники.

Мета та постановка задачі. Метою роботи є створення універсальної математичної моделі вібраційного пристрою на пружних опорах з ексцентриковим дебалансним ротором і асинхронним приводним електродвигуном, динамічна характеристика якого дозволяє адекватно описувати перехідні режими при запуску пристрою і коливальний характер навантаження на усталених режимах роботи. Для досягнення поставленої мети повинні бути розв'язані наступні задачі: вибрано динамічну характеристику асинхронного електродвигуна; наведено спосіб перетворення системи диференціальних рівнянь динамічних процесів до зручного для численного інтегрування вигляду; досліджено вплив дебалансів, ексцентриситету ротора на процес запуску апарату, рух характерних точок його корпусу, навантаження на підшипники та основу; встановлено раціональний спосіб вибору ексцентриситету, що дозволяє знизити вібрації ротора.

Диференціальні рівняння руху вібраційного пристрою. На рис. 1 показано схему апарату. Робоча камера пристрою 3 встановлена на чотирьох вертикальних пружинах 6, укріплених на основі 7. У двох підшипниках, жорстко зв'язаних з камерою, знаходиться коліно ексцентрикового (e – ексцентриситет) валу (ротора) 4, на якому укріплені дебаланси 5. Ротор зв'язаний гнучким валом (дюритом) 2 з валом електродвигуна 1. Рівняння руху

механізму, які отримані в роботах [2, 4] з використанням методики складання рівнянь Лагранжа другого роду, мають вигляд:

$$\left. \begin{aligned} \ddot{\psi} &= f_{\psi}, \\ \alpha_3 \ddot{\phi} - \alpha_2 \sin \phi \ddot{x} + \alpha_2 \cos \phi \ddot{y} + (\alpha_3 - \alpha_5 \sin \phi) \ddot{\vartheta} &= f_{\phi}, \\ -\alpha_2 \sin \phi \ddot{\phi} + \alpha_1 \ddot{x} + (\alpha_6 - \alpha_2 \sin \phi) \ddot{\vartheta} &= f_x, \\ \alpha_2 \cos \phi \ddot{\phi} + \alpha_1 \ddot{y} + \alpha_2 \cos \phi \ddot{\vartheta} &= f_y, \\ (\alpha_3 - \alpha_5 \sin \phi) \ddot{\phi} + (\alpha_6 - \alpha_2 \sin \phi) \ddot{x} + \alpha_2 \cos \phi \ddot{y} + (\alpha_{10} - \alpha_{11} \sin \phi) \ddot{\vartheta} &= f_{\vartheta}, \\ \ddot{M}_D &= f_{M_D}. \end{aligned} \right\}$$

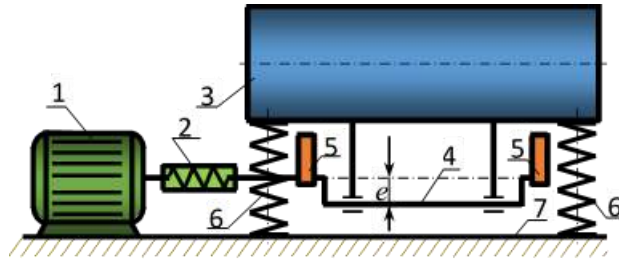


Рис. 1. Схема вібраційного пристрою

Положення механізму визначається п'ятьма узагальненими координатами: ψ , ϕ – відповідно кути повороту ротора електродвигуна і ротора механізму; x , y – декартові координати, що визначають положення центру мас робочої камери відносно нерухомої системи координат Oxy ; ϑ – кут повороту робочої камери. Три останні координати показано на рис. 2 де механізм зображений в поточний момент часу.

Для правих частин рівнянь отримані такі вирази:

$$\begin{aligned} f_{\psi} &= \frac{k}{J_e}(\phi - \psi) + \frac{\beta_{\gamma}}{J_e}(\dot{\phi} - \dot{\psi}) + \frac{M_D}{J_e}; \\ f_{\phi} &= \alpha_{13} \sin \phi x - \alpha_{13} \cos \phi y - \alpha_2 [(\dot{x} + b \dot{\vartheta}) \cos \phi + \dot{y} \sin \phi] \dot{\vartheta} - \alpha_{15} \cos \phi + \\ &\quad + \alpha_{17} \sin \phi \vartheta - k(\phi - \psi) - \beta_{\gamma}(\dot{\phi} - \dot{\psi}) - M_d; \\ f_x &= \alpha_2 \cos \phi (\dot{\phi} + \dot{\vartheta}) \dot{\phi} - \alpha_{18} x - (\alpha_{20} - \alpha_{13} \sin \phi) \vartheta - \alpha_{13} \cos \phi - \beta_x \dot{x}; \\ f_y &= \alpha_2 \sin \phi (\dot{\phi} + \dot{\vartheta}) \dot{\phi} - \alpha_{21} y - \alpha_{13} \cos \phi \vartheta + \alpha_{13} (1 - \sin \phi) - \beta_y \dot{y}; \\ f_{\vartheta} &= \alpha_5 \cos \phi (\dot{\phi} + 2 \dot{\vartheta}) \dot{\phi} + \alpha_2 (\dot{x} \cos \phi + \dot{y} \sin \phi) \dot{\phi} - (\alpha_{20} - \alpha_{13} \sin \phi) x - \\ &\quad - \alpha_{13} \cos \phi y - (\alpha_{23} - \alpha_{17} \sin \phi) \vartheta - \alpha_{17} \cos \phi - \beta_{\vartheta} \dot{\vartheta}; \\ f_{M_D} &= -\omega_c s_k \left\{ 2 + \frac{[k(\phi - \psi) + \beta_{\gamma}(\dot{\phi} - \dot{\psi}) + M_D]}{\omega_c s_k (\omega_0 - \dot{\psi}) J_e} \right\} \dot{M}_D - \\ &\quad - \left\{ \omega_c^2 s_k^2 \left[1 + \frac{(\omega_0 - \dot{\psi})^2}{\omega_0^2} \right] + \omega_c s_k \frac{[k(\phi - \psi) + \beta_{\gamma}(\dot{\phi} - \dot{\psi}) + M_D]}{(\omega_0 - \dot{\psi}) J_e} \right\} M_D + 2M_k \omega_c^2 s_k^2 \frac{(\omega_0 - \dot{\psi})}{\omega_0}. \end{aligned}$$

Коефіцієнти $\alpha_1 \div \alpha_{23}$ виражаються через параметри механізму (див. рис. 2):

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= M + m, \quad \alpha_2 = m(e + r), \quad \alpha_3 = m(e + r)^2 + I, \quad \alpha_4 = g \alpha_2, \quad \alpha_5 = b \alpha_2, \quad \alpha_6 = mb, \quad \delta = \Delta_0 / H, \quad \alpha_7 = 4(k_x - \delta k_y) \\ , \quad \alpha_8 &= \alpha_7 b_1, \quad \alpha_9 = 4k_y, \quad \alpha_{10} = J + \alpha_3 + mb^2, \quad \alpha_{11} = 2\alpha_5, \quad \alpha_{12} = mgb + 4k_y [a^2 - b_1(b_1 + H)\delta] + 4k_9 + 4k_x b_1^2, \end{aligned}$$

$$\alpha_{13}=k_r e, \quad \alpha_{14}=\alpha_{13} e, \quad \alpha_{15}=\alpha_4-\alpha_{14}, \quad \alpha_{16}=\alpha_{13}(e-b), \quad \alpha_{17}=\alpha_4-\alpha_{16}, \quad \alpha_{18}=\alpha_7+k_r, \quad \alpha_{19}=k_r b, \\ \alpha_{20}=\alpha_8+\alpha_{19}, \quad \alpha_{21}=\alpha_9+k_r, \quad \alpha_{22}=k_r(e-b)b, \quad \alpha_{23}=\alpha_{12}-\alpha_{22},$$

де r – відстань від осі ротора до його центру мас; b – відстань від центру мас робочої камери до осі підшипників; a, b_1 – параметри, що визначають положення точок кріплення верхніх кінців пружин; M – сумарна маса робочої камери та оброблюваного матеріалу; m – маса всіх деталей ротора, що обертаються (включає масу ексцентрикового валу m_v , діаметр якого d_v , і масу двох дебалансів $2m_d$; відстань від центру мас дебалансів до осі валу r_d); g – прискорення вільного падіння; J – момент інерції робочої камери відносно осі, що проходить через центр мас; I – момент інерції ротора відносно осі, що проходить через центр мас; J_e – момент інерції електродвигуна; H_0 – довжина недеформованої пружини; k_x, k_y, k_ϑ – жорсткості пружин відповідно на зсув, розтягування-стискання, поворот; $\Delta_0 = (M+m)g/4k_y$ – початкова деформація пружини; $H = H_0 - \Delta_0$ – довжина статично деформованої пружини; k – жорсткість гнучкого валу на кручення; k_r – згинальна жорсткість гнучкого валу; $\beta_x, \beta_y, \beta_\vartheta$ – коефіцієнти опору які відповідають узагальненим швидкостям $\dot{x}, \dot{y}, \dot{\vartheta}$; β_γ – коефіцієнти опору на ділянці гнучкого валу; M_d – постійний момент опору на роторі вібраційного пристрою; M_D – крутний момент, прикладений до ротора АД, що визначається його динамічною характеристикою.

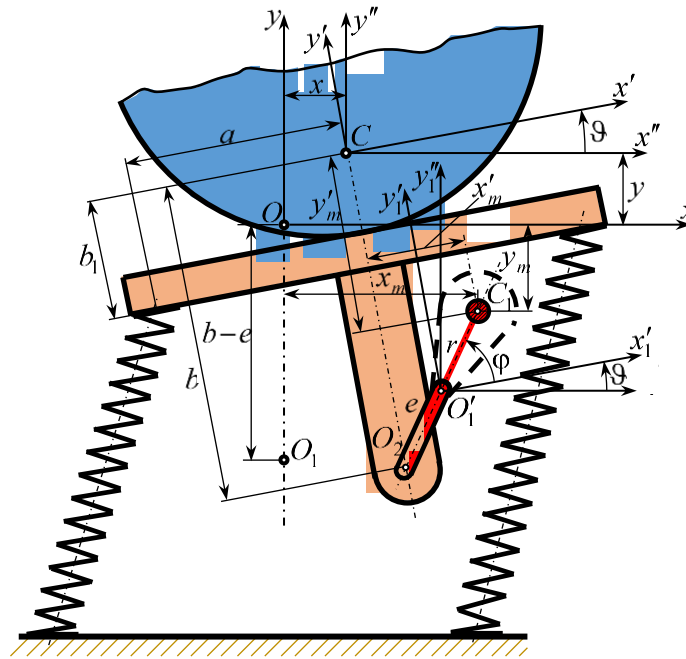


Рис. 2. Розрахункова схема вібраційного механізму

У рівняння входять каталожні характеристики АД [2, 8]: M_k – критичний момент двигуна; $\xi = 1/(1+\beta^2)$; $\beta = (\omega_0 - \dot{\psi})/\omega_0$ – відносне ковзання; ω_0 – кутова швидкість ідеального ходу; $\dot{\psi}$ – кутова швидкість електродвигуна у перехідному процесі; $s = \omega_0 - \dot{\psi}$ – поточне ковзання; $T_D = 1/(\omega_c s_k)$ – електромагнітна постійна часу; $\omega_c = 50 \cdot 2\pi$ – кругова частота напруги мережі; $s_k = \left(s_n + \sqrt{s_n \frac{\mu_m - 1}{\mu_i - 1}} \right) / \left(1 + \sqrt{s_n \frac{\mu_m - 1}{\mu_i - 1}} \right)$ – критичне ковзання; $s_n = (\omega_0 - \omega_n)/\omega_0$ –

номінальне ковзання; ω_n – номінальна кутова швидкість; $\mu_m = M_k / M_n$; $\mu_u = M_s / M_n$; $\mu_i = \mu_m / \mu_u$; M_n , M_s – відповідно номінальний, пусковий момент двигуна.

Останнє диференціальне рівняння руху системи являє собою розв'язаний відносно $\ddot{M}_D$ вираз динамічної характеристики АД [8] з урахуванням наведених вище формул для параметрів, причому в похідної за часом від поточного ковзання $\dot{s}$ друга похідна від кута повороту ротора електродвигуна $\ddot{\psi}$ замінена відповідним виразом з першого рівняння зазначеної системи. Таким чином, перше і останнє рівняння цієї системи розв'язані відносно другої похідної однієї зі змінних. Однак інтегрування системи рівнянь безпосередньо з використанням широко поширених алгоритмів численного інтегрування неможливе, оскільки рівняння 2÷5 цієї системи не розв'язані відносно другої похідної кожної з узагальнених координат φ, x, y, z .

Якби матриця, утворена з коефіцієнтів при других похідних від зазначених координат у лівій частині цих рівнянь, мала постійні елементи, то знаходження зворотної матриці, отже, і представлення рівнянь у формі зручною для численного інтегрування було б тривіальною задачею. Оскільки елементи матриці є змінними, знаходження її зворотної представляє трудомістку операцію, хоча матриця має розмірність 4×4 . В даний час складності, що виникають при цьому, вдається суттєво знизити, а надійність результатів підвищити, використовуючи математичні пакети, що включають символічну математику. У роботі з цією метою використовувався пакет Mathcad.

Дослідження параметрів руху вібраційного механізму. Розроблена математична модель використовувалася для дослідження динамічних процесів у вібраційному апараті обсягом $0,2 \text{ м}^3$ з наступними параметрами: $M = 300 \text{ кг}$, $m_v = 20,71 \text{ кг}$, $m_d = 7,69 \text{ кг}$,

$$m = m_v + 2m_d = 36,09 \text{ кг}, \quad e = 0,0025 \text{ м}, \quad r_d = 0,0785 \text{ м}, \quad r = \frac{m_v \cdot 0 + 2m_d r_d}{m} = 0,03345 \text{ м}, \quad d_v = 0,065 \text{ м},$$

$$I = \frac{m_v (d_v/2)^2}{2} + m_v r^2 + 2m_d (r_d - r)^2 = 0,06539 \text{ кгм}^2, \quad J = 9,375 \text{ кгм}^2, \quad a = 0,25 \text{ м}, \quad b = 0,28 \text{ м}, \quad b_1 = 0,18 \text{ м},$$

$$H_0 = 0,225 \text{ м}, \quad k_x = 5,957 \cdot 10^4 \text{ Н/м}, \quad k_y = 2,383 \cdot 10^4 \text{ Н/м}, \quad k_z = 41,443 \text{ Н/м}, \quad k = 24,038 \text{ Н/м}.$$

Використані такі початкові умови: $\psi(0) = \varphi(0) = \pi/2$, $x(0) = y(0) = z(0) = 0$, $M_D(0) = M_s$, $\dot{\psi}(0) = \dot{\varphi}(0) = \dot{x}(0) = \dot{y}(0) = \dot{z}(0) = \dot{M}_D(0) = 0$ (див. рис. 1, 2).

Розроблена модель є достатньо складною, що містить досить багато суттєвих параметрів. З технологічної точки зору до найважливіших конструктивних елементів механізму відносяться ексцентрикний вал та дебаланси. Від величини маси, форми останніх, значення ексцентриситету ротора залежить як характер руху робочої камери, але й можливість виходу установки на експлуатаційні режими. Нижче наведено деякі результати розрахунків перехідних процесів із різними значеннями параметрів зазначених вузлів ротора. Більшість їх допускають наочну геометричну інтерпретацію, важливу для раціонального вибору параметрів.

На рис. 3 показані залежності кутової швидкості валу електродвигуна від часу при запуску установки: 4 – номінальна; 3 – для прийнятих значень ексцентриситету та маси дебалансів (див. вище); 2 – для граничних значень маси дебалансів $m_d = 10,42 \text{ кг}$, при якому ще реалізується запуск; 1 – для значень маси дебалансів $m_d = 10,46 \text{ кг}$, що перевищує граничну. У останньому випадку запуск не реалізується – кутова швидкість валу становить менше 50% від номінальної. Має місце ефект Зоммерфельда – потужність двигуна витрачається переважно не на розгін, а на підтримку інтенсивних змушених коливань, що веде до його “зависання” [1].

На рис. 4 показані закони руху характерних точок робочої камери на сталому режимі (вихідні значення параметрів). Прийнято таку нумерацію: 1 – центр мас; 2 – точка, що лежить на осі камери; 3 – нижча точка вертикального діаметра; 4 і 5 – відповідно ліва та права точки

горизонтального діаметра (див. рис. 2). Рівняння кривих після інтегрування диференціальних рівнянь отримані з використанням формул перетворення координат.

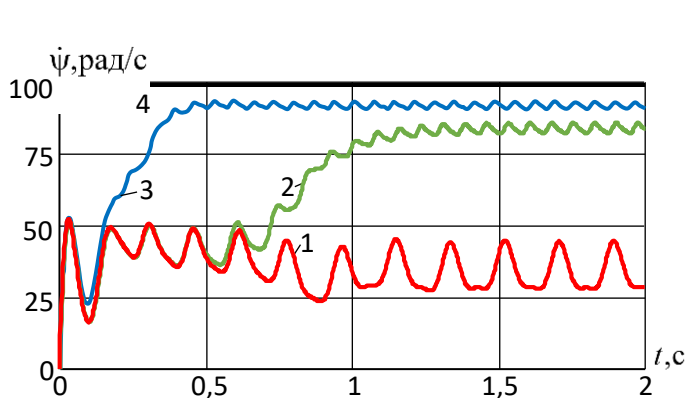


Рис. 3. Залежність кутової швидкості валу електродвигуна від часу під час пуску

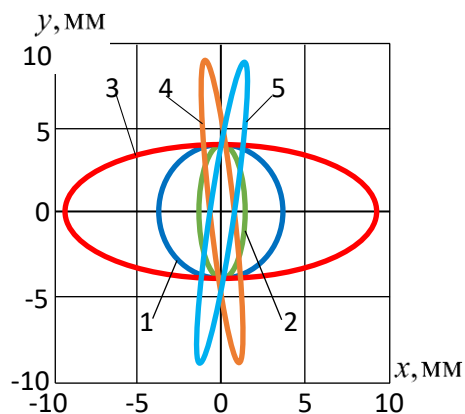


Рис. 4. Закони руху точок робочої камери

Висновки. 1. Запропоновано комплексну математичну модель вібраційного апарату на пружних опорах з ексцентриковим дебалансним ротором та асинхронним електроприводом. 2. Вибрано динамічну характеристику асинхронного електродвигуна, що дозволяє адекватно описувати процес запуску апарату і коливальний характер навантаження на сталих режимах роботи. 3. Наведено спосіб перетворення системи диференціальних рівнянь динамічних процесів у вібраційному пристрої до виду зручному для численного інтегрування. 4. Досліджено вплив дебалансів, ексцентриситету ротора на процес запуску апарату, рух характерних точок його корпусу, навантаження на підшипники та основу. 5. Встановлено, що раціональний вибір ексцентриситету дозволяє зменшити вібрації ротора. 6. Розроблена модель має значні перспективи під час розв'язання різних задач синтезу та оптимізації механізмів розглянутого класу.

Список використаних джерел

1. Shatokhin V.M. Dynamical processes simulation of unbalanced vibration devices with eccentric rotor and induction electric drive / V.M. Shatokhin, V.N. Sobol, W. Wójcik, G. Duskazev, D. Jarykbassov // Przegląd Elektrotechnicz.– Vol 2019.– No 4.– P. 79-85. <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57208771905>
2. Шатохін В.М. Аналіз та параметричний синтез нелінійних силових передач машин: Монографія / В.М. Шатохін.– Харків: НТУ “ХПІ”, 2008.– 456 с.
3. Ланець О.С. Високоєфективні міжрезонансні вібраційні машини з електромагнітним приводом (Теоретичні основи та практика створення): Монографія / О.С. Ланець.– Львів: Видавництво НУ “Львівська політехніка”, 2008.– 324 с.
4. Гончаревич І.Ф., Земсков В.Д., Корешков В.І. Вібраційні гуркоти та конвеєри.– М.: Госгортехіздат, 1980.– 352 с.
5. Давидов Б.Л., Скородумов Б.А. Статика і динаміка машин.– М.: Машинобудування, 1987.– 431 с.
6. Вейц В.Л. Динаміка машинних агрегатів.– Л.: Машинобудування, 1989.– 368 с.
7. Рівін Є.І. Динаміка приводу верстатів.– М.: Машинобудування, 1986.– 204 с.
8. Шатохін В.М. Про визначення параметрів дебалансних вібраційних апаратів з ексцентриковим ротором і асинхронним електроприводом / В.М. Шатохін, Б.Ф. Гранько, Н.В. Шатохіна // Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні: укр. межвід. наук.-техн. зб.– Львів: НУ “Львівська політехніка”.– 2013.– Вип. 47.– С. 36-44.

2. СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ ПРОЄКТУВАННЯ, ВИГОТОВЛЕННЯ Й ЗМІЦНЕННЯ ДЕТАЛЕЙ АГРЕГАТІВ ТА РІЗАЛЬНОГО ІНСТРУМЕНТУ

UDC 621.983.044.4

Zhexin W., post graduate student
z.v.wang@khai.edu

MODELLING OF MULTY-STAGE LOCAL ELECTROHYDAULIC LOADING OF LARGE-DIMENSIONAL SHEET PARTS

National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Ukraine

In the modern world, the construction and use of large rocket and space structures is intensively developing. They include large-sized thin-sheet bottoms, which are used in the form of parabolic mirrors of antennas, diaphragms, shielding protective casings and other parts. Such parts are subject to various rather strict requirements regarding accuracy, the nature of the distribution of parameters of the stressed-deformed state. In addition, the conditions for their manufacture are subject to requirements regarding minimizing the time and material resources for technological preparation of production. Materials for the manufacture of such parts must have high strength, i.e. low plasticity. Electrohydraulic stamping when using sequential local deformation meets these conditions and requirements to the greatest extent.

A review of the methods and methods of sheet stamping used in modern production conditions showed that the processes of sequential local deformation are developed and developed quite insufficiently.

The purpose of this study is to increase the efficiency of manufacturing and the quality of thin bottoms by means of sequential local deformation. To achieve this goal, the method of mathematical modeling of multi-stage plastic deformation processes was chosen, the use of which was not found in the known scientific and technical literature.

For the research, a physical model of the process was proposed (Fig. 1). In the large discharge chamber 1, two discharge cavities 2 are installed, in which electrohydraulic discharges are carried out simultaneously or with some time delay. The internal volume of the cavities is filled with water. Under the discharge chamber 1, a sheet blank is located, which is pressed against the matrix cavity 5 by means of a clamping ring 4.

Electrohydraulic discharges in cavities 2 are simulated by a “thermal explosion” model with selected parameters of the released energy. This leads to the formation of vapor-gas bubbles with high pressure and temperature values. These bubbles push part of the liquid out of cavity 2 and form flooded liquid flows [1]. These flows locally deform into a flat blank with the formation of local stampings on its surface. With subsequent discharges and movement of the loading zone along the surface of a blank, a general deformation occurs.

The distribution of the parameters of the stress-strain state and, therefore, the quality of the manufactured part depends on the location of the loading zone relative to the blank (in the center or periphery). Namely: the presence of wrinkles from the loss of shape stability, localization of thinning deformations or the location of zones and values of residual elastic deformations.

The LS Dyna software product with the implementation of the ALE method was used to simulate the described parameters.

When developing the modeling methodology, the following was used::

- possibilities of the DYNAIN approach, which is used in the modeling of multi-stage tool stamping;
- thermal model of the electrohydraulic effect;
- finite element discretization by spatial variables in Euler and Lagrangian spaces (ALE);
- model of contact interaction of fluid and solid deformed media FSI, as well as contact interaction with an undefined contact area;
- model of elastic unloading of a blank;

- multi-stage accumulation of residual plastic stresses and deformations, including sinking of the workpiece;
- explicit method of integrating model equations over time.

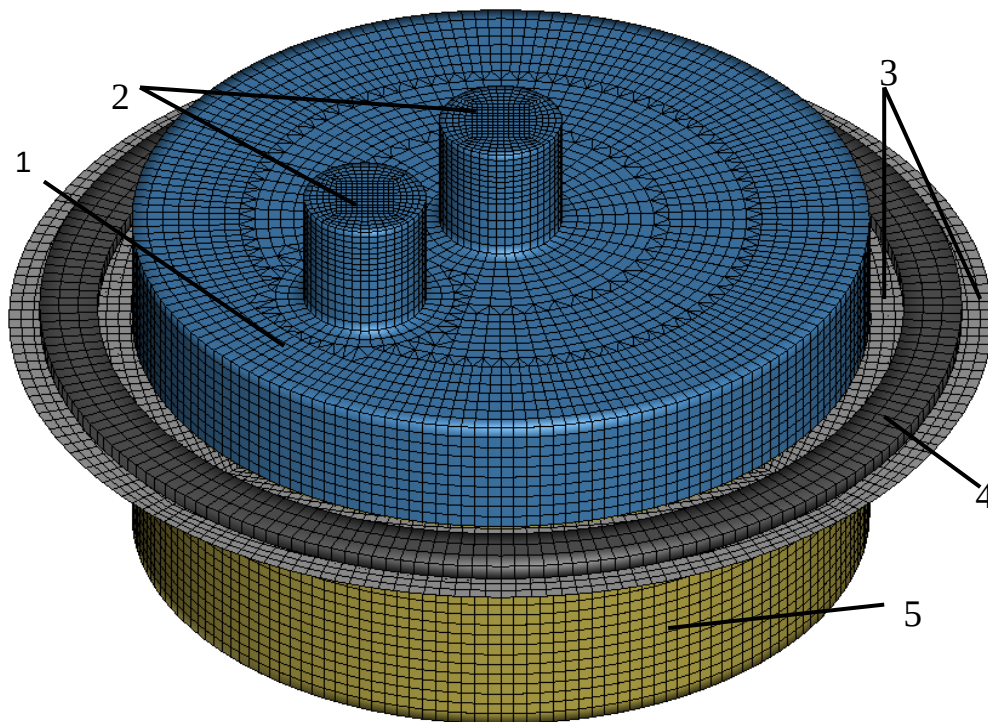


Fig. 1. General view of the system and its elements:

- 1 – chamber; 2 – immersion chambers, representing a single volume filled with process fluid,
3 – blank, 4 – clamping ring, 5 – lower cavity

Modeling the process of loading the workpiece with single discharges in the center of a blank showed the peculiarities of the time distribution of the energy applied to a blank (Fig. 2) and the energy of the entire technological system (Fig. 3).

The peculiarity of the deformation process is as follows: it can be divided into 2 stages - “active” deformation and the unloading process without external energy supply. Fig. 2 shows the time dependence of the kinetic energy of the workpiece (curve A, red line), the internal energy of a blank (curve B, green line) and the total energy of a blank (curve C, blue line). As can be seen at the time point $1.5 \mu\text{s}$, the internal energy, i.e. the work of plastic deformation, and the effective plastic deformation reach a maximum and do not change further.

The time dependence of kinetic energy has two maxima and a minimum at the time of reaching the maximum of the total energy. The presence of two maxima and a minimum of this dependence is evidence that the deformation process is oscillatory.

The energy dependence of the entire technological system over time (Fig. 3, the curve designations are the same as in Fig. 2) show that the total discharge energy after a time value of $1.5 \mu\text{s}$ monotonically decreases and only a small part of it is spent during the unloading of a blank. The unloading process is quite long (up to 3.0 ms) and to save time for the calculation, it was decided to divide it into two stages: the “active” stage and the “unloading” stage. At the last stage, the method of artificially slowing down the calculation process was used.

Fig. 4 shows the distribution of residual plastic deformations after unloading. Two clearly defined zones of increased parameter values can be observed: the central zone in the epicenter of the discharge action in the form of a circular spot with constant values (stretching in the center of the workpiece) and rings on the periphery of a blank near the pulling edge of the matrix. Such a distribution is quite acceptable in comparison with experimental data. In the monograph [2] it is shown that compressive stresses on the periphery and the corresponding compressive deformations

lead to the formation of peripheral wrinkles, which are very difficult to remove at the next stage of calibration.

When modeling the second stage of loading, the values of residual stresses and strains, displacements of the workpiece and the law of its resistance to plastic deformation were set as the initial conditions of a blank state in accordance with the values of these parameters at the first stage.

The characteristic distribution of the smallest principal stresses after unloading is shown in Fig. 5.

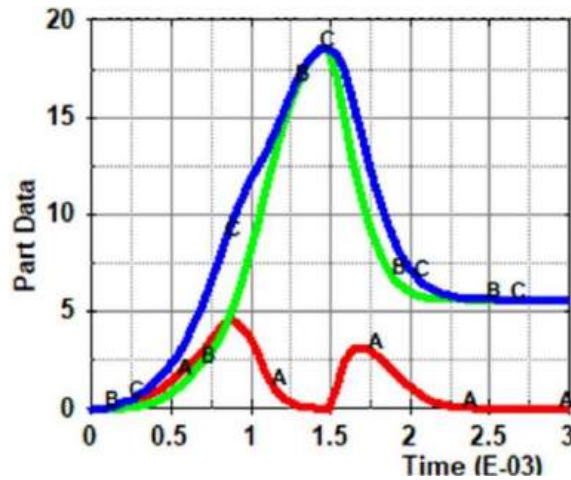


Fig. 2. Change in the energy of the workpiece over time at the first stage of deformation. Duration of thermal energy release 32 μ s

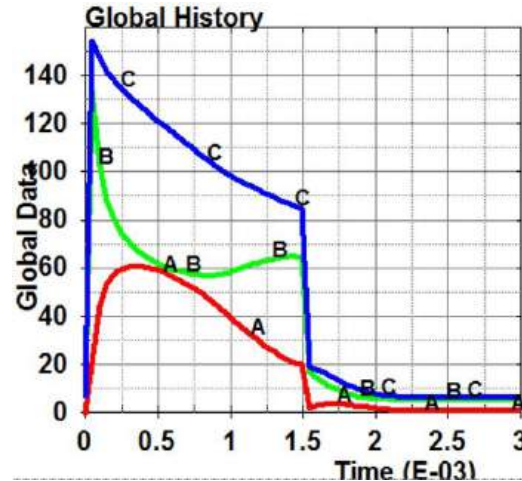
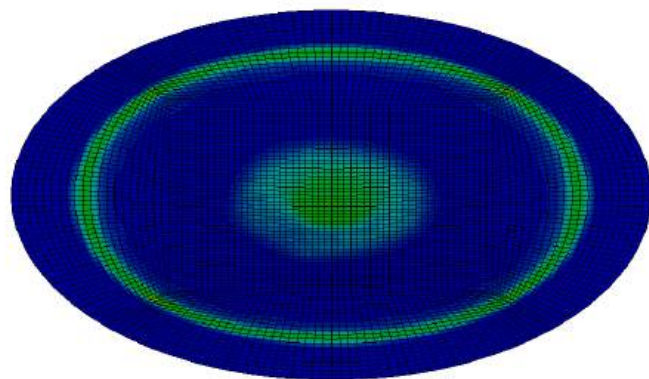


Fig. 3. Dependence of the energy of the system on time. Duration of thermal energy release 32 μ s

FIRST STAGE OF ELECTROHYDRAULIC FORMING SIMULATION VAR EHF1
Time = 0.0030001
Contours of Effective Plastic Strain
max IP. value
min=0, at elem# 120373
max=0.0134738, at elem# 126567



Effective Plastic Strain
1.347e-02
1.302e-02
1.258e-02
1.213e-02
1.168e-02
1.123e-02
1.078e-02
1.033e-02
9.881e-03
9.432e-03
8.983e-03
8.533e-03
8.084e-03
7.635e-03
7.186e-03
6.737e-03
6.288e-03
5.839e-03
5.390e-03
4.940e-03
4.491e-03
4.042e-03
3.593e-03
3.144e-03
2.695e-03
2.246e-03
1.797e-03
1.347e-03
8.983e-04
4.491e-04
0.000e+00

Fig. 4. Distribution of residual plastic deformations after unloading

In this case, a complex picture of the distribution of compressive stresses is observed. In the center, an irregularly shaped spot with minimal compressive stress is observed. The minimal negative stress values differ along the periphery and lead to a loss of shape stability.

An informative change in the magnitude and direction of the principal stress vectors at the beginning and end of the unloading process, which continues intensively for ~1.0 ms. Fig. 6 shows such a change at some points of a blank half-plane.

SECOND STAGE OF ELECTROHYDRAULIC FORMING SIMULATION

Time = 0.0025003
Contours of Minimum Principal Stress
reference shell surface
min=-7.8075e+07, at elem# 123450
max=-31.4496, at elem# 120981

Minimum Principal Stress

-3.145e+01
-3.904e+06
-7.808e+06
-1.171e+07
-1.562e+07
-1.952e+07
-2.342e+07
-2.733e+07
-3.123e+07
-3.513e+07
-3.904e+07
-4.294e+07
-4.685e+07
-5.075e+07
-5.465e+07
-5.856e+07
-6.246e+07
-6.636e+07
-7.027e+07
-7.417e+07
-7.808e+07

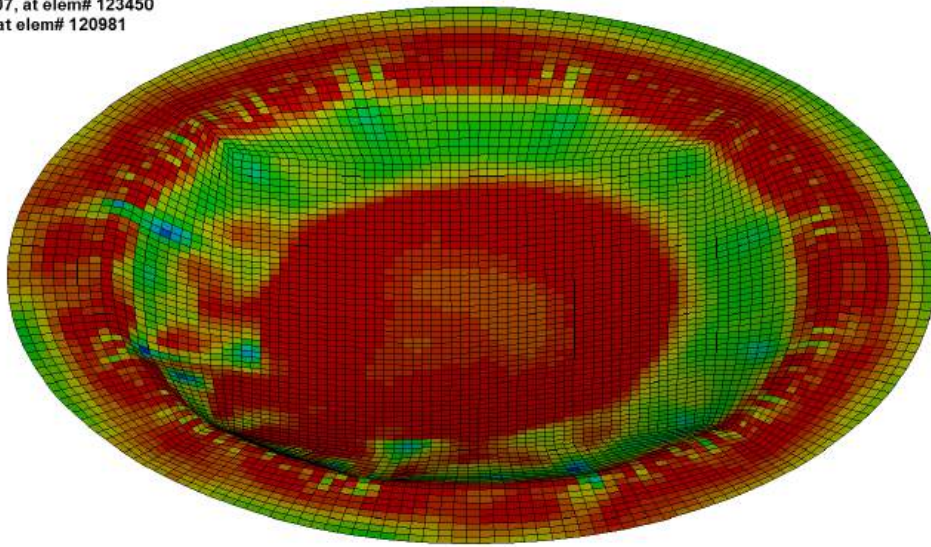


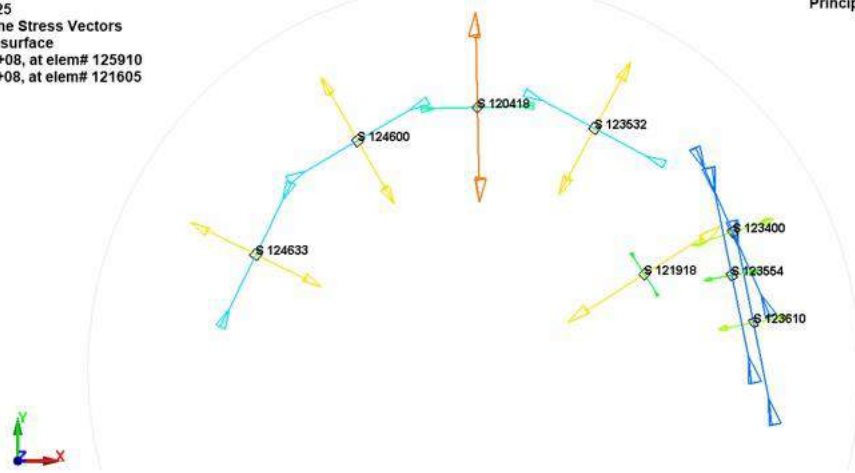
Fig. 5. Lowest principal stresses after unloading

SECOND STAGE OF ELECTROHYDRAULIC FORMING SIMULATION

Time = 0.00125
Principal In-plane Stress Vectors
reference shell surface
min=-1.99589e+08, at elem# 125910
max=2.07206e+08, at elem# 121605

Principal In-plane Stress Vectors

2.072e+08
1.665e+08
1.258e+08
8.517e+07
4.449e+07
3.809e+06
-3.687e+07
-7.755e+07
-1.182e+08
-1.589e+08
-1.996e+08



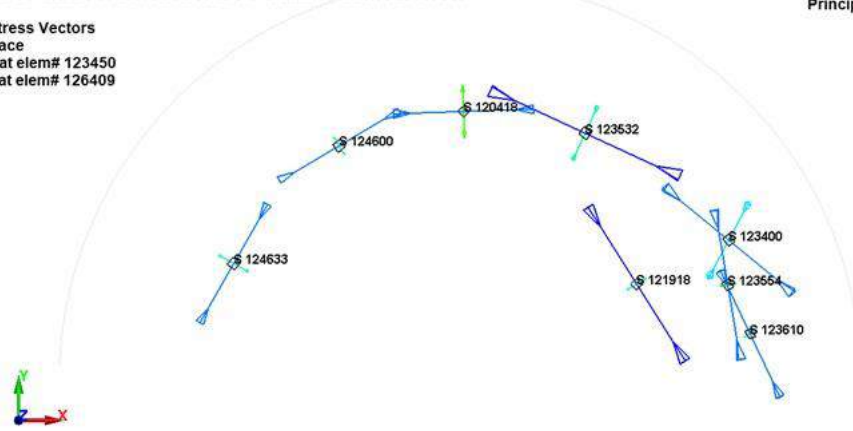
a

SECOND STAGE OF ELECTROHYDRAULIC FORMING SIMULATION

Time = 0.0025003
Principal In-plane Stress Vectors
reference shell surface
min=-7.80681e+07, at elem# 123450
max=1.10459e+08, at elem# 126409

Principal In-plane Stress Vectors

1.105e+08
9.161e+07
7.275e+07
5.390e+07
3.505e+07
1.620e+07
-2.657e+06
-2.151e+07
-4.036e+07
-5.922e+07
-7.807e+07



b

Fig. 6. Vectors of principal stresses in the plane at the beginning (a) and at the end (b) of unloading

You can see the cardinal changes in the direction of the principal stress vectors. At a point located on the vertical radius from the load center, there was a change in the nature of the stresses from tensile at the beginning of the process to compressive at its end. In general, tangential stresses act along the entire semi-perimeter under consideration. They determine the possibility of loss of stability of a blank shape, which manifests itself in the form of radial wrinkles. The lower limit of the range of values changes quite strongly – from 200 MPa at the beginning to 780 MPa at the end.

Conclusions

1. When modeling the multi-stage loading process of the parameter calculation process, it is necessary to analyze the process of blank unloading.
2. To reduce the likelihood of loss of shape stability during the formation of round bottoms by sequential loading, the second and subsequent loading stages should be carried out in areas that touch the pull-out edge of the die.

Scientific advisor – PhD (Engineering), Ass. Prof. Igor Taranenko

References

1. Zhexin, Wang. Studying the processes of creation of high-energy submerged liquid jet and its interaction with deforming blank / W. Zhexin // Відкриті інформаційні та комп'ютерні інтегровані технології. – 2026. – № 107, С. 61-75. <https://doi:10.32620/oikit.2026.107.04>.
2. М. Є., Тараненко. Електрогідравлічне деформування металів: моделювання керованого навантаження, досвід впровадження техпроцесів : монографія / Тараненко М. Є., Нарижний О. Г., Богачьова Т. Б. – Харків : ТОВ «ДІСА ПЛЮС», 2025. – 156 с., ISBN 978-617-8688-46-2.

МОДЕЛЬ ПЕРЕМІЩЕННЯ СТРУЖКИ ІНСТРУМЕНТОМ ПРИ ФРЕЗЕРУВАННІ ПРОФІЛЬНИХ ПАЗІВ

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Україна

Однією з обов'язкових умов підвищення продуктивності та якості обробки різанням є своєчасне видалення стружки з робочої зони. Особливу актуальність видалення стружки має при фрезеруванні закритих профільних пазів (Т-подібних, типу "ластівкин хвіст"), фігурних лабіринтів і ін.

Ефективним шляхом реалізації цього механізму, поряд із застосуванням інструмента зі спеціальною геометрією, є використання напірних струменів мастильно-охолоджуючого технологічного середовища (МОТС). Одним з варіантів застосування напірних струменів для своєчасного видалення стружки з зони різання є подача МОТС по каналах різального інструмента зі стандартною геометрією. У цьому випадку подача напірних струменів МОТС здійснюється на передню поверхню зубців фрези з метою очищення простору між зубцями від скупчення і налипання відокремлених елементів стружки, чим попереджується їх повторне затягування в зону різання. Евакуація стружки може здійснюватися також напірними струменями повітря, водоповітряної суміші і т.ін.

Для визначення раціональних параметрів пристроїв видалення стружки з зони різання необхідне встановлення закономірностей процесів відокремлення, переміщення і накопичення елементів стружки при дії на них напірних струменів.

У результаті виконаних огляду літературних джерел і патентного пошуку не встановлені дослідження, що спрямовані на вивчення цих процесів при фрезеруванні закритих профільних пазів. Тому дослідження спрямовані на визначення раціональних параметрів пристроїв видалення стружки з зони різання закритих профільних пазів є актуальними.

Розглянуто процес переміщення елемента стружки після його відокремлення як результат впливу на нього напірного струменя (сили примусового видалення) і інших виникаючих у розглянутій системі сил при обробці заготовок стандартною Т-образною фрезою (пропонований тут і далі підхід до розробки математичної моделі є універсальним для обробки закритих профільних пазів різними стандартними фрезами – кінцевими, Т-подібними, кутовими й іншими).

Розроблена математична модель дозволяє виконати аналіз переміщення елемента стружки після його відокремлення зубом стандартної Т-подібної фрези у всьому стандартному діапазоні геометричних і режимних параметрів.

У дослідженому діапазоні параметрів і режимів (досліджені всі рекомендовані стандартами геометричні і режимні параметри) у 30...100 % випадків відсутнє самовидалення (без додаткового примусового видалення) стружки з простору між зубцями фрези зі стандартною геометрією. Це має наслідком високу ймовірність прояву при цьому негативних наслідків – у вигляді зниження точності і продуктивності обробки.

Для гарантованого видалення стружки з простору між зубцями стандартної фрези необхідне здійснення додаткового примусового видалення, величина якого може бути визначене за допомогою розробленої математичної моделі.

МАТЕРІАЛОЗНАВЧІ ОСОБЛИВОСТІ ПРОЄКТУВАННЯ ПОТАЙНИХ ЗАКЛЕПКОВИХ З'ЄДНАНЬ ТОНКОСТІННИХ ЕЛЕМЕНТІВ З АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Україна

У сучасному машинобудуванні заклепкові з'єднання залишаються одним із базових способів формування нерознімних вузлів у тонкостінних металевих конструкціях. Попри активне впровадження зварювальних, клейових і гібридних технологій, повна відмова від клепаання у відповідальних конструкціях не завжди є технічно доцільною.

До основних обмежень альтернативних методів з'єднання належать термічний вплив під час зварювання та чутливість клейових з'єднань до умов їх виконання. Під час зварювання високоміцних термозміцнюваних алюмінієвих сплавів систем легування Al–Cu–Mg та Al–Zn–Mg–Cu у зоні термічного впливу можуть відбуватися структурні зміни сплаву, які здатні спричиняти зниження статичної та втомної міцності з'єднання. Якість клейових з'єднань значною мірою залежить від підготовки поверхонь, температурно-вологісного режиму та тривалості полімеризації, що ускладнює технологічний процес і може знижувати стабільність їхніх експлуатаційних характеристик. Натомість заклепкові з'єднання забезпечують стабільну геометрію складання, прогнозовану несучу здатність і надійну роботу тонкостінних конструкцій за умов тривалого циклічного навантаження [1, 2].

Клепаання дає змогу з'єднувати тонколистові елементи й профілі конструкцій без температурного впливу на сплав, зі збереженням його вихідних фізико-механічних властивостей. До інших переваг цього способу належать можливість локального ремонту, придатність до автоматизації та можливість з'єднання різномірних матеріалів. Завдяки поєднанню цих властивостей заклепкові з'єднання широко застосовуються у транспортному й сільськогосподарському машинобудуванні, енергетиці та будівництві для складання корпусів, обшивок, резервуарів і легких каркасів. Особливо важливу роль вони відіграють в авіабудуванні, де використовуються для з'єднання елементів обшивки крила і фюзеляжу, а також силового набору планера [2].

Саме в авіаційній галузі сформовано найсуворіші вимоги до потайних заклепкових з'єднань, зокрема до геометричної точності отворів і потайних гнізд, маси конструкції та якості зовнішньої поверхні. Подібні вимоги висуваються й до відповідальних високонавантажених клепаних вузлів загального машинобудування, хоча обмеження щодо маси та сертифікації в цій галузі є менш суворими [1, 5].

Матеріалознавчий аналіз потайних заклепкових з'єднань доцільно проводити комплексно, розглядаючи сумісну роботу компонентів у системі «заклепка – з'єднувані елементи». Матеріал заклепки повинен мати достатню технологічну пластичність, щоб у процесі встановлення без руйнування заповнювати радіальний зазор між стрижнем заклепки та стінкою отвору й забезпечувати формування замикаючої головки заданої геометрії. Матеріал з'єднуваних елементів має чинити достатній опір локальному зминанню в зоні отвору й потайного гнізда, зменшуючи ризик утворення люфту та локального пошкодження з'єднання під навантаженням. Тому під час вибору матеріалів необхідно враховувати не лише їхні індивідуальні механічні характеристики, а й електрохімічну сумісність, корозійну стійкість та особливості контактної взаємодії й тертя [1, 15, 16].

У сучасній промисловості для виготовлення компонентів заклепкових з'єднань застосовують конструкційні та корозійностійкі сталі, титанові й нікелеві сплави, а також полімерні композиційні матеріали [3–6, 13, 14]. Проте з огляду на спрямованість роботи на

подальше проектування нових потайних алюмінієвих заклепок розгляд обмежено парами, у яких заклепка та з'єднувані елементи виготовлені з алюмінієвих сплавів.

Метою роботи є систематизація алюмінієвих сплавів для заклепок і з'єднуваних елементів як матеріалознавчої основи для подальшого проектування нових конструкцій потайних заклепок та формування раціональних пар матеріалів у системі «заклепка – з'єднувані елементи». Оцінювання лише матеріалу заклепки є методологічно недостатнім, оскільки працездатність з'єднання визначається сумісною роботою всіх його компонентів. З огляду на це аналіз сплавів структуровано за двома взаємопов'язаними напрямками.

Напрямок I – матеріали з'єднуваних елементів. Передбачає дослідження властивостей листів, профілів, обшивок і кронштейнів, які безпосередньо сприймають та перерозподіляють експлуатаційні навантаження.

Напрямок II – матеріали заклепок. Передбачає аналіз напівфабрикатів для холодного висаджування – дроту та прутків, оцінювання їхнього стану постачання, режимів термічної обробки та здатності забезпечувати стабільне пластичне формоутворення замикаючої головки [6, 7].

За результатами аналізу алюмінієві сплави вітчизняної та зарубіжної номенклатури систематизовано за системою легування, термічним станом, механічними й технологічними властивостями та функціональним призначенням у заклепковому з'єднанні. Для з'єднуваних елементів додатково враховано опір локальному зминанню, тріщиностійкість і втомну довговічність, а для матеріалів заклепок – технологічну пластичність, опір зрізу та стабільність формування замикаючої головки. Такий підхід дає змогу обирати матеріали відповідно до заданих умов виготовлення й експлуатації з'єднання [1, 6, 8–12, 19, 20].

Для високонавантажених силових з'єднань основний інтерес становлять термозміцнювані сплави системи Al–Cu–Mg, що поєднують високу несучу здатність із достатніми ресурсними характеристиками. У вузлах із підвищеними вимогами до корозійної стійкості та зниження ризику гальванічної корозії доцільно застосовувати матеріали системи Al–Mg. Сплави систем Al–Mg–Si, Al–Cu–Li та Al–Zn–Mg–Cu, літєвмісні сплави, а також спеціальні матеріали для роботи за підвищених температур розглянуто як перспективні напрями, що потребують додаткового технологічного й матеріалознавчого обґрунтування [18].

На основі аналізу нормативної бази сплави для виготовлення заклепок диференційовано за такими функціональними групами:

- низькоміцні високопластичні матеріали – АМц, АА 1050А-Н14, АА 1100-Ф;
- базові пластичні матеріали системи Al–Cu–Mg – В65, Д18, АА 2117 у станах Т4 і Т42;
- матеріали підвищеної міцності системи Al–Cu–Mg – Д16П, Д19П, АА 2017А у станах Н13, Т4 і Т42, АА 2017-Т4, АА 2024-Т4;
- матеріали системи Al–Mg–Si середньої міцності – АА 6061-Т6, АА 6053-Т6, АА 6151-Т6;
- матеріали для з'єднань із підвищеними вимогами до корозійної сумісності – АМг5П, АА 5056-Н32, АА 5056А-Н32;
- високоміцні матеріали системи Al–Zn–Mg–Cu – В94, АА 7050-Т73;
- матеріали для з'єднань, що працюють за підвищених температур, – Д19П, АА 2219 у станах Т62 і Т81.

Наведені групи частково перетинаються, оскільки окремі сплави можуть поєднувати кілька функціонально важливих властивостей. Зокрема, сплав Д19П належить до матеріалів підвищеної міцності та водночас може застосовуватися у з'єднаннях, що працюють за підвищених температур, після уточнення допустимого температурного діапазону й технологічних умов його використання.

На основі виконаної систематизації сформовано основні пари матеріалів, рекомендовані для подальшої експериментально-розрахункової перевірки:

- базові силові пари системи Al–Cu–Mg – B65 або D18 із D16, D16ч чи D16AT; зарубіжні поєднання – AA 2117-T4/T42 із AA 2024-T3/T4;
- ресурсно орієнтовані пари системи Al–Cu–Mg – B65 або D18 зі сплавами 1163 і 1161; зарубіжні поєднання – AA 2117-T4/T42 зі сплавами AA 2124, AA 2224 і AA 2324;
- корозійно сумісні пари системи Al–Mg – AMg5П із AMg5 або AMg6; зарубіжні поєднання – AA 5056-H32 або AA 5056A-H32 із AA 5052, AA 5083 чи AA 5086.

Високоміцні матеріали B94 і AA 7050-T73, а також сплави систем Al–Mg–Si, Al–Cu–Li та спеціальні температурні матеріали доцільно розглядати як перспективні для формування нових пар. Їх застосування потребує додаткового оцінювання технологічної пластичності матеріалу заклепки, корозійної сумісності компонентів, стану напівфабрикату та працездатності сформованого з'єднання за заданих умов навантаження.

Для попереднього кількісного зіставлення матеріалів узагальнено їхні основні фізико-механічні характеристики: густину, границю міцності, модуль пружності, питому міцність і питому жорсткість, а для матеріалів заклепок – також опір зрізу. Ці характеристики можуть слугувати первинними орієнтирами під час вибору матеріалів, проте не дають повного опису їхньої поведінки в процесі клепання.

Для чисельного моделювання необхідно використовувати криві деформацій у координатах «істинне напруження – істинна пластична деформація», визначені для конкретного сплаву та його термічного стану з урахуванням можливого розкиду механічних властивостей [5, 17]. Особливо важливим є достовірний опис матеріалу заклепки, який під час її встановлення зазнає значного пластичного деформування. Так для сплаву AA 2117-T4 у роботах [15, 16] параметри моделі матеріалу визначали за результатами випробувань на осаджування та уточнювали шляхом зіставлення чисельних і експериментальних даних.

Висновки. Виконана систематизація алюмінієвих сплавів формує матеріалознавчу основу для подальшого проектування нових конструкцій потайних заклепок і вибору раціональних пар матеріалів у системі «заклепка – з'єднувані елементи». Сформовані функціональні групи та основні поєднання матеріалів можуть бути використані для розроблення програми експериментальних досліджень, чисельного моделювання процесу встановлення заклепки й подальшої роботи з'єднання під навантаженням, а також оцінювання технологічності, несучої здатності та ресурсу розроблюваних конструкцій.

Список використаних джерел

1. Осташ О. П. Міцність і довговічність авіаційних матеріалів та елементів конструкцій / О. П. Осташ, В. М. Федірко, В. М. Учанин [та ін.] // Механіка руйнування та міцність матеріалів : довід. посіб. Т. 9 / за заг. ред. В. В. Панасюка ; НАН України, Фіз.-мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка. – Львів : Сполом, 2007. – 1068 с.
2. Пригунова А. Г. Конструкційні алюмінієві сплави систем Al–Cu–Mg і Al–Zn–Mg–Cu в літакобудуванні. Огляд / А. Г. Пригунова, А. В. Недужий // Процеси лиття. – 2023. – № 1. – С. 54–73. DOI: 10.15407/plit2023.01.054.
3. Aluminum and Aluminum Alloys : ASM Specialty Handbook / ed. J. R. Davis. – Materials Park, OH : ASM International, 1993. – 784 p.
4. ASM Handbook. Vol. 2 : Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials / ASM International Handbook Committee. – 10th ed. – Materials Park, OH : ASM International, 1990. – 1328 p.
5. Metallic Materials Properties Development and Standardization (MMPDS) Handbook. – MMPDS-2025. Vol. I–II. – Columbus, OH : Battelle Memorial Institute, 2025.
6. ASTM B316/B316M-23. Standard Specification for Aluminum and Aluminum-Alloy Rivet and Cold-Heading Wire and Rods. – West Conshohocken, PA : ASTM International, 2023.
7. ASTM B565-20. Standard Test Method for Shear Testing of Aluminum and Aluminum-Alloy Rivets and Cold-Heading Wire and Rods. – West Conshohocken, PA : ASTM International, 2020.

8. EN 2115:2009. Aerospace series – Aluminium alloy 2117-T42 – Wire for solid rivets – $D \leq 10$ mm. – Brussels : European Committee for Standardization, 2009.
9. EN 2116:2009. Aerospace series – Aluminium alloy 2017A-T42 – Wire for solid rivets – $D \leq 10$ mm. – Brussels : European Committee for Standardization, 2009.
10. EN 2117:2009. Aerospace series – Aluminium alloy AL-P5056A (5056A)-H32 – Wire for solid rivets – $D \leq 10$ mm. – Brussels : European Committee for Standardization, 2009.
11. EN 2556:1992. Aerospace series – Rivets, solid, 100° normal countersunk head with dome, in aluminium alloy 5056A, anodized or chromated, inch based series. – Brussels : European Committee for Standardization, 1992.
12. EN 3115:2009. Aerospace series – Aluminium alloy 7050-T73 – Wire for solid rivets – $D \leq 10$ mm. – Brussels : European Committee for Standardization, 2009.
13. Godwin E. W. A review of the strength of joints in fibre-reinforced plastics. Part 1: Mechanically fastened joints / E. W. Godwin, F. L. Matthews // Composites. – 1980. – Vol. 11, No. 3. – P. 155–160. DOI: 10.1016/0010-4361(80)90008-7.
14. Galińska A. Mechanical joining of fibre reinforced polymer composites to metals – A review. Part II: Riveting, clinching, non-adhesive form-locked joints, pin and loop joining / A. Galińska, C. Galiński // Polymers. – 2020. – Vol. 12, No. 8. – Art. 1681. DOI: 10.3390/polym12081681.
15. Silveyeh Z. Deformation behavior of aluminum alloy rivets for aerospace applications / Z. Silveyeh, M. Brillinger, J. Domitner // Journal of Materials Research and Technology. – 2024. – Vol. 33. – P. 3482–3491. DOI: 10.1016/j.jmrt.2024.09.259.
16. Martínez H. V. Constitutive model of the alloy 2117-T4 at low strain rates and temperatures / H. V. Martínez, D. Coupard, F. Girot // Journal of Materials Processing Technology. – 2006. – Vol. 173, No. 3. – P. 252–259. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2005.05.056.
17. Lesuer D. R. Experimental investigations of material models for Ti-6Al-4V titanium and 2024-T3 aluminum / D. R. Lesuer. – Report DOT/FAA/AR-00/25. – Washington, DC : U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration, 2000.
18. Aluminum-Lithium Alloys : Processing, Properties, and Applications / eds. N. Eswara Prasad, A. A. Gokhale, R. J. H. Wanhill. – Oxford : Butterworth-Heinemann, 2014. – 608 p.
19. EN 2114:2009. Aerospace series – Aluminium alloy 1050A-H14 – Wire for solid rivets – $D \leq 10$ mm. – Brussels : European Committee for Standardization, 2009.
20. Hatch J. E. (ed.) Aluminum: Properties and Physical Metallurgy. Metals Park, OH, American Society for Metals, 1984. 424 p.

ПАРАМЕТРИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НЕСУЧОЇ СИСТЕМИ ДВОКООРДИНАТНОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО ВЕРСТАТА

Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, Україна

Несуча система технологічного верстата визначає взаємне положення його виконавчих органів, сприймає статичні та динамічні навантаження, передає їх до опорної поверхні й забезпечує збереження заданої геометрії робочої зони. Для двокоординатного обладнання особливого значення набуває точність взаємного розташування напрямних, опор обертального вузла та елементів кріплення приводів. Деформації основи, стояків або напрямної балки змінюють положення керованих координат навіть за відсутності помітної похибки в системі числового програмного керування.

Традиційне проектування металоконструкції часто ґрунтується на послідовному виборі профілів, визначенні основних розмірів і подальшій перевірці вже сформованої конструкції. За такого підходу зміна робочого ходу, маси рухомого вузла або способу встановлення обладнання потребує значного перероблення тривимірної моделі. Частина параметрів залишається не пов'язаною між собою, тому коригування одного розміру може спричинити порушення положення напрямних, опорних поверхонь або кріпильних отворів.

Параметричне моделювання передбачає побудову геометрії на основі системи взаємопов'язаних розмірів і конструктивних залежностей. Основні характеристики верстата задаються як керовані параметри, а похідні розміри автоматично перебудовуються після їх зміни. Це дозволяє формувати серію конструктивних варіантів у межах однієї базової моделі та порівнювати їх за масою, жорсткістю, максимальними переміщеннями й динамічними характеристиками.

У сучасних дослідженнях конструктивну оптимізацію верстатного обладнання пов'язують із одночасним урахуванням статичної та динамічної жорсткості, маси рухомих елементів і енергетичних витрат. Зміна геометричних параметрів несучих деталей дозволяє знизити матеріаломісткість без погіршення їхньої працездатності [1]. Під час удосконалення конструкцій верстатів також застосовують скінченноелементний аналіз і топологічну оптимізацію, порівнюючи напруження, деформації, власні частоти та масу окремих вузлів [2].

Метою роботи є розроблення структури параметричної моделі несучої системи двокоординатного технологічного верстата та визначення конструктивних параметрів, які найбільше впливають на її статичну жорсткість, масу і стабільність взаємного положення виконавчих органів.

Розглянутий верстат має дві керовані координати: поступальне переміщення робочої каретки вздовж напрямної та обертання другого виконавчого органу. Несуча система об'єднує основу, опорні елементи, поздовжню напрямну конструкцію, кронштейни приводів, корпуси підшипникових опор і монтажні поверхні. Конкретне технологічне призначення обладнання не впливає на загальну структуру моделі, оскільки основними вхідними даними є робочі ходи, розміри виконавчих вузлів, діапазон швидкостей, маса рухомих частин і зовнішні навантаження.

Початковим елементом параметричної моделі є компоновальна схема, що визначає положення осей, робочу зону та габаритні обмеження. Від неї формуються базові площини, осьові лінії та монтажні поверхні. Геометрія деталей несучої системи прив'язується не до випадково вибраних граней окремих елементів, а до спільної системи координат. Така побудова зберігає цілісність моделі під час зміни довжини основи, висоти осі обертання або ходу каретки.

Параметри моделі поділено на чотири групи:

- 1) компоновальні параметри, що задають робочу зону та взаємне положення виконавчих органів;
- 2) геометричні параметри несучих елементів;
- 3) приєднувальні параметри напрямних, приводів і підшипникових опор;
- 4) розрахункові параметри, пов'язані з матеріалом, масою вузлів і навантаженнями.

Основні параметри, включені до моделі, наведено в таблиці 1. Параметри робочої зони прийнято первинними. Довжина основи формується з урахуванням заданого ходу, габаритів каретки, кінцевих положень і технологічних зазорів. Положення опор обертового вузла визначається висотою його осі та приєднувальними розмірами корпусів. Відстань між опорами прямої системи пов'язана з довжиною робочої зони, але може змінюватися в установленому діапазоні для пошуку більш жорсткої компоновки.

Таблиця 1. Керовані параметри несучої системи верстата

Група	Керовані параметри	Конструктивний вплив
Робоча зона	Хід каретки, довжина зони переміщення, висота осі обертання	Визначають габарити та взаємне положення вузлів
Основа	Довжина, ширина, висота профілю, товщина стінки	Впливають на загальну жорсткість і масу
Опорна система	Відстань між опорами, висота стояків, поперечний переріз	Визначають прогини та кутові переміщення
Напрямний вузол	Довжина прольоту, відстань між напрямними, положення каретки	Впливають на деформації в різних положеннях робочого органу
Підсилення	Кількість, товщина та положення ребер	Змінюють локальну жорсткість і власні частоти
Монтажні елементи	Товщина плит, розміри кронштейнів, положення отворів	Визначають жорсткість приєднання приводів і опор
Матеріал	Модуль пружності, густина, коефіцієнт Пуассона	Впливає на деформації, напруження та масу

Окремий блок параметрів описує поперечні перерізи металоконструкції. Для основи та стояків можуть використовуватися прямокутні замкнені профілі, зварні коробчасті елементи або складені конструкції з листового матеріалу. У моделі змінюються висота й ширина перерізу, товщина стінки та геометрія внутрішніх підсилень. Перехід на профіль більшої висоти часто забезпечує помітніше підвищення згинальної жорсткості, ніж рівномірне збільшення товщини всіх стінок. Надмірне збільшення товщини підвищує масу та вартість конструкції, але не завжди усуває локальні деформації в місцях установлення напрямних або кронштейнів.

Ребра жорсткості включено до моделі як окремі параметричні елементи. Їх положення задається відносно зон передавання навантаження, монтажних плит і опорних поверхонь. Розміщення ребер лише з рівномірним кроком не завжди є раціональним. Більший ефект очікується від підсилення ділянок, через які проходить основний силовий потік від виконавчого органу до опор верстата.

Параметрична модель повинна зберігати технологічність конструкції. Зміна розмірів не має створювати замкнені порожнини, недоступні зварні шви, перетин деталей або недостатні відстані між кріпильними отворами. Для цього введено обмеження на мінімальну товщину стінок, граничні співвідношення розмірів профілів, відстані від отворів до країв і зазори для монтажу приводів.

Оцінювання конструктивних варіантів передбачає використання скінченноелементної моделі. Після перебудови геометрії автоматично оновлюються масові характеристики та розрахункова сітка. Для матеріалу задаються модуль пружності, густина і коефіцієнт

Пуассона. Зварні з'єднання на початковому етапі можуть моделюватися як жорстко зв'язані поверхні. Контактні та болтові з'єднання доцільно деталізувати після вибору основної конфігурації.

Для перевірки несучої системи сформовано кілька розрахункових положень каретки. Перше відповідає її розташуванню поблизу опори, друге – середній частині напрямної, третє – крайньому робочому положенню. Це потрібно через залежність деформацій від поточної координати рухомого вузла. Конструкція, достатньо жорстка в одному положенні каретки, може мати значно більші переміщення в іншій частині робочої зони.

Навантаження поділено на постійні та змінні. До постійних належать власна вага несучої системи, маса приводів, напрямних, каретки та обертального вузла. Змінні навантаження утворюються силами, що діють на виконавчі органи, а також інерційними силами під час розгону і гальмування. Для попереднього розрахунку достатньо розглядати найбільш несприятливі напрями дії навантажень та їх комбінації.

Розрахункові випадки наведено в таблиці 2. Основним показником прийнято не абсолютне переміщення окремої точки конструкції, а зміну взаємного положення двох виконавчих органів. Рівномірне зміщення всієї системи відносно фундаменту може майже не впливати на траєкторію руху. Значно небезпечнішими є прогин напрямної, поворот опорної плити та зміщення осі обертання відносно траєкторії каретки.

Таблиця 2. Розрахункові випадки для перевірки несучої системи

Випадок	Положення каретки	Прикладене навантаження	Контрольований результат
1	Біля початкової опори	Власна вага вузлів	Початкове геометричне зміщення
2	Середина робочого ходу	Вага та вертикальна сила	Максимальний прогин напрямної
3	Крайнє положення	Вага та поперечна сила	Перекид і кутове переміщення
4	Довільне положення	Поздовжня інерційна сила	Деформація кріплень привода
5	Середина робочого ходу	Комбіноване навантаження	Відносне зміщення виконавчих органів

Під час аналізу результатів контролюються максимальні переміщення, еквівалентні напруження, кутові деформації, маса конструкції та перша власна частота. Напруження потрібні для перевірки міцності, однак для верстатної системи граничний стан часто визначається не руйнуванням, а втратою точності через пружні переміщення. Конструкція може мати значний запас міцності й водночас недостатню жорсткість.

Власні частоти характеризують схильність системи до коливань. Зменшення маси без контролю жорсткості може знижувати частоти окремих форм коливань, а локальне підсилення не завжди покращує динаміку всього верстата. У дослідженнях верстатних конструкцій статичний і модальний аналіз поєднують, оскільки оптимізація лише за одним показником може погіршити інші характеристики [1, 2].

Запропонована структура моделі передбачає послідовний параметричний аналіз. На першому етапі змінюється один параметр за незмінних інших характеристик. Це дозволяє оцінити його окремих вплив на масу й деформації. На другому етапі формуються комбінації найбільш впливових параметрів. Для кожного варіанта автоматично визначаються масові характеристики, виконується статичний розрахунок і зберігаються контрольовані показники.

Початкову серію доцільно формувати за параметрами висоти профілю основи, відстані між опорами, товщини монтажних плит і положення ребер жорсткості. Ці параметри змінюють силову схему конструкції та безпосередньо впливають на відносне положення виконавчих органів. Товщину допоміжних кожухів, розміри ненавантажених кронштейнів і

другорядні фаски можна виключити з параметричного дослідження, оскільки вони збільшують кількість варіантів без помітного впливу на жорсткість.

За результатами структурного аналізу визначено ділянки, які потребують першочергової перевірки: середня частина довгої прямої, місця з'єднання стояків з основою, монтажні поверхні під підшипникові опори та кронштейни приводів. Для них потрібно контролювати не тільки локальне переміщення, а й поворот поверхні. Невеликий кутовий перекид на значній відстані від точки кріплення здатний створити помітне зміщення робочої координати.

Параметрична модель дозволяє також формувати типорозмірний ряд обладнання. Збільшення робочого ходу не зводиться до простого подовження основи. Одночасно потрібно переглядати переріз прямої конструкції, відстань між опорами, кількість підсилень і характеристики рухомих вузлів. Взаємозв'язок цих параметрів у єдиній моделі скорочує кількість ручних операцій і зменшує ризик появи конструктивних невідповідностей.

Перевірка геометричної точності готового верстата має охоплювати прямолінійність переміщення, паралельність і перпендикулярність функціональних осей, а також стабільність геометрії за різних положень рухомих вузлів. Загальні методи випробування геометричної точності верстатів за умов холостого ходу або квазістатичного навантаження визначені ISO 230-1:2012 [3]. Стандарт може використовуватися під час формування програми подальшої експериментальної перевірки розробленої конструкції.

Розроблена структура параметричної моделі охоплює компоновальні, геометричні, приєднувальні та розрахункові характеристики несучої системи. Її застосування дозволяє швидко перебудовувати конструкцію після зміни робочого ходу або габаритів виконавчих вузлів, автоматично формувати розрахункові варіанти та порівнювати їх за єдиною системою показників.

Рациональний варіант несучої системи повинен забезпечувати мінімальні відносні переміщення керованих координат за допустимої маси та достатніх власних частот. Найбільшу увагу під час подальших розрахунків необхідно приділити висоті несучих профілів, довжині прольотів, розташуванню опор і підсиленню зон передавання навантажень. Розвиток моделі передбачає автоматизоване формування серії конструктивних варіантів, скінченноелементний розрахунок кожного варіанта та експериментальну перевірку вибраної конфігурації.

Список використаних джерел

1. Structural design optimization of moving component in CNC machine tool for energy saving / Q. Ji, C. Li, D. Zhu [et al.] // *Journal of Cleaner Production*. – 2020. – Vol. 246. – Art. 118976. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.118976.
2. Lin, S. Y. Structure design improvement and stiffness reinforcement of a machine tool through topology optimization based on machining characteristics / S. Y. Lin, C. H. Chang // *Applied Sciences*. – 2024. – Vol. 14, No. 1. – Art. 61. – DOI: 10.3390/app14010061.
3. ISO 230-1:2012. Test code for machine tools. Part 1: Geometric accuracy of machines operating under no-load or quasi-static conditions. – 3rd ed. – Geneva : International Organization for Standardization, 2012. – 160 p.

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗНОШУВАННЯ ДВООПУКЛО-ВВІГНУТИХ ЗУБЦІВ КОНІЧНИХ ПЕРЕДАЧ

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут»

В останні роки з метою підвищення надійності редукторів важконавантажених машин застосовують конічні зубчасті передачі із двоопукло-ввігнутими зубцями (ДОВ-зубцями). Однак, якщо дослідженню роботи зубців циліндричних і конічних передач приділяється велика увага, то конічні передачі з ДОВ-зубцями є недостатньо вивченими.

В даній роботі виконувалося дослідження зношування зубців на базі аналізу зачеплення конічної зубчастої передачі важконавантажених машин. Робота зі збору інформації про зношування зубців в експлуатаційних умовах проводилася таким чином: 1. Редуктори приводів важконавантажених машин після відпрацювання певного нормами експлуатації терміну, або у разі виходу машини з ладу, надходили для капітального ремонту; 2. Після проведення розбирання редуктора вироблялося виготовлення зліпків западини між зубцями.

Для отримання зліпків на підготовлену поверхню западини між зубцями заливався дрібнодисперсний гіпсовий розчин. Після затвердіння розчину проводився знімання зліпка. У обов'язковому порядку зліпок маркувався спеціальним шифром для його наступної ідентифікації. Для надійності вимірювань виготовлялися зліпки двох-трьох западин між зубцями.

В даний час є ряд методів вимірювання розмірів поверхонь тривимірних об'єктів, але вони часто вимагають складного та дорогого обладнання. На відміну від циліндричних коліс, конічні колеса з ДОВ-зубцями мають складну просторову форму, тому виникає безліч складностей при виконанні подальшої обробки загальновідомими методами. Однак є і простіші системи для збирання тривимірних даних. Так, у цій роботі було визначено координати зношеної поверхні зуба методом лазерного сканування.

Кількість досліджуваних приводів, для шестерень і зубчастих коліс яких виготовлялися зліпки западин між зубцями, становила 15 штук. Приклад тривимірного графіка розподілу зносу по довжині і висоті зуба шестерні і колеса, отриманого експериментальним шляхом, представлений на рис.1.

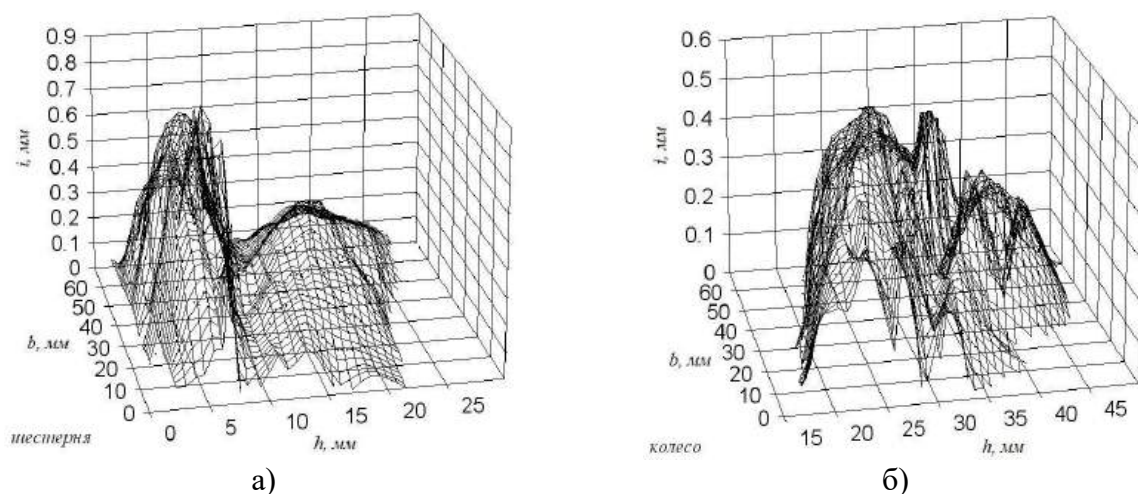


Рис. 1. Приклад розподілення зносу i по довжині b і висоті зуба h :
а) – шестерня; б) – колесо

МЕТОД ПРОЄКТУВАННЯ КОМПОЗИТНИХ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Україна

У сучасному світі науки і техніки все більше набирають масштаби нові матеріали, що використовуються в різних сферах, особливо це стосується космонавтики та авіабудування.

До них відносяться композитні матеріали (КМ), що мають більшу міцність по відношенню до традиційних конструкційних матеріалів і сплавів. Таким чином, виникає потреба у розрахунку конструкцій та їх елементів, виготовлених із композитних матеріалів у CAD/CAE системах.

Більшість розрахунків на міцність використовують однорідні (ізотропні) матеріали, властивості яких не залежать від їхнього просторового становища в системі координат. Для розрахунку композитних матеріалів необхідний інший підхід.

Метою роботи є розробка методу проєктування композитних елементів конструкцій за допомогою сучасних CAD/CAE систем, зокрема програмного комплексу ANSYS.

1. Розробка моделі композитного матеріалу для розрахунку структури намотування елементів конструкцій

Однією з основних моделей композиційних матеріалів, що застосовуються для розрахунку конструкцій на міцність та їх проєктування, є гетерогенна модель.

Гетерогенна модель композиційних матеріалів - заснована на поданні матеріалу у вигляді впорядковано або випадково розташованих в ізотропній матриці армуючих ізотропних волокон з їх ідеалізованою взаємодією (рис. 1). При цьому волокна, як правило, є паралельними один одному.

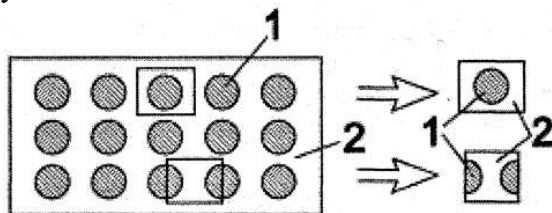


Рис. 1. Гетерогенна модель композиційного матеріалу: 1 – волокно, 2 – матриця

Фізико-механічні характеристики композиційних матеріалів виражаються через властивості матриці та волокна, об'ємний вміст, розмір волокон та інші мікроструктурні параметри. Ця модель дозволяє прогнозувати властивості композиційних матеріалів за характеристиками компонентів.

Таким чином для розрахунку одношарового елемента з односпрямованого КМ необхідно знати фізико-механічні властивості матриці та волокна та їх об'ємний вміст у КМ.

Для проєктування елементів трубчастої форми, була обрана модель КМ з напрямком волокон вздовж осі Z для поздовжнього шару, з використанням декартової або циліндричної СК, і вздовж осі Y (навколо осі Z) для кільцевого шару, з використанням циліндричної СК (рис. 2).

При розрахунку КМ в ANSYS одна з необхідних умов – визначення моделі та завдання властивостей матеріалу. Для розрахунку було обрано ортотропний матеріал. Використовуючи цю модель матеріалу необхідно встановити ряд пружних констант: E_x , E_y , E_z – модулі пружності; μ_{xy} , μ_{yz} , μ_{xz} – коефіцієнти Пуассона; G_{xy} , G_{yz} , G_{xz} – модулі зсуву.

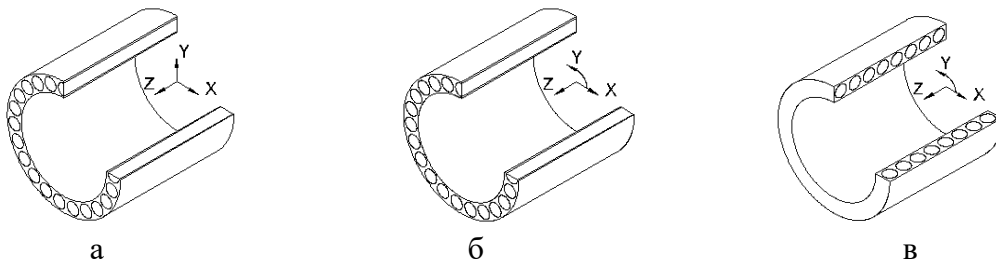


Рис. 2. Напрямок викладки шарів у СК:

- а – поздовжній шар у декартовій СК (вісь симетрії збігається з віссю Z),
 б – поздовжній шар у циліндричній СК (вісь симетрії збігається з віссю Z),
 в – кільцевий шар у циліндричній СК (вісь симетрії збігається з віссю Y)

2. Визначення пружних констант композитного матеріалу для моделювання процесу намотування

Традиційно, при виготовленні виробу з КМ, спочатку відомі пружні константи матриці та волокна, а також їх об'ємний вміст в КМ. Таким чином, для розрахунку КМ в ANSYS необхідно перейти від пружних констант елементів композиту до констант композиту в цілому.

Для односпрямованого композиту, залежно від напрямку волокон, пружні константи розраховуються за певним законом. Умовно приймаємо напрямок вздовж волокон за 1, а поперек – 2.

Модуль пружності вздовж і впоперек волокон розраховуються за формулами

$$E_1 = E_B \cdot \Theta + E_M \cdot (1 - \Theta), \quad (1)$$

де E_B – модуль пружності волокна;
 Θ – об'ємний вміст волокна;
 E_M – модуль пружності матриці.

$$E_2 = \frac{E_B \cdot E_M [E_B \cdot \Theta + E_M \cdot (1 - \Theta)]}{[E_B \cdot \Theta + E_M \cdot (1 - \Theta)] \cdot [E_M \cdot \Theta + E_B \cdot (1 - \Theta)] - \Theta \cdot (1 - \Theta) \cdot (E_B \cdot \mu_M - E_M \cdot \mu_B)^2}. \quad (2)$$

Коефіцієнт Пуассона композиту при розтягуванні вздовж і впоперек волокон визначаються відповідно

$$\mu_{12} = \mu_B \cdot \Theta + \mu_M \cdot (1 - \Theta), \quad (3)$$

де μ_B – коефіцієнт Пуассона волокна;
 μ_M – коефіцієнт Пуассона матриці.

$$\mu_{21} = \frac{E_B \cdot E_M \cdot [\mu_B \cdot \Theta + \mu_M \cdot (1 - \Theta)]}{[E_B \cdot \Theta + E_M \cdot (1 - \Theta)] \cdot [E_M \cdot \Theta + E_B \cdot (1 - \Theta)] - \Theta \cdot (1 - \Theta) \cdot (E_B \cdot \mu_M - E_M \cdot \mu_B)^2}. \quad (4)$$

Модуль зсуву в площині із властивостями ізотропної моделі матеріалу залежить від модуля пружності та коефіцієнта Пуассона і знаходиться за формулою

$$G_{ij} = \frac{E_i}{2 \cdot (1 + \mu_{ij})}, \quad (5)$$

де E_i – модуль пружності у напрямку i ;
 μ_{ij} – коефіцієнт Пуассона в напрямку j при навантаженні в напрямку i .

Модуль зсуву у всіх площинах, крім площини з властивостями ізотропної моделі матеріалу, береться як середнє значення між модулем зсуву, розрахованим виходячи з рівності зсувних деформацій і модулем зсуву, розрахованим виходячи з рівності дотичних напружень

$$G_{12} = \frac{G_{12}^D + G_{12}^H}{2}, \quad (6)$$

де G_{12}^D – модуль зсуву рівності зсувних деформацій;
 G_{12}^H – модуль зсуву рівності дотичних напружень;

$$G_{12}^D = G_B \cdot \Theta + G_M \cdot (1 - \Theta), \quad (7)$$

$$G_{12}^H = \frac{G_B \cdot G_M}{G_M \cdot \Theta + G_B \cdot (1 - \Theta)}, \quad (8)$$

де G_B – модуль зсуву волокна;
 G_M – модуль зсуву матриці.

Модулі зсуву волокна та матриці у свою чергу розраховуються за формулами

$$G_B = \frac{E_B}{2 \cdot (1 + \mu_B)}, \quad (9)$$

$$G_M = \frac{E_M}{2 \cdot (1 + \mu_M)}. \quad (10)$$

Таким чином, знаючи модулі пружності та коефіцієнти Пуассона волокна та матриці, а також об'ємний вміст волокна в КМ, можна розрахувати пружні константи шару в цілому.

Для перевірки розрахунку було написано програму в середовищі Mathcad 15.

3. Розрахунок структури композитного матеріалу малогабаритного корпусу

При навантаженні трансверсально ізотропного тіла, залежно від напрямку навантаження по відношенню до осі симетрії, коефіцієнт Пуассона може набувати трьох різних значень. Осю симетрії у разі є вісь Z , а площиною з властивостями ізотропної моделі матеріалу - площина XY . На рис. 3 та 4 зображені деформації при навантаженні.

Розрахунки, описані в [1, 2] не використовують формули для визначення коефіцієнта Пуассона і відповідно модуля зсуву в поперечному напрямку при поперечному навантаженні (в площині XY). У зв'язку з цим умовно приймаємо коефіцієнт Пуассона у площині XY рівним "0". Модуль зсуву G_{xy} у цьому випадку знаходиться за формулою (6).

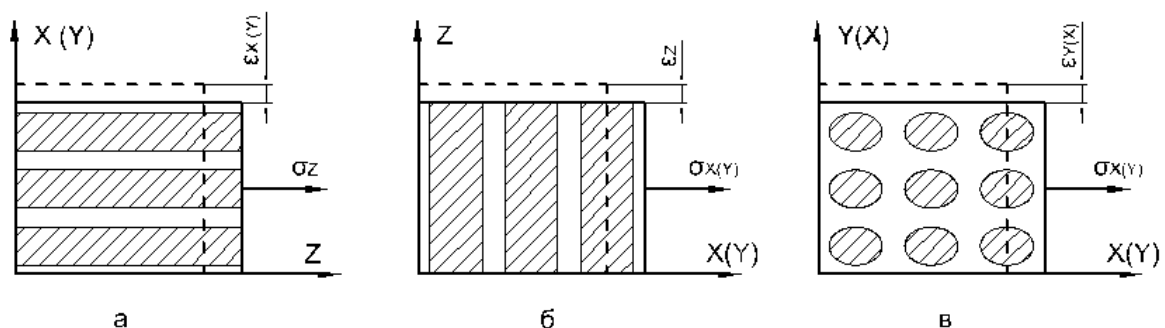


Рис. 3. Деформації шару при нормальних напруженнях: а – поперечна деформація при поздовжньому навантаженні; б – поздовжня деформація при поперечному навантаженні; в – поперечна деформація при поперечному навантаженні

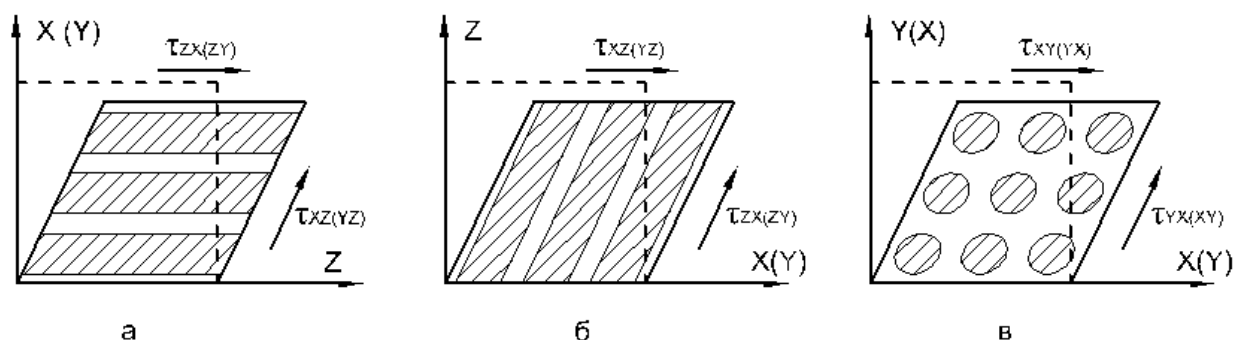


Рис. 4. Деформації шару при дотичних напруженнях: а, б – зсувна деформація у площині паралельної осі симетрії; в – зсувна деформація у площині з властивостями ізотропної моделі матеріалу

Для перевірки правильності підходу при виборі методу розрахунку було розраховано малогабаритний корпус, умовно армований шаром $[0^\circ]$ та $[90^\circ]$ щодо осі Z. По деформації малогабаритного корпусу, навантаженого внутрішнім тиском, було проведено аналіз та наочно показано роботу шарів композитного матеріалу.

Провівши обчислення за вищевикладеними формулами (5-10), в залежності від напрямку армування, були отримані чисельні значення пружних констант КМ і складена таблиця пружних констант, що задаються в розрахункових комп'ютерних системах, для поздовжнього та кільцевого шару (таблиця 1).

Таблиця 1

Пружні константи поздовжнього та кільцевого шару

Фізична величина	Позначення	Поздовжній шар $[0^\circ]$		Кільцевий шар $[90^\circ]$	
		Розрахункова величина	Значення	Розрахункова величина	Значення
Модуль пружності, МПа	E_x	E_2	9375	E_2	9375
	E_y		9375	E_1	55600
	E_z	E_1	55600	E_2	9375
Коефіцієнт Пуассона	μ_{xy}	-	0	μ_{21}	0,049
	μ_{yz}	μ_{21}	0,049	μ_{12}	0,288
	μ_{xz}		0,049	-	0
Модуль зсуву, МПа	G_{xy}	G_{xy}	4688	G_{12}	3609
	G_{yz}	G_{12}	3609		3609
	G_{xz}		3609	G_{xy}	4688

Розрахунок лейнера проводився в декартовій СК, циліндричній частині шару $[0^\circ]$ і шар $[90^\circ]$ у циліндричній СК, а навіколополюсних частин шару $[0^\circ]$ у сферичних СК.

Тестовий розрахунок проведено на малогабаритному корпусі типу «балон» (рис. 5) в програмному комплексі ANSYS методом скінченних елементів (МСЕ). Тому він був розбитий на елементи, що утворюють сітку (рис. 6).

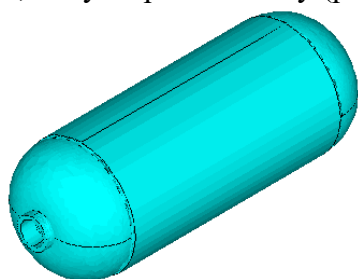


Рис. 5. Графічна модель лейнера композитного корпусу

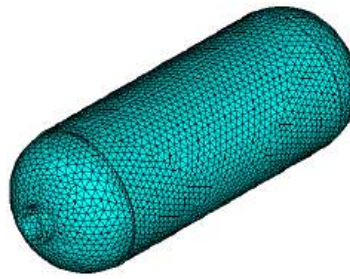


Рис. 6. Сітка для розрахунку МСЕ

В результаті розбиття було отримано 5899 вузлів та 2943 елементи. Результати розрахунку композитного корпусу, навантаженого внутрішнім тиском $P = 10$ МПа, із заданими величинами пружних констант поздовжнього шару (таблиця 1), наведено на рис. 7а. Розмір деформації для наочності збільшений у 200 разів. Одиниця виміру напруження – МПа.

Результати розрахунку композитного корпусу, навантаженого внутрішнім тиском $P = 10$ МПа, із заданими величинами пружних констант кільцевого шару (таблиця 1), наведено на рис. 7б. Для наочності деформація збільшена у 15 разів. Одиниця виміру напруження – МПа.

Після навантаження корпусу внутрішнім тиском $P = 10$ МПа наочно видно роботу шарів та лейнера. Максимальні напруження виникають у лейнері в районі переходу його циліндричної частини у сферичну і становлять 270 МПа. Напруження в шарах $[0^\circ]$ та $[90^\circ]$ становлять 23 МПа та 57 МПа відповідно.

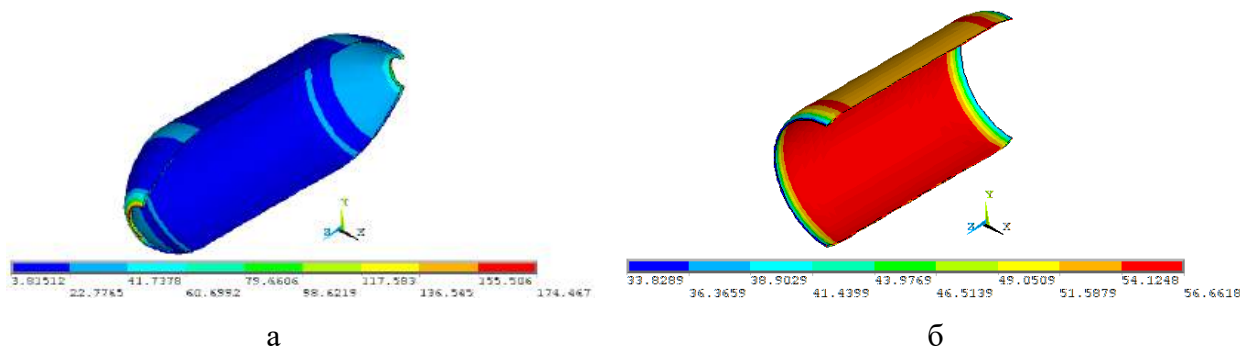


Рис. 7. Еквівалентне напруження у поздовжньому (а) та кільцевому (б) шарі КМ

Проведений розрахунок дозволяє оптимізувати конструкцію, виходячи з напружень, що допускаються, шарів КМ і лейнера, в програмному комплексі ANSYS і отримати значення структурних параметрів, що використовуються для композитного корпусу та потрібні для розробки програми намотування.

Для зменшення максимального напруження, що виникає в лейнері в районі переходу циліндричної частини в сферичну розглянуто моделюванням двозонного намотування. При намотуванні днища двома зонами напруження зменшуються, що пов'язано з формуванням більш рівномірної товщини днища.

За результатами дослідження визначено маси намотаних малогабаритних корпусів діаметром 101мм та 135мм. При зміні зон намотування з одного на три: для діаметра корпусу 101мм маса композитних шарів знизилася на 11,5%, а для діаметра 135мм на 24,6%.

Намотування малогабаритних корпусів двома зонами дозволило отримати рівномірний розподіл значень деформації в перехідній частині між днищем і центральною частиною малогабаритного корпусу, при цьому критерій масової досконалості малогабаритного корпусу збільшився в 1,5 рази.

Чисельне моделювання в CAD/CAE-системах дало підставу стверджувати, що розроблений метод придатний для моделювання силових елементів літальних апаратів, таких як балони високого тиску, труби, корпуси РДТТ, транспортно-пускові контейнери та інші корпусні конструкції на основі полімерного композиту.

Список використаних джерел

1. Malkov, Igor. The analysis of adhesion effect on properties of the modified polymeric nano composites / Igor Malkov, Gennadiy Sirovoy, Sergii Kashkarov, Igor Nepran. // TEKA, Commission of motorization and energetics in agriculture, Lublin, Poland-2012. Vol. 12 N. 4.- P. 131-134.
2. Ovcharov B.A., Plakhotnykov S.V. Test problem of modeling compression of a composite pipe element / XVII International Conference of Students and Young Scientists «Intelligence. Integration. Reliability», book of theses, National technical university of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv polytechnic institute», November 13, 2025 Kyiv, Ukraine. – P.63-65.

АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ СПІРАЛЬНОГО ФОРМУВАННЯ ТРУБ ВЕЛИКОГО ДІАМЕТРА З ПОРОЖНИСТИХ ТЕРМОПЛАСТИЧНИХ ПРОФІЛІВ

Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, Україна

Труби великого діаметра зі структурованою стінкою застосовують у системах безнапірного водовідведення, каналізації, дренажу, транспортування технічної води та спорудження резервуарів. Використання порожнистих термопластичних профілів дає змогу зменшити матеріаломісткість виробу та одночасно забезпечити необхідну кільцеву жорсткість його стінки. Для виготовлення таких конструкцій використовують поліетилен, поліпропілен та інші термопластичні матеріали, придатні до екструзійного формування і термічного з'єднання.

Спіральна технологія передбачає навивання попередньо виготовленого порожнистого профілю на формувальну оправку або обертовий барабан. Сусідні витки профілю послідовно з'єднуються з утворенням циліндричної стінки труби. Профіль подається до зони формування, нагрівається або покривається шаром розплавленого термопласту, після чого укладається на барабан, а поверхні суміжних витків зварюються вздовж лінії їх контакту [1]. Такий спосіб дає змогу виготовляти труби, діаметр яких визначається розмірами формувального обладнання, а довжина – тривалістю процесу та конструктивними можливостями виробничої лінії.

Порожнистий профіль переважно має прямокутний або близький до нього поперечний переріз. Його бічні стінки утворюють поверхні з'єднання між сусідніми витками, а внутрішня і зовнішня стінки формують відповідні поверхні готової труби. Конструкція профілю впливає не лише на масу виробу, а й на умови навивання, деформування, притискання та зварювання. Відомі конструкції передбачають різну товщину внутрішньої і зовнішньої стінок, змінні радіуси заокруглень та поздовжні ребра всередині порожнини. Це дозволяє змінювати жорсткість сформованої стінки труби без пропорційного збільшення витрати матеріалу [2].

Якість готової труби залежить від узгодження кількох послідовних операцій: екструзії та охолодження порожнистого профілю, його транспортування до формувального вузла, повторного нагрівання поверхонь, навивання на оправку, зварювання суміжних витків, притискання шва та охолодження сформованої стінки. Відхилення на будь-якій із цих операцій може проявитися у вигляді зміни діаметра, овальності, нерівномірності кроку навивання, зміщення профілю, непровару або надлишкового напливу матеріалу в зоні шва.

Метою роботи є аналіз технологічних параметрів спірального формування труб великого діаметра з порожнистих термопластичних профілів і встановлення взаємозв'язку між режимами роботи обладнання, умовами зварювання та геометричною точністю готового виробу.

Вихідним параметром технологічного процесу є геометрія порожнистого профілю. Його ширина визначає номінальний крок розташування витків, висота впливає на товщину структурованої стінки, а товщина окремих елементів поперечного перерізу – на деформативність і жорсткість профілю. Значне відхилення ширини профілю від номінального значення призводить до зміни положення наступного витка. Навіть за стабільної роботи привода похибка поступово накопичується вздовж труби та може спричинити осьове зміщення профілю або зміну ширини зварного шва. Форма бічних поверхонь повинна забезпечувати достатню площу контакту між витками. Неплощинність, викривлення або нерівномірне охолодження профілю погіршують прилягання поверхонь. У зоні зварювання при цьому виникають ділянки, на яких тиск і температура відрізняються від розрахункових. Збільшення притискного зусилля не завжди компенсує геометричні відхилення, оскільки може спричинити локальну деформацію порожнистого перерізу.

Температура профілю перед навиванням визначає його здатність згинатися за радіусом формувальної оправки. Надмірно охолоджений профіль чинить більший опір деформуванню, збільшує навантаження на механізм подачі та прагне відновити прямолінійну форму після виходу із зони притискання. Це може призвести до відриву від оправки, розкриття стику або збільшення залишкових напружень у стінці. Надмірний нагрів знижує жорсткість профілю, спричиняє сплющування порожнини та зміну висоти структурованої стінки.

Температурний стан необхідно контролювати не лише за середньою температурою профілю. Важливим є її розподіл між внутрішньою, зовнішньою та бічними поверхнями. Внутрішня частина профілю під час навивання стискається, а зовнішня розтягується. Нерівномірне нагрівання підсилює різницю деформацій і може викликати викривлення поперечного перерізу. Розташування нагрівальних пристроїв слід узгоджувати з напрямком подачі та швидкістю руху профілю, щоб поверхні встигали прогріватися без локального перегріву. Геометрія спіралі визначається взаємним рухом профілю та формувальної оправки. До основних кінематичних параметрів належать швидкість подавання профілю, частота обертання оправки, осьове переміщення формувального або притискного вузла та крок укладання витків. Ці параметри не можуть установлюватися незалежно. Збільшення частоти обертання за незмінної подачі змінює натяг профілю і положення зони контакту, а зміна швидкості осьового переміщення впливає на крок спіралі.

У сталому режимі швидкість подавання повинна відповідати окружній швидкості поверхні, на яку укладається профіль. Якщо подавання відстає, у профілі зростає розтягувальне зусилля. Це може призвести до зменшення його ширини, зміни товщини стінок і підвищеного навантаження на привод. Випередження подавання створює надлишок матеріалу перед зоною укладання, унаслідок чого профіль втрачає стійке положення, утворює хвилястість або зміщується відносно попереднього витка.

Особливе значення мають перехідні режими. Під час пуску оправка, механізм подавання, нагрівальні пристрої та зварювальний екструдер виходять на задані параметри неодноразово. Якщо подавання профілю починається до досягнення необхідної температури зварювальних поверхонь, початкова ділянка шва може мати недостатню міцність. Під час зупинення лінії залишковий розплав у зоні стику може утворювати напливи або локальні потовщення. Для зменшення таких дефектів потрібне програмне узгодження послідовності розгону, виходу на сталий режим і гальмування виконавчих механізмів.

Крок спірального укладання повинен забезпечувати задане взаємне положення бічних поверхонь профілю. За надмірного кроку між витками виникає проміжок, який доводиться заповнювати збільшеною кількістю зварювального матеріалу. Це підвищує матеріаломісткість шва, збільшує тривалість його охолодження та створює нерівномірність стінки. Недостатній крок призводить до взаємного стискання витків, зміщення профілю та утворення внутрішніх напружень. У технологічних схемах з екструзійним зварюванням розплавлений термопласт подається між суміжними витками профілю. Міцність з'єднання визначається температурою основного профілю, температурою присадного матеріалу, швидкістю його подавання, тиском у зоні контакту та часом перебування шва в нагрітому стані. Зварювальний матеріал має бути сумісним з матеріалом профілю, а його витрата – відповідати об'єму стику.

Недостатня температура поверхонь зменшує глибину взаємного проникнення полімерного матеріалу й може спричинити непровар. Надмірна температура призводить до втрати форми профілю, витікання розплаву із зони стику та термічного пошкодження матеріалу. Збільшена подача розплаву створює зовнішні й внутрішні напливи, тоді як недостатня подача залишає порожнини та неповністю заповнені ділянки шва.

Притискний пристрій повинен утримувати профіль у заданому положенні до моменту, коли міцність з'єднання стане достатньою для сприйняття технологічних навантажень. Недостатній тиск не забезпечує повного контакту поверхонь, а надмірний може деформувати порожнистий профіль і витиснути розплав зі стику. Розподіл тиску вздовж ширини профілю залежить від форми роликів, їхнього положення, жорсткості кріплення та точності налаштування.

Після зварювання стінка труби повинна охолоджуватися без порушення геометрії. Швидкість охолодження залежить від температури навколишнього середовища, властивостей матеріалу, товщини стінок профілю, розмірів шва та інтенсивності примусового обдування. Нерівномірне охолодження внутрішньої і зовнішньої поверхонь створює різні усадкові деформації та сприяє виникненню овальності.

Передчасне зняття труби з оправки може призвести до зміни діаметра під дією залишкових напружень. Надмірно тривале утримання знижує продуктивність обладнання. Момент вивільнення виробу повинен визначатися з урахуванням температури шва та жорсткості сформованої конструкції, а не лише за встановленим часом витримки.

Процес спірального формування характеризується значною кількістю взаємозалежних параметрів. Основні операції, контрольовані параметри та можливі технологічні порушення узагальнено в табл. 1.

Таблиця 1. Вплив параметрів технологічних операцій на процес спірального формування

Технологічна операція	Основні параметри	Можливі порушення
Виготовлення профілю	Ширина, висота, товщина стінок, форма перерізу	Зміна кроку навивання, нерівномірність стінки труби
Охолодження профілю	Температура, швидкість охолодження, рівномірність тепловідведення	Викривлення та залишкові деформації
Подача до оправки	Лінійна швидкість, натяг, положення профілю	Розтягування, провисання або зміщення
Нагрівання	Температура поверхонь, потужність і розташування нагрівачів	Недостатня пластичність або сплющування профілю
Навивання	Частота обертання, крок спіралі, осьове переміщення	Зазор між витками, перекриття або хвилястість
Екструзійне зварювання	Температура і витрата розплаву, швидкість зварювання	Непровар, порожнини або напливи
Притискання	Зусилля, положення і форма роликів	Неповний контакт або деформація порожнини
Охолодження труби	Температурний режим, тривалість витримки	Овальність, зміна діаметра, залишкові напруження
Зняття з оправки	Температура виробу, швидкість вивільнення	Пружне відновлення та втрата форми

Дані табл. 1 показують, що один і той самий дефект може бути спричинений різними причинами. Наприклад, проміжок між витками виникає через неправильний крок навивання, недостатню швидкість подавання або підвищений натяг профілю. Овальність може бути наслідком похибки оправки, нерівномірного охолодження або передчасного зняття труби. Виявлення дефекту лише після завершення формування не завжди дозволяє однозначно встановити його джерело.

Геометрична точність труби значною мірою залежить від конструкції обладнання. Формувальна оправка повинна мати достатню жорсткість і точність циліндричної поверхні. Радіальне биття барабана періодично змінює положення профілю та притискне зусилля. Для труб великого діаметра деформація оправки під власною вагою і масою сформованої конструкції може стати співмірною з допустимим відхиленням діаметра.

Приводи подавання та обертання повинні забезпечувати не лише задані середні швидкості, а й їх стабільне співвідношення. Коливання швидкості одного привода викликає періодичну зміну натягу та кроку спіралі. Застосування окремих нерегульованих приводів

ускладнює синхронізацію, особливо під час розгону та гальмування. Доцільним є електронне узгодження приводів із використанням зворотного зв'язку за положенням і швидкістю.

Система контролю повинна реєструвати параметри, зміна яких передують утворенню дефекту. Вимірювання лише діаметра готової труби не дозволяє своєчасно скоригувати процес. Для оперативного керування можуть використовуватися сигнали швидкості подавання, частоти обертання, натягу профілю, температури його поверхонь, температури розплаву, тиску в екструдері, положення притискних роликів і поточного діаметра виробу.

Основні контрольовані параметри та можливі дії обладнання в разі їх відхилення наведено в табл. 2.

Таблиця 2. Контрольовані параметри процесу та можливі коригувальні дії

Контрольований параметр	Інформація про стан процесу	Можлива коригувальна дія
Швидкість подавання профілю	Відповідність подавання швидкості навивання	Зміна частоти обертання привода подавання
Частота обертання оправки	Окружна швидкість формування	Узгодження з лінійною швидкістю профілю
Крок спіралі	Положення суміжних витків	Коригування осьового переміщення
Натяг профілю	Різниця швидкостей приводів, опір деформуванню	Зміна швидкості подавання або температури нагріву
Температура профілю	Здатність до згинання та зварювання	Регулювання потужності нагрівачів
Температура розплаву	Стан присадного матеріалу	Зміна температури зон екструдера
Тиск у зварювальному екструдері	Стабільність подавання розплаву	Коригування частоти обертання шнека
Зусилля притискання	Умови контакту суміжних витків	Зміна положення або навантаження роликів
Поточний діаметр труби	Геометрична точність процесу	Коригування положення формувальних вузлів
Температура сформованої стінки	Готовність до зняття з оправки	Зміна тривалості та інтенсивності охолодження

Як видно з табл. 2, підтримання заданої геометрії потребує спільного регулювання кінематичних і температурних параметрів. Зростання натягу профілю може бути пов'язане як із недостатньою швидкістю його подавання, так і з низькою температурою, за якої підвищується опір згинанню. Зміна кроку спіралі може виникати через похибку осьового переміщення або коливання частоти обертання оправки. Коригувальна дія повинна вибиратися після зіставлення кількох сигналів, а не за одним виміряним значенням.

Практична придатність спіральновитих труб не обмежується використанням порожнини профілю лише як конструктивного елемента структурованої стінки. У патенті України на корисну модель [3] запропоновано блок каналізаційного колектора, утворений однією або декількома герметично з'єднаними спіральновитими трубами, виготовленими зварюванням замкнутого порожнистого прямокутного профілю з полімерного матеріалу. Порожнина профілю утворює гвинтовий периферійний канал у межах стінки основного циліндричного каналу. Після сполучення з додатковим трубопроводом цей канал використовується як частина теплообмінного колектора. Таке рішення показує, що стабільність геометрії порожнистого профілю та герметичність зварного з'єднання визначають не лише механічні характеристики труби, а й можливість функціонального використання внутрішньої порожнини структурованої стінки.

До показників якості готової труби належать зовнішній і внутрішній діаметри, овальність, прямолінійність, товщина структурованої стінки, ширина та суцільність зварного шва. Для труб типу В зі структурованою зовнішньою і гладкою внутрішньою поверхнею вимоги до матеріалів, конструкції та експлуатаційних характеристик установлює ISO 21138-3:2020. Документ поширюється на вироби з PVC-U, PP і PE для безнапірного підземного водовідведення та каналізації, а для розмірів понад DN 1200 його положення можуть використовуватися як загальні рекомендації щодо фізичних, механічних і експлуатаційних характеристик [4].

Контроль геометрії доцільно проводити безпосередньо під час формування. Безконтактне вимірювання положення зовнішньої поверхні дозволяє виявляти зміну діаметра та періодичні відхилення, пов'язані з биттям оправки. Відеоконтроль зони стику може використовуватися для оцінювання положення витків і ширини шва. Температурний контроль дає змогу виявити нерівномірність нагрівання та охолодження.

Реєстрація параметрів процесу створює основу для встановлення причинно-наслідкових зв'язків між режимами обладнання та якістю виробу. Для кожної виготовленої труби можуть зберігатися дані про швидкість подавання, частоту обертання, температури, тиск розплаву, притискне зусилля та геометричні відхилення. Порівняння таких даних дозволяє уточнювати допустимі діапазони параметрів для різних діаметрів, матеріалів і типорозмірів профілю.

Найбільший вплив на стабільність спірального формування мають узгодження швидкості подавання з обертанням оправки, підтримання заданого кроку укладання, температурний стан профілю та стабільність екструзійного зварювання. Ці параметри взаємопов'язані. Зміна швидкості впливає на тривалість нагрівання і зварювання, температура визначає деформативність профілю, а деформативність впливає на натяг і притискне зусилля.

Удосконалення обладнання доцільно спрямовувати на синхронізацію приводів, автоматичне регулювання натягу, стабілізацію температури профілю та розплаву, контроль положення суміжних витків і вимірювання геометрії труби безпосередньо під час формування. Застосування багатопараметричної системи контролю дозволить виявляти відхилення до утворення протяжного дефекту та зменшити обсяг продукції, що потребує повторного оброблення або бракування.

Подальші дослідження мають передбачати побудову параметричної моделі процесу, експериментальне визначення допустимих співвідношень між швидкістю подавання, частотою обертання та температурою профілю, а також оцінювання впливу перехідних режимів на геометричну точність і міцність зварного з'єднання. Окремим завданням є розроблення алгоритму автоматичного коригування параметрів формування за даними про натяг профілю, крок спіралі та поточний діаметр труби.

Список використаних джерел

1. Spiral wound pipe and a method for manufacturing the same : patent EP1147004B1 / F. Forsell, E. Hölsö, J. Järvenkylä ; applicant Uponor Innovation AB. – Publ. 26.02.2003.
2. Hollow profile used in the manufacture of a pipe : patent AU2011208600B2 / A. Ahlgren, J. Enroth ; applicant Oy KWH Pipe AB. – Publ. 02.05.2013.
3. Блок каналізаційного колектора : пат. на корисну модель 154296 Україна : МПК E03F 3/00, E03F 3/04, F28D 1/06 / Д. В. Усатенко, І. В. Білецький. – № u202302010 ; заявл. 28.04.2023 ; опубл. 01.11.2023.
4. ISO 21138-3:2020. Plastics piping systems for non-pressure underground drainage and sewerage – Structured-wall piping systems of unplasticized poly(vinyl chloride) (PVC-U), polypropylene (PP) and polyethylene (PE) – Part 3: Pipes and fittings with non-smooth external surface, Type B. – 2nd ed. – Geneva : International Organization for Standardization, 2020. – 38 p.

АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ СПІРАЛЬНОГО ФОРМУВАННЯ ТРУБ ВЕЛИКОГО ДІАМЕТРА З ПОРОЖНИСТИХ ТЕРМОПЛАСТИЧНИХ ПРОФІЛІВ

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Україна

Розвиток цифрових технологій у машинобудуванні супроводжується широким використанням систем автоматизованого проектування на всіх етапах створення виробів. Це зумовлює підвищення вимог до професійної підготовки майбутніх інженерів, які повинні не лише володіти навичками створення конструкторської документації, а й уміти працювати з цифровими моделями, аналізувати їх та оперативно вносити конструктивні зміни. У зв'язку з цим особливого значення набуває використання сучасних CAD-систем у навчальному процесі.

Однією з основних технологій, реалізованих у сучасних системах автоматизованого проектування, є параметричне моделювання. Його застосування дає змогу будувати моделі на основі взаємопов'язаних геометричних елементів і параметрів, завдяки чому будь-які зміни конструкції автоматично відображаються на всіх пов'язаних елементах моделі. Це значно скорочує час проектування, підвищує точність моделювання та зменшує ймовірність виникнення помилок.

Принципи параметричного моделювання реалізовані в більшості сучасних CAD-систем, серед яких SolidWorks, Autodesk Inventor, Siemens NX, Creo Parametric та інші. Незважаючи на відмінності функціональних можливостей програмних продуктів, їх об'єднує використання єдиної концепції параметричного проектування, що дозволяє розглядати її як універсальну технологічну основу підготовки майбутніх інженерів. У Національному аерокосмічному університеті «Харківський авіаційний інститут» на кафедрі нарисної геометрії та комп'ютерного моделювання зазначений підхід використовується під час викладання дисциплін, пов'язаних із комп'ютерним моделюванням та автоматизованим проектуванням.

У процесі вивчення параметричного моделювання студенти засвоюють принципи побудови моделей на основі взаємозалежних елементів, що дозволяє краще зрозуміти логіку проектування та послідовність створення виробу. Під час створення цифрової моделі студент працює не лише з геометричною формою виробу, а й із логікою його побудови, взаємозв'язками між конструктивними елементами, послідовністю виконання операцій та можливістю подальшої модифікації конструкції. Це сприяє розвитку просторового мислення, технічної уяви, навичок аналізу та прийняття інженерних рішень.

Досвід викладання дисциплін, пов'язаних із комп'ютерним моделюванням, свідчить, що саме параметричний підхід дозволяє студентам швидше зрозуміти взаємозв'язок між геометрією виробу, історією побудови моделі та конструкторською документацією.

Практичне значення параметричного підходу добре ілюструє виконання навчального проєкту з моделювання корпусної деталі. Наприклад, у процесі моделювання корпусної деталі студент формує ескізи, визначає параметри основних конструктивних елементів, створює об'ємну модель та комплект асоціативної конструкторської документації. Подальша зміна геометричних параметрів автоматично відображається на тривимірній моделі, креслениках і складальних одиницях, що дає можливість оперативно оцінити декілька конструктивних варіантів без повторного виконання всіх етапів проектування. Такий підхід максимально наближений до практики сучасних машинобудівних підприємств.

Важливою перевагою параметричного моделювання є можливість його інтеграції з іншими цифровими технологіями. Створені моделі використовуються для проведення

інженерних розрахунків (CAE), автоматизованої технологічної підготовки виробництва (CAM), управління життєвим циклом виробу (PLM), створення цифрових двійників та підготовки моделей до адитивного виробництва. Завдяки цьому здобувачі освіти отримують уявлення про взаємозв'язок усіх етапів сучасного цифрового виробництва та роль комп'ютерно-інтегрованих технологій у діяльності інженера.

Отже, параметричне моделювання є важливою складовою професійної підготовки майбутніх інженерів, оскільки поєднує опанування сучасних CAD-технологій із формуванням практичних навичок цифрового проєктування. Використання параметричного підходу під час виконання навчальних проєктів сприяє розвитку просторового мислення, інженерної логіки та здатності оперативно адаптувати конструкцію до нових вимог. Практика викладання відповідних дисциплін свідчить про доцільність використання параметричного моделювання, оскільки воно підвищує якість засвоєння матеріалу та наближає навчальний процес до реальних умов сучасного машинобудівного виробництва. Подальший розвиток інженерної освіти доцільно пов'язувати з інтеграцією CAD/CAE/CAM-технологій, цифрових двійників, засобів штучного інтелекту та інших компонентів цифрового виробництва.

Список використаних джерел.

1. Мурадян Т. К., Мсаллам К., Перехрест Н. В., Сасенко С. В. Роль САПР SolidWorks у формуванні професійних компетентностей здобувачів освітньо-професійної програми «Геометричне моделювання та візуалізація промислових виробів». *Соціально-гуманітарний вісник*. Вип. 69. Матеріали VII Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні тенденції соціально-гуманітарного розвитку суспільства». Харків, 2026. С. 32–37. DOI: <https://doi.org/10.61718/sgv69.02>
2. Мурадян Т. К., Перехрест Н. В. Особливості вивчення дисципліни «Геометричне моделювання та графічні інформаційні технології». Матеріали XIX Науково-технічної конференції факультету ракетно-космічної техніки «Сучасні проблеми ракетно-космічної техніки і технології». Харків : Національний аерокосмічний університет «ХАІ», 2023.
3. Koziar M., Hubal H., Burchak I., Botviniev M., Saveliev D. The Impact of CAD Software on the Teaching of Engineering Graphics: A Systematic Review. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*. 2025. Vol. 13(1). P. 17–39.

Нарижний О.Г., к.т.н, доцент

o.naryzhniy@khai.edu

Тараненко М.Є., д.т.н. професор

m.taranenko@khai.edu

Косенко О.В., старша викладачка

o.kosenko@khai.edu

ЕЛЕКТРОГІДРАВЛІЧНЕ ШТАМПУВАННЯ КОРОБЧАСТОЇ ДЕТАЛІ В МАТРИЦЮ

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Україна

Електричний вибух в рідині (ефект Юткіна, електрогідрравлічний ефект, ЕГЕ) є принциповою основою багатьох техпроцесів обробки та виготовлення металевих деталей в автомобіле-, судно-, літако- та ракето-будуванні. ЕГЕ реалізується при підводному високовольтному електричному розряді. При цьому енергія, що була запасена в конденсаторній батареї, перетворюється в механічну роботу пластичного деформування заготовки. В світовій практиці розрахунків таких процесів використовується теплова модель електричного вибуху – в визначений момент часу у деякій малій області (канал розряду) виділяється велика кількість тепла. Це призводить до утворення в малій області суцільного середовища речовини з дуже високими термодинамічними параметрами. З плином часу ця область інтенсивно розширюється, від неї в незбурене середовище розповсюджуються ударні хвилі, а сама область перетворюється в паро-газову порожнину (ППП), яка дуже швидко поширюється. Утворені ударні хвилі, високошвидкісні потоки рідини та тиск навантажують пружно-пластично-деформуємі перешкоди – заготовку та елементи технологічного оснащення.

Природне обмеження таких процесів полягає в недостатній для великих деформацій заготовок величині енергії, яку може бути виділено в одній розрядній камері. В ХАІ було розроблено багатокамерні електрогідрравлічні преси [1] для штампування габаритних деталей, які використовували десятки розрядних камер, що дозволяло частково подолати вказане обмеження. Наступним кроком збільшення деформацій стало використання багатоперехідного техпроцесу у вигляді багаторазового навантаження заготовки багатьма камерами.

Виготовлення коробчастих деталей загалом є проблемою в теорії і практиці штампування з огляду на неоднорідність за простором та за часом напружено-деформованого стану деталі під час виготовлення, великий вплив тертя. При електрогідрравлічному штампуванні додаються складнощі, пов'язані з впливом гетерогенного технологічного середовища, швидкісним зміцненням та інерційним спротивом матеріалу заготовки. Відомі типові недоліки виготовлення коробчастих деталей – гофроутворення, розриви, недостатнє формування кутів. Не існує розрахункового підходу для визначення з одного боку параметрів НДС і з другого боку – параметрів технологічного процесу і технологічного оснащення, що обумовлено нелінійністю механічних процесів і потребує великого об'єму технологічних експериментів.

Розробка методів дослідження механічних процесів під час електрогідрравлічного штампування, дослідження закономірностей та особливостей деформування коробчастих деталей і оптимізація технологічних процесів та обладнання з урахуванням повторюваності та сумісної дії багатьох електровибухів є нагальною задачею технологічних досліджень і прикладної механіки.

Доповідь присвячена висвітленню розробки методики моделювання механічних процесів в технологічній системі електрогідрравлічного штампування коробчастої деталі на основі чисельного рішення задач механіки в середовищі пакета LS-DYNA [2].

В світовій літературі для моделювання механічних процесів, ініційованих ЕГЕ, використовується саме пакет LS-DYNA, що обумовлено двома його особливостями. По-перше, він дає можливість відобразити поширення газового середовища за рахунок притоку тепла і таким чином імітувати електричний вибух. По-друге, пакет використовує метод FEM-ALE, який дає змогу обчислювати дуже високі деформації, які властиві руху рідкого та газового середовища, і одночасно – обчислювати контактну взаємодію між твердими і рідкими рухомими елементами технологічної системи. Пакет було використано для моделювання

штампування плоскої заготовки в матрицю одним імпульсом [3], а також – вільної роздачі заготовки декількома імпульсами [4]. Моделювання штампування заготовки декількома імпульсами в матрицю є новим кроком.

Для розробки відповідного набору даних використано препроцесор LSPP [5].

Загалом технологічна система електрогідравлічного штампування включає електричну і механічну частини [1]. В механічній частині виділяються ті її складові, які безпосередньо обумовлюють формоутворення деталі: матриця, притискач, заготовка, рідина разом з каналом розряду, який потім перетворюється в паро-газову порожнину. Ці складові утворюють принципову схему технологічної системи, механічні процеси в якій описано загальною математичною моделлю [1].

На рис. 1 показано вигляд схеми половини симетричної технологічної системи, а також окремі складові та їх розміри (в мм), π – це площа симетрії.

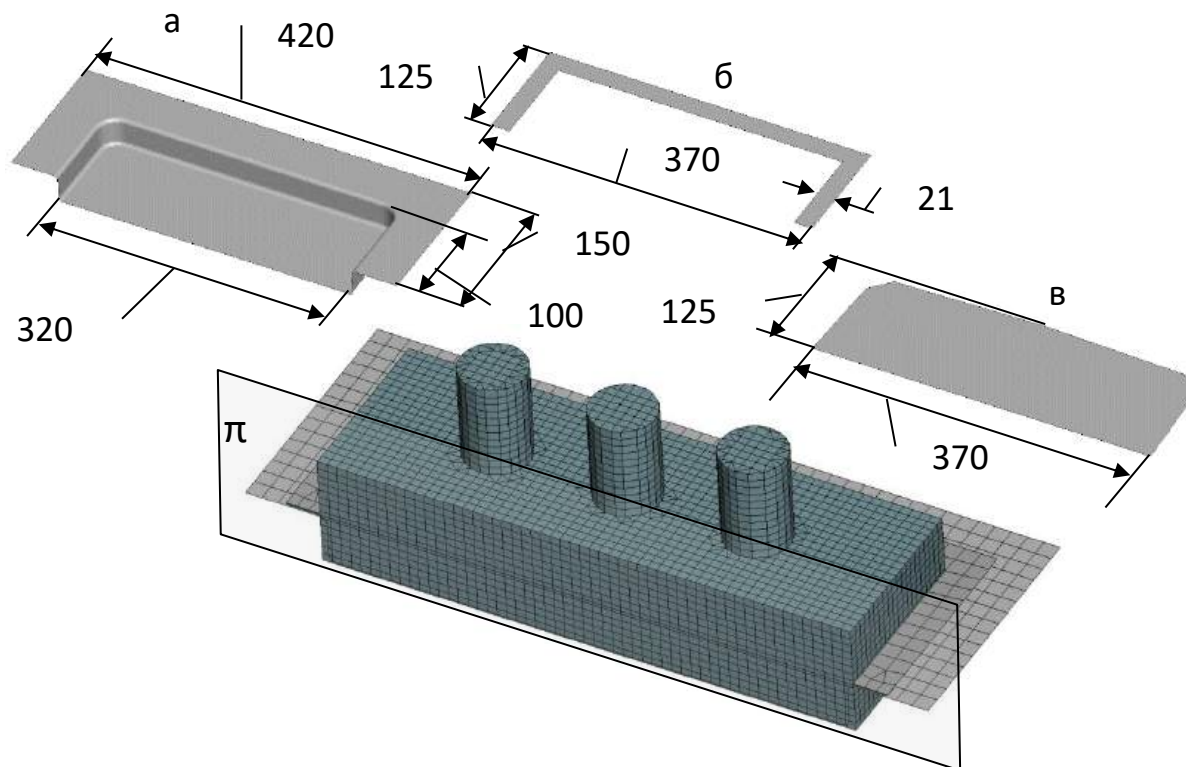


Рис. 1. Схема технологічної системи та її розміри

На схемі технологічної системи показано матрицю (а), притискач (б), заготовку (в), а також загальну область руху рідини і ПГП (її позначено блакитним кольором).

Матриця жорстка та нерухома (використано матеріал MAT 20 RIGID), має вигляд оболонки товщиною 1 мм з отвором розміром 320×100 мм в плані і глибиною 30 мм. Плоскі поверхні поєднані галтелями, вертикальні галтелі радіусом 20 мм, горизонтальні – 4 мм. Для забезпечення роботи контактної алгоритми матеріалу матриці надано властивості сталі: щільність $\rho=7800 \text{ кг/м}^3$, модуль Юнга $E=2 \cdot 10^{11} \text{ Па}$, коефіцієнт Пуассона $\nu=0,3$. Для рішення використано 1264 лагранжових скінченних елементів типу Belytschko-Tsay, які використовують 1323 вузли.

Притискач також жорсткий та нерухомий, має вигляд П-образної пластини товщиною 1 мм. Матеріальні властивості такі ж самі, як для матриці. Використано 122 скінченних елементи типу Belytschko-Tsay, які використовують 184 вузли.

Заготовка має вигляд пластини товщиною 1 мм, яка має складну форму з загальними розмірами 125×370 мм в плані. Використано пружно-пластичний матеріал з швидкісним зміцненням MAT 98 SIMPLIFIED JOHNSON_COOK, який має зміцнення за формулою

$$\sigma_y = (A + B\bar{\epsilon}^p)(1 + C \ln \dot{\epsilon}^*), \quad (1)$$

де σ_y – межа текучості, $\bar{\varepsilon}^P$ – ефективна пластична деформація, $\dot{\varepsilon}^*$ – нормалізована ефективна швидкість деформації, $A = 1.4 \cdot 10^8$ Па, $B = 9 \cdot 10^8$ Па, $n = 0,45$, $C = 0,01$ – коефіцієнти, які визначаються експериментально. Разом з щільністю $\rho = 2770$ кг/м³, модулем Юнга $E = 7 \cdot 10^{10}$ Па і коефіцієнтом Пуассона $\nu = 0,33$ (1) описує поведінку алюмінієвого сплаву AA5052-0 (аналога АМг2М) під час деформування з високими швидкостями, які з'являються під час електрогідравлічного деформування. Для апроксимації НДС використано 1761 лагранжових скінченних елементів типу Belytschko-Tsay з 6 точками інтегрування вздовж товщини, які використовують 1852 вузли. Для обчислення потоншення оболонки під час деформування вказано параметр ISTUPD=1 в ключовому слові *CONTROL_SHELL.

Рідина має властивості води, підкорюється закону лінійної пружності (тип матеріала *MAT_NULL, рівняння стану *EOS_LINEAR_POLYNOMIAL) з об'ємним модулем $K = 2,25 \cdot 10^9$ Па, щільністю $\rho = 1000$ кг/м³, в'язкістю $\mu = 0,1$, тиском кавітації $P_K = -10^5$ Па.

Речовина ПГП – низькотемпературна плазма, має механічні властивості ідеального газу з постійною адіабати $\gamma = 1,26$. Механічні властивості задано з допомогою типу матеріала *MAT_NULL і рівняння стану *EOS_LINEAR_POLYNOMIAL_WITH_ENERGY_LEAK з щільністю $\rho = 1.25$ кг/м³, в'язкістю $\mu = 0,1$, тиском кавітації $P_K = -10^5$ Па, коефіцієнтами $C_4 = C_5 = 0,26$. Початкова енергія $E_0 = 10^6$ Дж/кг, початковий еталонний об'єм $v_0 = 0,001$. Залежність потоку тепла в середовище ПГП задано формулою

$$q = \begin{cases} 3,23 \cdot 10^{13} \text{ Вт/м}^2, & t < 6 \cdot 10^{-5} \text{ с}; \\ 0, & t > 6 \cdot 10^{-5} \text{ с}. \end{cases} \quad (2)$$

Штучна речовина VOID має властивості розрідженого газу, підкорюється закону лінійної пружності (тип матеріала *MAT_NULL, рівняння стану *EOS_LINEAR_POLYNOMIAL) з об'ємним модулем $K = 1 \cdot 10^3$ Па, щільністю $\rho = 0,01$ кг/м³, в'язкістю $\mu = 0,1$, тиском кавітації $P_K = -10^5$ Па.

Три речовини (рідина ПГП і VOID) обчислюються за правилами ALE. Спочатку будується загальна ейлерова сітка в тривимірній області, де будуть рухатись матеріали ALE, а потім вона заповнюється матеріалами у відповідності до початкового становища.

Побудова ейлерової сітки виконується в два етапи (рис. 2). Спочатку будується проста двовимірний ситка з прямокутними скінченними елементами (CE). На цій сітці розміщуються проєкції трьох камер і CE, які перетинаються контурами камер, подрібнюються так, щоб контури співпадали з межами нових CE. Уся множина CE поділяється на дві частини «а» і «б». На другому етапі будуються тривимірні CE за алгоритмом SWEET в напрямках стрілок і об'єднуються вузли на межах двох тривимірних сіток, що дає систему CE «в».

Заповнення сітки «в» матеріалами ALE відбувається з допомогою ключового слова *INITIAL_VOLUME_FRACTION_GEOMETRY за три кроки. По-перше, вся сітка «в» наповнюється матеріалом VOID, по-друге, сітка вище заготовки наповнюється рідиною і, по-третє, в трьох камерах заповнюються початкові об'єми ПГП у вигляді кульок.

На рис. 3 показано залежність внутрішньої (зелена лінія), кінетичної (синя лінія) і загальної механічної енергії, кДж (червона лінія) усієї системи від часу (мс). Тепло, яке втікає в ПГП, є збудником руху, внаслідок чого зростає кінетична енергія. Одночасно цей рух призводить до дисипації механічної енергії за в'язким типом в ПГП та рідині, внаслідок чого загальна енергія зменшується. Наприкінці після 1,5 мс система переходить в спокій.

Детальний аналіз результатів проведено в презентації доповіді.

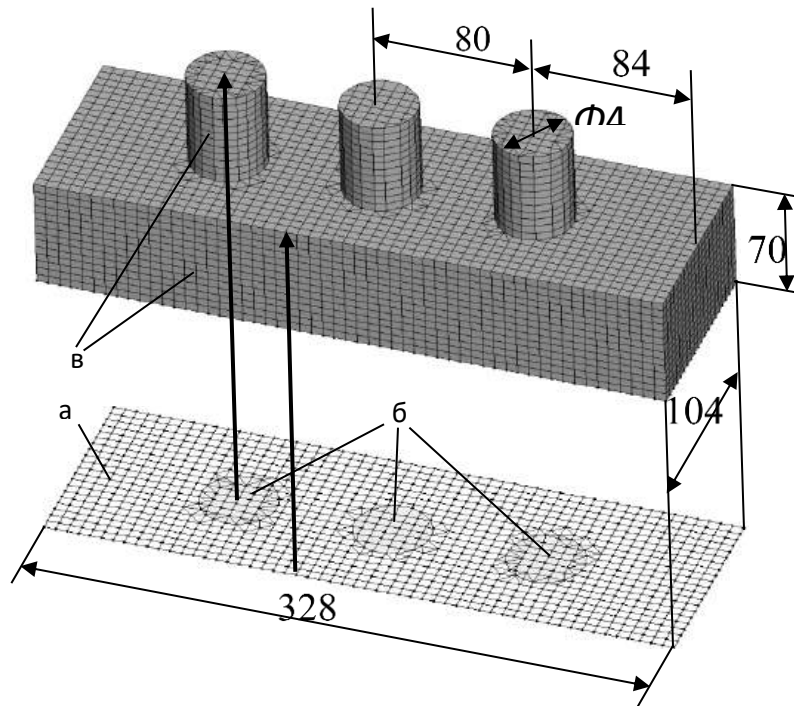


Рис.2. Побудова ALE-сітки і її розміри

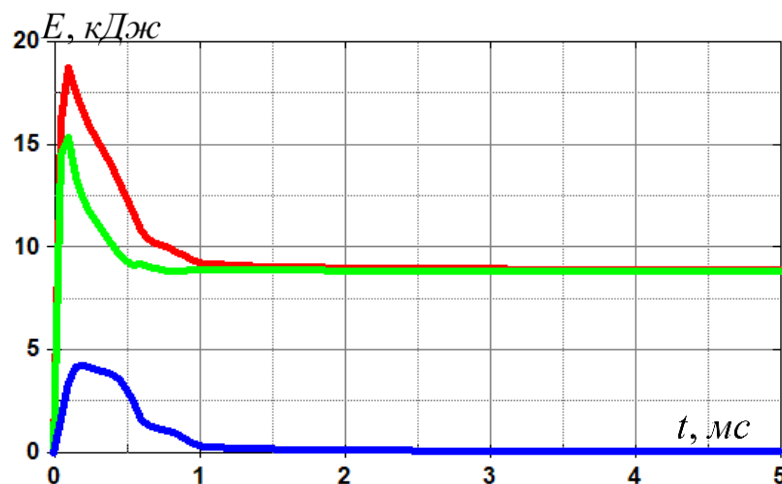


Рис. 3. Залежність енергій системи від часу

Список використаних джерел.

1. М. Є. Тараненко Електрогідрравлічне деформування металів: моделювання керованого навантаження, досвід впровадження техпроцесів /Тараненко М. Є., Наріжний О. Г., Богачьова Т. Б.– Харків: ТОВ «ДІСА ПЛЮС», 2025.– 156с. ISBN-978-617-8688-46-2.
2. Ansys® LS-DYNA®, Release 2024 R1. Canonsburg, PA: Ansys, Inc., 2024. Доступно на: <https://www.ansys.com>.
3. Woo Mina, Lee Kyunghoon, Song Woojin, Kang Beomsoo, Kim Jeong. Numerical Estimation of Material Properties in the Electrohydraulic Forming Process Based on a Kriging Surrogate Model. *Mathematical Problems in Engineering*. Hindawi. Vol. 2020, Article ID 3219829. 12 p. DOI: <https://doi.org/10.1155/2020/3219829>
4. Taranenko M., Naryzhniy O. Modelling the Process of Interaction of a Pulsed Jet with a Workpiece by Electrohydraulic Forming. *Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering* – 2021, M. Nechyporuk et al. (Eds.): ICTM 2021, M. Nechyporuk et al. (Eds.): ICTM 2021, LNNS 367, https://doi.org/10.1007/978-3-030-94259-5_4
5. Ansys, Inc. LS-PrePost User's Guide. – Canonsburg, PA: ANSYS, Inc., 2026

МОДЕЛЮВАННЯ І АНАЛІЗ ЕЛЕКТРОГІДРАВЛІЧНОЇ ВІЛЬНОЇ РОЗДАЧІ ТРУБЧАСТОЇ ЗАГОТОВКИ

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Україна

Системи, що використовують електрогідрравлічний ефект (ЕГЕ), включають дві частини – електрофізичну та механічну. Перша частина системи забезпечує електричний розряд у рідині та керує ним. Математична модель електричних процесів описана [1]. Друга частина організує механічний рух і включає чотири обов'язкові елементи, кожен з яких відіграє певну роль, – паро-газова порожнина (ППП), рідина, технологічний об'єкт та оснащення; її математичну модель описано [2]. У ППП виділяється тепло, вона є перетворювачем імпульсу електричного струму в тиск і джерелом імпульсного механічного збурення в системі. Рідина сприймає і розщеплює вже механічний імпульс від ППП в три фактори дії (хвилі тиску, потоки рідини, імпульсне поле тисків), розповсюджує їх і забезпечує об'єднану дію на технологічний об'єкт. Оснащення зв'язує і обмежує рух елементів, а також каналізує, спрямовує і концентрує дію факторів на об'єкт. Елементи таких систем існують у різних агрегатних станах (газоподібному, рідкому, твердому) і при цьому взаємодіють контактним способом, тому особливості поведінки елементів мають характер системної взаємодії, що необхідно враховувати при дослідженні кінетики процесів.

Активна фаза деформування заготовки впливає дуже швидко, вона спряжена з значними електромагнітними і механічними збудженнями та перешкодами, тому експериментальні виміри параметрів напружено-деформованого стану (НДС) заготовки в цей час дуже обмежені і виконуються з великими похибками. В наш час дослідження швидкоплинних процесів використовують чисельне моделювання з використанням розв'язування задач механіки суцільних середовищ з допомогою комп'ютера [1-3]. Відомі дослідження використовують для моделювання пакет LS-DYNA [4], причому розглядається лише активна фаза, а зміни НДС після закінчення техпроцесу, так зване розвантаження, не аналізується.

Доповідь присвячена розробці методики визначення параметрів НДС заготовки під дією ЕГЕ, починаючи з етапу активного деформування і закінчуючи етапом розвантаження, з використанням чисельного моделювання в середовищі пакету LS-DYNA. Також проведено аналіз вільної роздачі трубчастої заготовки за пропонованою методикою.

На рис. 1 показано принципову схему електрогідрравлічної вільної роздачі трубчастої заготовки, яка включає механічну (а) та електрофізичну (б) частини і вигляд розрахункової схеми на початку процесу з позначенням розмірів (в). На схемі (а) зазначено: основу (1); нижню (2) та верхню (7) сталеві плити, стиснуті зусиллям P ; центруючі поліетиленові кільця (3); трубчасту заготовку з алюмінієвого сплаву (4); ініціюючу дротинку (5); технологічну рідину (6, вода). У електрофізичній частині зазначено: опір ланцюга (8); повітряний розрядник (9); внутрішній опір (10); індуктивність (11) та ємність (12) батареї конденсаторів. Плита (1), а також кільця (3) вважаються абсолютно жорсткими та нерухомими. Плита (7) також вважається жорсткою, але має можливість руху вниз при осаді заготівлі, щоб уникнути витоків технологічної рідини.

Оболонкова заготовка за припущенням задовольняє гіпотезі Кірхгофа про прямі нормалі і представлена на схемі серединною циліндричною поверхнею. Рідина займає весь доступний простір, контактуючи з пластинами, кільцями, оболонкою. Канал розряду, заповнений паро-плазмовою фазою, спочатку збігається з об'ємом дротинки, використаної для ініціації розряду.

Основні розміри елементів мають такі значення: малий діаметр порожнини камери $d=32$ мм, внутрішній діаметр оболонки, заповненої рідиною $D=67$ мм, середній діаметр оболонки $D_1=70$ мм, найбільша висота камери $h=75$ мм, найменша висота камери $H=40$ мм, висота оболонки $H_1=50$ мм, товщина 5 мм. Поперечні початкові розміри каналу розряду $0,5 \times 0,5$ мм, довжина каналу $h=75$ мм, об'єм $1,875 \cdot 10^{-8}$ м³.

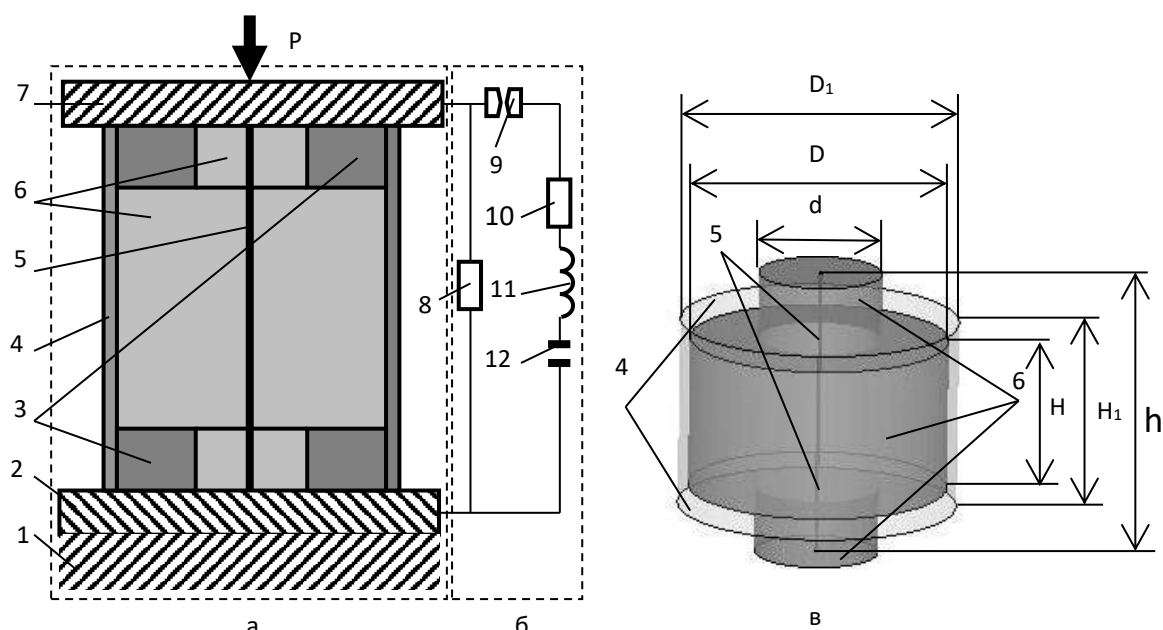


Рис.1. Принципова схема пристосування: а – механічна частина, б – електрична частина) і в – розрахункова схема з позначенням розмірів

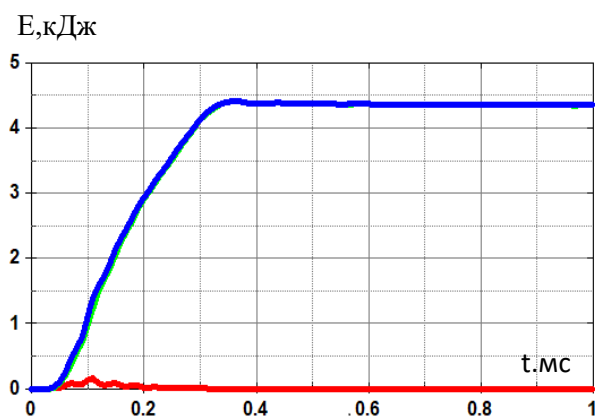


Рис. 2. Залежності енергій заготовки від часу

загальна механічна енергія. Бачимо, що кінетична енергія мало змінюється і після $0,3 \cdot 10^{-3}$ с дорівнює нулю, тобто оболонка не рухається. Загальна енергія майже дорівнює внутрішній енергії і обидві незмінні після $0,5 \cdot 10^{-3}$ с, що пояснюється закінченням активного періоду деформування заготовки.

На рис. 3 показано залежність потоншення і пластичних деформацій в 10 рівномірно розташованих точках по висоті оболонки від торця (червона лінія) до середини оболонки (салатова лінія). Ці залежності, як і енергії, змінюються на початку процесу, а після $0,5 \cdot 10^{-3}$ с вони зберігають свої значення.

Можна зробити загальний висновок про те, що період активного формування закінчується в момент $0,5 \cdot 10^{-3}$ с і можна переходити до моделювання розвантаження оболонки, яке відповідає технологічним діям по звільненню деталі із технологічного устаткування.

На етапі розвантаження необхідно звільнити оболонку від дії усіх зовнішніх сил, тобто – тиску і сил з боку технологічного обладнання. При цьому частина внутрішньої енергії, яка відповідає роботі пружних деформацій, збуджує перехідний процес у формі нестихаючих коливань. З урахуванням цих зауважень формулюються і вирішуються дві нових задачі:

Речовина каналу розряду, що надалі перетворюється на ПГП, має властивості ідеального газу з постійною адіабати 1,26 і щільністю за нормальних умов $1,25 \text{ кг/м}^3$. На протязі $2,5 \cdot 10^{-4}$ с в канал втікає тепло з інтенсивністю $6,316 \cdot 10^{12} \text{ Вт/кг}$, далі на протязі $1 \cdot 10^{-4}$ с канал охолоджується з інтенсивністю $6,3 \cdot 10^{11} \text{ Вт/кг}$.

Під впливом тепла канал розширюється, перетворюється на ПГП і створює поле тиску, під дією якого оболонка рухається. На рис. 2 показано залежності енергій заготовки від часу; червона лінія – кінетична, зелена – внутрішня, яка в даному випадку дорівнює сумі робіт пластичної і пружної деформації, синя – це

- визначити частоти власних коливань деформованої оболонки;
- вирішити задачу згасаючих власних коливань з оптимальним коефіцієнтом згасання.

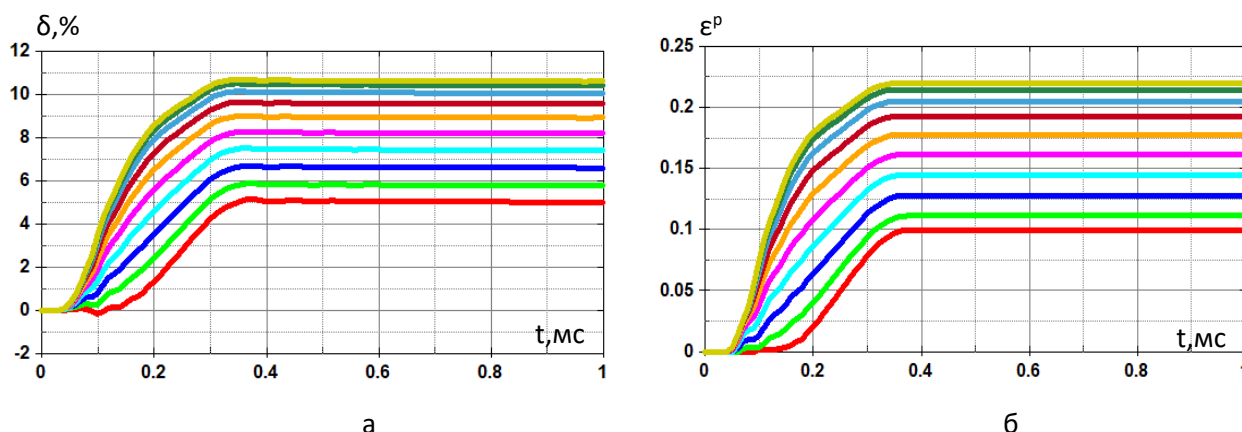


Рис. 3. Залежність потоншення (а) і остаточної пластичної деформації (б) від часу

На рис. 4 показано залежність переміщень трьох різних точок оболонки від часу, які отримані під час розв'язання першої задачі, при звільненні оболонки у момент $0,5 \cdot 10^{-3}$ с від дії зовнішніх сил, коли починаються коливання. Бачимо, що частоти коливань співпадають для різних точок. Ця частота дорівнює $\nu = 1,225 \text{ c}^{-1}$.

З теорії коливань відомо, що оптимальне значення коефіцієнта демпфування дорівнює подвоєній власній частоті коливань, тобто в даному випадку $\eta = 2\nu = 2,45 \text{ c}^{-1}$. Другу задачу вирішуємо, призначаючи оптимальне значення коефіцієнта демпфування в момент початку моделювання розвантаження. На рис 4. показано залежність інтенсивності напружень (напружень фон Мізеса) від часу для тих же точок, де визначались потоншення і пластичні деформації.

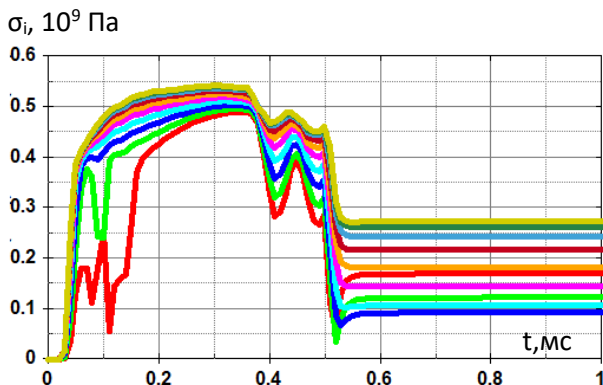


Рис. 4. Залежність інтенсивності напружень від часу

Бачимо, що на етапі активного деформування інтенсивності напружень змінюються, але після початку розвантаження і демпфування зміни швидко вщухають, а НДС приймає характер остаточної.

Список використаних джерел

1. Mamutov V. Simulation of high-voltage discharge channel in water at electro- hydraulic forming using LS-DYNA / V. Mamutov, S. Golovashchenko, A. Mamutov // 13 th international LS-DYNA users conference, 8-10 jun 2014. P. 1-1– 1-9.
2. М. Є. Тараненко Електрогідравлічне деформування металів: моделювання керованого навантаження, досвід впровадження техпроцесів /Тараненко М. Є., Наріжний О. Г., Богачьова Т. Б.– Харків: ТОВ «ДІСА ПЛЮС», 2025.– 156с. ISBN-978-617-8688-46-2
3. Woo Mina, Lee Kyunghoon, Song Woojin, Kang Beomsoo, Kim Jeong. Numerical Estimation of Material Properties in the Electrohydraulic Forming Process Based on a Kriging Surrogate Model. *Mathematical Problems in Engineering*. Hindawi. Vol. 2020, Article ID 3219829. 12 p. DOI: <https://doi.org/10.1155/2020/3219829>
4. Ansys® LS-DYNA®, Release 2024 R1. Canonsburg, PA: Ansys, Inc., 2024. Доступно на: <https://www.ansys.com>.

Поліщук Д.В., к.т.н.
kpudmytro@gmail.com
Холодний Ю.Ф., к.т.н., доцент
kholodnyi.y@gmail.com
Алтухов П.М., викладач
petrnika15@gmail.com

ЗАСТОСУВАННЯ СУЧАСНИХ МАТЕРІАЛІВ У ВИРОБНИЦТВІ ДЕТАЛЕЙ АВТОМОБІЛЬНИХ ТРАНСМІСІЙ

Філія Класичного приватного університету в м. Кременчук, Україна

Постановка проблеми. Сучасне автомобільне машинобудування характеризується постійним підвищенням вимог до маси, енергоефективності, надійності та довговічності транспортних засобів. Одним із напрямів удосконалення конструкцій автомобілів є зниження їх маси без погіршення міцнісних і експлуатаційних характеристик. Зазначена тенденція безпосередньо стосується автомобільних трансмісій, оскільки їх конструктивні елементи становлять значну частину маси силового агрегату та працюють в умовах складного поєднання статичних, циклічних і контактних навантажень. Особливо відповідальними деталями механічних трансмісій є первинні та вторинні вали, зубчасті колеса, осі, синхронізатори, підшипникові елементи та корпуси коробок передач. Для них характерні високі контактні напруження, кручення, згин, втомні навантаження, тертя та зношування. Тому перспективним напрямом є застосування сучасних матеріалів і технологій зміцнення, які дозволяють одночасно забезпечити необхідну міцність, довговічність та зменшення маси конструкції.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботах останніх років значна увага приділяється застосуванню легких матеріалів в автомобільній промисловості. Систематичні огляди сучасних матеріалів для автомобілів охоплюють високоміцні сталі, алюмінієві та магнієві сплави, полімерні композиційні матеріали та багатокомпонентні конструкції [1, 2]. Основною перевагою таких матеріалів є можливість зменшення маси автомобіля за умови забезпечення необхідної міцності та жорсткості. Водночас безпосереднє перенесення технологій легування на деталі трансмісії є обмеженим. На відміну від кузовних деталей, силові елементи коробки передач повинні забезпечувати передачу значних крутних моментів і витримувати багаторазові цикли навантаження. Саме тому високоміцні леговані сталі залишаються основними матеріалами для виготовлення валів і зубчастих коліс. Разом із тим удосконалення хіміко-термічної обробки та поверхневого зміцнення дозволяє істотно підвищити експлуатаційні характеристики таких деталей. Сучасні дослідження також демонструють перспективність використання порошкових матеріалів для виготовлення зубчастих деталей. Перевагами порошкової металургії є можливість формування деталей складної геометрії з мінімальними припусками на механічну обробку, зменшення відходів матеріалу та потенційне скорочення кількості технологічних операцій. Окремим завданням при цьому є контроль якості та виявлення дефектів порошкових зубчастих коліс, що стимулює розвиток автоматизованих систем контролю [3].

Невирішені частини загальної проблеми. Вибір матеріалу для конкретної деталі трансмісії не може ґрунтуватися лише на показниках міцності. Необхідно одночасно враховувати контактну витривалість, опір втомному руйнуванню, зносостійкість, технологічність обробки, стабільність властивостей після термічної обробки, корозійну стійкість, собівартість та можливість повторного використання матеріалу [9].

Мета дослідження. Метою роботи є аналіз сучасних матеріалів і технологічних підходів, перспективних для виготовлення основних деталей автомобільних трансмісій, а також визначення напрямів їх раціонального застосування з урахуванням умов експлуатації, характеру навантаження, маси, довговічності та технологічності деталей.

Основний матеріал дослідження. Для виготовлення валів механічних коробок передач найбільш доцільним є використання легованих конструкційних сталей із високою міцністю та втомною витривалістю. Вали працюють одночасно на кручення та згин, тому основними вимогами до матеріалу є висока границя витривалості, опір концентрації напружень та достатня в'язкість руйнування. Перспективним є застосування сталей, властивості яких оптимізуються шляхом термічної та хіміко-термічної обробки. Для зубчастих коліс визначальними характеристиками є контактна витривалість, зносостійкість і здатність протистояти циклічному навантаженню. У сучасних конструкціях широко використовуються цементовані сталі, у яких після насичення поверхневого шару вуглецем та наступної термічної обробки формується тверда зносостійка поверхня та більш в'язка серцевина.

Важливим напрямом є застосування поверхневих методів модифікації матеріалів. Для деталей зубчастих передач перспективними є іонна імплантація, дробоструминне зміцнення, нанесення твердих зносостійких покриттів та інші технології, які дозволяють змінювати властивості поверхневого шару без суттєвої зміни механічних характеристик серцевини. Дослідження комбінованих методів поверхневої обробки показують можливість підвищення твердості та покращення характеристик поверхневого шару сталей для відповідальних деталей [4]. Окремий інтерес становлять тонкоплівкові покриття на основі алмазоподібного вуглецю (DLC) та інших твердих матеріалів. Їх застосування у зубчастих передачах може сприяти зменшенню втрат на тертя та підвищенню ефективності роботи передач. Дослідження ефективності DLC- і WCC-покриттів для зубчастих пар механічної трансмісії показали перспективність застосування поверхневих технологій для зниження трибологічних втрат [5]. Для автомобільних трансмісій це особливо актуально, оскільки навіть невелике зниження втрат на тертя при тривалій експлуатації може позитивно впливати на загальну енергоефективність автомобіля.

Іншим важливим напрямом є використання алюмінієвих сплавів для корпусних деталей коробок передач. Зменшення густини матеріалу порівняно зі сталями та чавунами дозволяє знизити масу агрегату. Алюмінієві сплави характеризуються доброю ливарною технологічністю та достатньою корозійною стійкістю, що робить їх ефективними для виготовлення корпусів трансмісій. Водночас під час проектування необхідно враховувати нижчу жорсткість і модуль пружності порівняно зі сталевими матеріалами, а також особливості теплового розширення. Перспективним матеріалом для подальшого зниження маси є магнієві сплави. Їх густина є нижчою за густину алюмінієвих сплавів, тому потенційний ефект від їх використання є значним. Дослідження сучасних алюмінієвих і магнієвих сплавів у контексті автомобільних технологій показують можливість використання таких матеріалів для створення легких конструкцій [6]. Водночас широке застосування магнієвих сплавів обмежується питаннями корозійної стійкості, міцності, технології з'єднання з іншими матеріалами та вартості.

Для автомобільних трансмісій також актуальним є застосування полімерних і композиційних матеріалів. Їх доцільно використовувати для деталей, які не передають значних силових навантажень, але виконують функції напрямних, втулок, демпферів, кожухів або елементів механізмів перемикачів. Основними перевагами полімерів є мала маса, здатність поглинати вібрації та шум, корозійна стійкість і технологічність виготовлення. Сучасні дослідження композиційних матеріалів для автомобільного машинобудування вказують на перспективність полімерних, металоматричних і гібридних композицій [7].

Важливою тенденцією є оптимізація конструкції деталей за рахунок раціонального розподілу матеріалу. Для деталей трансмісій це може реалізовуватися через застосування порожнистих валів, полегшених зубчастих коліс, оптимізованих корпусів та топологічно оптимізованих конструкцій. Сучасні дослідження розглядають зменшення маси елементів автомобільної коробки передач за рахунок видалення надлишкового матеріалу з конструкції зубчастих коліс без втрати їх функціональної працездатності [8]. Такий підхід є особливо перспективним у поєднанні з сучасними методами комп'ютерного моделювання та аналізу напружено-деформованого стану.

Вибір матеріалу деталі трансмісії повинен здійснюватися не лише за критерієм максимальної міцності. Необхідно враховувати повний комплекс експлуатаційних, технологічних та економічних характеристик. Для валів визначальними є міцність і втомна довговічність; для зубчастих коліс – контактна витривалість і зносостійкість; для корпусів – жорсткість, маса та технологічність лиття; для деталей механізмів перемикачів – низька маса, зносостійкість і здатність до демпфування [9].

Висновки та рекомендації. Проведений аналіз сучасних наукових досліджень показує, що розвиток матеріалів для автомобільних трансмісій відбувається за кількома взаємопов'язаними напрямками: підвищення міцності традиційних легированих сталей, удосконалення технологій поверхневого зміцнення, застосування легких алюмінієвих і магнієвих сплавів, розвиток порошкових матеріалів та використання полімерних і композиційних систем. Для валів і зубчастих коліс у найближчій перспективі основними залишатимуться високоміцні легировані сталі, властивості яких можуть бути суттєво покращені за рахунок сучасних методів термічної, хіміко-термічної та поверхневої обробки. Для корпусних деталей найбільш перспективними є алюмінієві сплави, а в окремих випадках – магнієві матеріали. Полімерні та композиційні матеріали доцільно застосовувати для ненавантажених або помірно навантажених компонентів, де важливими є зниження маси, шуму та вібрації. Перспективним є поєднання матеріалознавчих і конструкторських підходів: використання оптимізованої геометрії деталей разом із матеріалами, властивості яких локально адаптовані до умов роботи. Подальший розвиток автомобільних трансмісій доцільно пов'язувати з цифровим проєктуванням, CAE-моделюванням, оптимізацією конструкцій, сучасними покриттями та багатоматеріальними технологіями. Такий комплексний підхід дозволить підвищити надійність і ресурс деталей трансмісій, зменшити їх масу та сприяти підвищенню загальної енергоефективності автомобільного транспорту.

Список використаних джерел

1. Zhang W., Xu J. Advanced lightweight materials for Automobiles: A review. *Materials & Design*. 2022. Vol. 221. Art. 110994. DOI: 10.1016/j.matdes.2022.110994.
2. Czerwinski F. Current Trends in Automotive Lightweighting Strategies and Materials. *Materials*. 2021. Vol. 14, No. 21. Art. 6631. DOI: 10.3390/ma14216631.
3. Xiao M., Wang W., Shen X. et al. Research on defect detection method of powder metallurgy gear based on machine vision. *Machine Vision and Applications*. 2021. Vol. 32. Art. 51. DOI: 10.1007/s00138-021-01177-7.
4. Tang Z., Dai S. et al. Effect of the Pre-Shot Peening and Nitrogen Ion Implantation Combined Surface Treatments on the Surface Structure and Properties of Gear Steel 16Cr3NiWMoVNB. *Metals*. 2022. Vol. 12, No. 9. Art. 1509. DOI: 10.3390/met12091509.
5. Meeks G. et al. On the Effect of DLC and WCC Coatings on the Efficiency of Manual Transmission Gear Pairs. *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10, No. 9. Art. 3102. DOI: 10.3390/app10093102.
6. Hao Z., Ju Y., Chen L. The use of aluminium and magnesium alloys in automotive lightweight technologies. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2023. Vol. 37. P. 4615–4622. DOI: 10.1007/s12206-023-0712-2.
7. Lightweight composite materials in automotive engineering: State-of-the-art and future trends. *Alexandria Engineering Journal*. 2025. Vol. 118. P. 1–10. DOI: 10.1016/j.aej.2024.12.002.
8. Madhan Kumar S., Govindaraj E., Balamurugan D., Daniel F. Design analysis and fabrication of automotive transmission gearbox using hollow gears for weight reduction. *Materials Today: Proceedings*. 2021. Vol. 45, Part 7. P. 6822–6832. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.12.1005.
9. Life Cycle Assessment studies on lightweight materials for automotive applications – An overview. *Energy Reports*. 2022. Vol. 8, Suppl. 3. P. 338–345. DOI: 10.1016/j.egyr.2022.01.067.

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ПОВЕРХНЕВОГО ПЛАСТИЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ВТОМНОЇ МІЦНОСТІ ДЕТАЛЕЙ АВІАЦІЙНИХ ДВИГУНІВ

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Україна

Підвищення втомної міцності та довговічності робочих лопаток газотурбінних двигунів є актуальним завданням сучасного машинобудування. Одним із найбільш ефективних підходів є модифікація поверхневого шару, що дозволяє створювати залишкові стискаючі напруження та підвищувати опір матеріалу розвитку втомних тріщин. Найбільш поширеними технологіями є дробоструминна обробка, ультразвукове зміцнення мікрошариками та лазерна ударна обробка [1].

Дробоструминна обробка належить до методів поверхневого пластичного деформування та реалізується шляхом багаторазового ударного впливу сферичних частинок на поверхню матеріалу. Під час кожного контакту відбувається локальна пластична деформація, що призводить до утворення залишкових стискаючих напружень у поверхневому шарі. Схематично принцип формування зміцненого шару та механізм дії ударних частинок наведено на рисунку 1.



Рис. 1. Принципова схема дробоструминної обробки

Завдяки перекриттю зон пластичної деформації формується рівномірний зміцнений шар, що сприяє збільшенню ресурсу роботи деталей. Разом із тим застосування дробоструминної обробки супроводжується підвищенням шорсткості поверхні та потребує контролю параметрів дробу для уникнення утворення додаткових концентраторів напружень.

Альтернативним способом зміцнення є ультразвукова обробка мікрошариками, яка відрізняється способом передачі енергії частинкам. У цьому випадку рух дробу забезпечується високочастотними коливаннями ультразвукового діапазону. Як показано на рисунку 2, зміцнювальні частинки знаходяться в обмеженому просторі між хвилеводом та поверхнею деталі, а їх багаторазові удари формують залишкові стискаючі напруження.

Особливістю ультразвукового зміцнення є більш контрольований та делікатний характер впливу на матеріал, що дозволяє застосовувати його для тонкостінних елементів та ділянок складної форми. Однак глибина зміцненого шару та рівень сформованих напружень зазвичай поступаються результатам дробоструминної обробки.



Рис. 2. Принципова схема ультразвукової дробоструминної обробки

Сучасним напрямом поверхневого зміцнення є лазерна ударна обробка, принцип якої базується на впливі коротких високоенергетичних лазерних імпульсів [2]. У процесі взаємодії випромінювання з поверхнею формується плазмовий шар високого тиску, що генерує ударну хвилю та забезпечує пластичне деформування матеріалу. Загальну схему реалізації процесу наведено на рисунку 3.

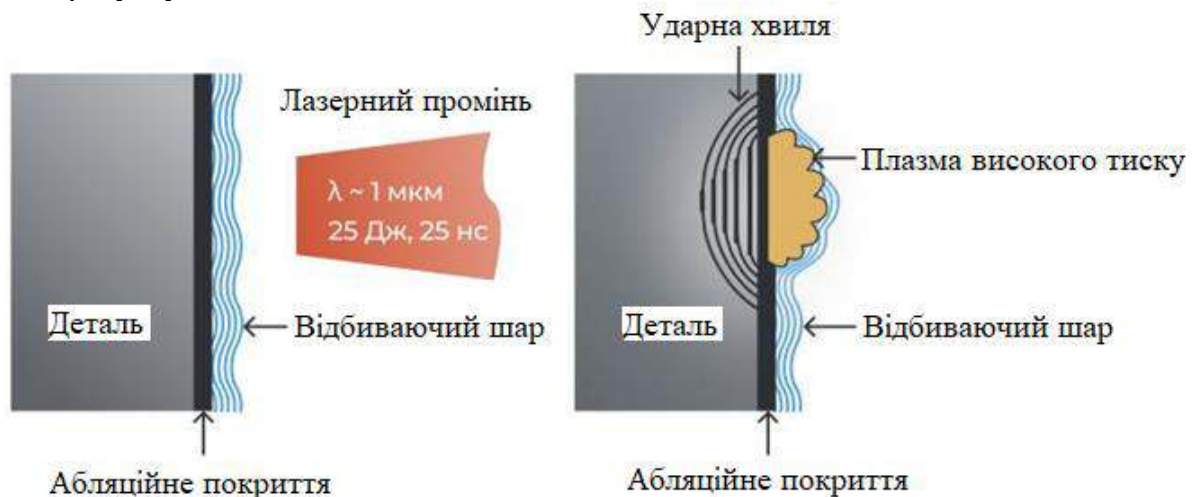


Рис. 3. Принципова схема лазерної ударної обробки

Для підвищення ефективності передачі енергії використовується обмежувальне середовище, яке сприяє поширенню пружнопластичної хвилі вглиб матеріалу. У результаті формується шар залишкових стискаючих напружень значної глибини, що забезпечує підвищення опору втомному руйнуванню та збільшення експлуатаційного ресурсу деталей.

Таким чином, кожна з розглянутих технологій має власні особливості застосування та ефективність. Дробоструминна обробка забезпечує інтенсивне зміцнення поверхні, ультразвукова технологія є доцільною для обробки тонкостінних конструкцій, а лазерна ударна обробка демонструє перспективність завдяки формуванню глибокого зміцненого шару без істотного погіршення якості поверхні.

Список використаних джерел

1. Підвищення ефективності деталей машин та різального інструменту комбінованими методами обробки / Ю. В. Широкий, Ю. О. Сисоєв, О. Д. Семененко, О. В. Торосян. // Відкриті інформаційні та комп'ютерні інтегровані технології, 2025, No 106, С 84-107. <https://doi.org/10.32620/oikit.2025.106.06>
2. Моделювання теплофізичних властивостей і впливу імпульсного лазерного випромінювання на систему «зносостійке покриття – різальний інструмент» /Ю. В. Широкий, О. Д. Семененко // Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. – 2026. – № 215. – С. 45-59. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.215.2026.358685>

Труш В.С.¹, д.т.н., старш. досл.
trushvasyl@gmail.com
Рівера Р.Р.²,
riverarob91@gmail.com
Гасій О.Б.², д.т.н., доцент
o.hasiy@gmail.com

ЗМІЦНЕННЯ ПОВЕРХНЕВИХ ШАРІВ ТИТАНОВИХ ДЕТАЛЕЙ ЛІТАЛЬНОЇ ТА НАЗЕМНОЇ ТЕХНІКИ ЛІСОВОГО ГОСПОДАРСТВА ОКСИДУВАННЯМ ЯК ЗАСІБ ПІДВИЩЕННЯ ЇХ РЕСУРСУ

¹ Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, Україна

² Національний лісотехнічний університет України, Україна

У сучасному лісовому господарстві впровадження спеціалізованої літальної та наземної техніки для розвідки, моніторингу та ліквідації надзвичайних ситуацій вимагає використання матеріалів з унікальним поєднанням легкості, конструкційної жорсткості та екстремальної термічної стійкості [1-3]. Саме тому застосування титанових сплавів у силових елементах як безпілотних апаратів, так і важких наземних лісопожежних машин є надзвичайно перспективним напрямом, оскільки цей метал здатний безперервно та надійно працювати безпосередньо в зонах інтенсивного теплового випромінювання [4-5]. На відміну від традиційного алюмінію чи вуглепластикових композитів, які з часом можуть втрачати механічну жорсткість або безповоротно деградувати при нагріванні понад 200°C, тонкостінні титанові деталі зберігають свої первинні геометричні параметри навіть при перебуванні під дією короткотривалих високих температур. Завдяки високій низькій теплопровідності, спеціальні захисні екрани з титану товщиною до 3 мм здатні ефективно відсікати тепловий потік, надійно захищаючи внутрішню дороговартісну електроніку, літій-полімерні акумулятори та оптичні сенсори повітряних дронів, а також гідравлічні шланги та паливні магістралі наземних тракторів і всюдиходів від критичного перегріву. Висока питома міцність титану дозволяє суттєво оптимізувати вагу всього силового каркаса літального апарату, що безпосередньо трансформується у збільшення тривалості польоту апаратів. Крім того, виняткова корозійна та хімічна інертність цього матеріалу гарантує тривалий термін експлуатації техніки в умовах постійного впливу агресивних продуктів згоряння, щільного попелу, сажі та спеціальних рідких хімічних сполук, які викликають прискорене окиснення стандартних конструкційних сталей. Хороша втомна довговічність титанових деталей дозволяє вузлам кріплення двигунів літальних апаратів ефективно витримувати тривалі знакозмінні вібраційні навантаження, які неминуче виникають через потужні турбулентні потоки гарячого повітря над вогнем або при русі по бездоріжжю, пнях та повалених стовбурах.

Використання передових методів інженерії поверхонь, зокрема технології вакуумного оксидування (формування оксидних шарів на металі в умовах розрідженого газового середовища), дає можливість сформувати на титані зміцнений шар, що складається з тонкого твердого захисний шару та дифузійно зміцненого шару. Твердий захисний шар на основі, зокрема, діоксиду титану, підвищує зносостійкість деталей в умовах тертя та запобігає адгезійному схоплюванню в рухомих шарнірних механізмах та гідроциліндрах, що працюють у запиленому середовищі, а дифузійний шар забезпечує підвищення втомних властивостей. Таке покриття також слугує надійним бар'єром проти водневої крихкості, виключаючи деградацію металу під дією специфічних газів, що виділяються під час горіння лісових масивів та торфовищ. У довгостроковій перспективі зниження витрат на ремонт та обслуговування таких живучих авіаційних та наземних комплексів повністю компенсує високу первинну вартість титанової сировини. Таким чином, системний перехід на титанічні компоненти закладає надійний технологічний фундамент для серійного виробництва високоефективної, витривалої та всепогодної техніки нового покоління, здатної цілодобово виконувати

найскладніші місії з моніторингу, гасіння та інженерного облаштування лісових угідь. Крім того, проведення оксидування в умовах контрольованого розрідженого середовища дозволяє повністю виключити присутність сторонніх шкідливих газів, зокрема азоту та водню, які при звичайному атмосферному нагріванні викликають небезпечне окрихчення металу [6]. Метод базується на дозованому дифузійному насиченні поверхні чистим киснем, що забезпечує формування двошарового інтерфейсу: тверда фазова плівка титану та підшару твердого розчину (дифузійно зміцненого шару). Отриманий дифузійний підшар виконує функцію демпфуючої «подушки», яка ефективно запобігає продавлюванню або відшаруванню зовнішнього керамічного шару під дією значних контактних навантажень. Для тонкостінних елементів літальної та наземної техніки завтовшки до 3 мм таке зміцнення є ідеальним рішенням, оскільки воно обмежується глибиною в кілька мікронів і зберігає високу в'язкість та пластичність серцевини матеріалу. На відміну від методів прямолінійного напилення, газове середовище у вакуумній камері гарантує рівномірність зміцненого шару на складних геометричних профілях та внутрішніх порожнин. Крім того вакуумне оксидування є екологічно чистим процесом, який не потребує використання токсичних електролітів чи кислот, що суттєво спрощує та здешевлює промислове виробництво. Таким чином, цей метод постає як найбільш раціональний та високоефективний інструмент інженерії поверхонь, що дозволяє максимізувати довговічність.

Метою роботи є виявити вплив оксидування у контрольованому розрідженому кисневмісному газовому середовищі (у вакуумі) на втомну довговічність за умов чистого згину та ударну в'язкість за умов розтягу тонколистового матеріалу з титанового сплаву ВТ6.

Матеріали та методика досліджень. Досліджуваним матеріалом є високоміцний двофазний ($\alpha+\beta$) титановий сплав ВТ6, хімічний склад якого наведено у табл. 1

Таблиця 1. Хімічний склад титанового сплаву ВТ6 (ГОСТ 19807 – 91), % мас.

Fe	C	Si	V	N	Ti	Al	Zr	O	H	домішки
0,6	0,1	0,1	3,5 ... 5,3	0,05	86,45... 90,9	5,3... 6,8	0,3	0,2	0,015	інші 0,3

Оксидування у вакуумі (хіміко-термічну обробку) тонколистового матеріалу з титанового сплаву ВТ6 здійснювали на лабораторному обладнанні у ФМІ ім. Г.В. Карпенка НАН України за режимом: (800°C, 1 год, $133,3 \cdot 10^{-6}$ Па + 750°C, 5 год, $133,3 \cdot 10^{-3}$ Па). Проводили втомні випробування за умов чистого згину (амплітуда деформації $\pm \epsilon = 0,6\%$) на сконструйованій та виготовленій установці у ФМІ ім. Г.В. Карпенка НАН України [6].

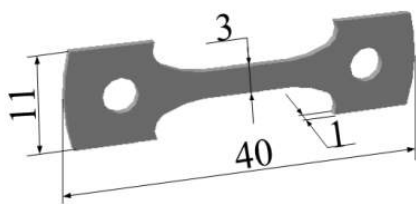


Рис. 1. Зразок для випробувань на чистий згин та ударний розтяг

Визначення ударної в'язкості за розтягу проводили на стандартній установці типу маятниковий копер моделі КМ-0,5. Для проведення досліджень на розтяг при ударі було проведено незначну модифікацію даного копра. Модифікація копра полягала у наявності спеціального пристосування для кріплення зразків. Принципову схему проведення випробування наведено на рис. 2.

Результати досліджень та їх обговорення. Враховуючи, що оксидування здійснюється за температури нижче поліморфного перетворення, то така обробка не призводить до збільшення розміру зерна, а, відповідно, і до погіршення механічних характеристик матеріалу. В результаті оксидування на поверхні титанового сплаву ВТ6 сформувалася тонка фазова плівка та перехідний дифузійно зміцнений шар. Товщина фазової плівки не перевищувала

0,5..1 мкм, а товщина дифузійно зміцненого шару становила ~25 мкм. Конструкція такого сформованого зміцненого шару дає можливість збільшити циклічну довговічність без втрати границі міцності

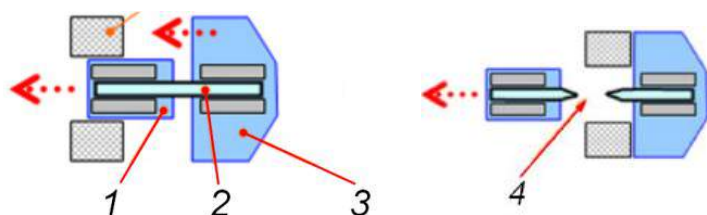


Рис. 2. Принципова схема проведення випробування на визначення ударної в'язкості за розтягу на маятниковому копрі:
1 – рухомий кронштейн маятникового копра, 2 – зразок до випробування, 3 – нерухомий кронштейн маятникового копра, 4 – зразок після ударного розтягу

В результаті випробування окисдованого та необробленого тонколистового матеріалу з титанового сплаву марки ВТ6 на чистий згин отримані такі результати досліджень: втомна довговічність при $\pm\epsilon=0,6\%$ необробленого зразка становила 42 тис. циклів (± 5 тис. циклів), а окисдованого 51 тис. циклів (± 3 тис. циклів), тобто приріст втомної довговічності окисдованого зразка 15..19%. Підвищення циклічної довговічності можна пояснити формуванням зміцненого поверхневого шару, який виступає своєрідним гальмуванням зародження та розповсюдження втомних тріщин. Адже, відомо, що за втомного навантаження саме у поверхневому шарі починає відбуватися руйнування виробу.

Окисдування також позитивно вплинула на ударна в'язкість за умов розтягу: спостерігається незначне підвищення ударної в'язкості на 5...7% відносно необробленого (з 121 до 129 кДж/см²). Такі підвищення ударної в'язкості можна пояснити знову ж таки позитивним впливом зміцненого поверхневого шару. Адже, запропонований режим окисдування забезпечив у приповерхневому шарі формування певного градієнту стискальних напружень, які, власне, і впливають позитивно на ударну в'язкість.

Висновок. Запропонований режим окисдування титанового сплаву позитивно вплинув як на циклічну довговічність за умов чистого згину, так і на ударну в'язкість за розтягу. Втомна довговічність за чистого згину (амплітуда деформації $\pm\epsilon=0,6\%$) тонколистового матеріалу з титанового сплаву марки ВТ6 підвищилась на 15..19% відносно необробленого. Ударна в'язкість за розтягу підвищилась на 5...7%.

Список використаних джерел

1. Машины і обладнання для лісового господарства: посібник. за ред. В.І. Кравчука; М-во аграр. політики та прод-ва України; УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого. – Дослідницьке: УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого. – 2011. – 192 с.
2. Виговський А. Ю., Білоус М. М. Лісогосподарські машини та знаряддя : навч. посіб. Київ: Компринт, 2018. 507 с.
3. Машины та обладнання для лісового господарства: Монографія / [авт. кол.: Халін С. В., Думич В. В., Мачуга О. С., Москаленко О.Д., Стиранівський О.А., Сало Я.М. та ін.]. - Дослідницьке, 2023. – 465 с.: іл., табл.
4. Leyens C. Titanium and titanium alloys: fundamentals and applications / C. Leyens, P. Manfred. – Wiley-VCH, 2003. – 532 p.
5. Fedirko V.M., Luk'yanenko A.G., Pohrelyuk I.M., Trush V.S. Increasing the serviceability of products from single-phase titanium alloys by thermochemical treatment. Materials Performance and Characterization. 2017. Vol. 6, No 4. P. 642–655. (Scopus, Web of Science).
6. Федірко В.М., Погрелюк І.М., Лук'яненко О.Г., Труш В.С. Хіміко-термічна обробка титанових сплавів. Поверхнєве твердорозчинне модифікування. К.: Наукова думка, 2020. с. 183.

3. ПРОЦЕСИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ТА РОБОТИЗАЦІЇ

УДК 681.5

Добров А.В., здобувач
Andrii.Dobrov@kname.edu.ua
Аксьонов Є.О., доцент
Yevhen.Aksonov@kname.edu.ua

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА КОНТРОЛЮ РОБОЧИХ ПАРАМЕТРІВ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова

Сучасний транспортний засіб (ТЗ) є складним об'єктом автоматизації, ефективність та безпека експлуатації якого безпосередньо залежать від технічного стану його ключових вузлів та агрегатів. В той же час, штатні засоби діагностики більшості ТЗ суттєво обмежують доступ водія до оперативної технічної інформації. Найчастіше водій отримує сповіщення лише у разі критичної відмови, що унеможливорює превентивну діагностику стану ТЗ у реальному часі. Спеціалізовані системи контролю призначені здебільшого для станцій техобслуговування, дороговартісні, мають обмежені функції і закриту архітектуру. Тому розробка автономної системи контролю, призначеної для зчитування та аналізу робочих параметрів у реальному часі безпосередньо під час руху ТЗ, є актуальною задачею.

Визначено вимоги до розроблюваної системи. Вона повинна бути реалізована у вигляді автономного пристрою, що здійснює безперервний збір, обробку та візуалізацію даних, включаючи параметри двигуна, акумулятора та бортової мережі, а також допоміжних систем. Апаратна частина має відповідати галузевим стандартам, зокрема, АЕС-Q100, ISO 16750-3, ISO 16750-4. Для універсальності та сумісності з різними ТЗ, система повинна мати дві шини CAN та шину K-Line. Користувацький інтерфейс повинен виконувати функції відображення поточних значень параметрів і сповіщення про аварійні стани. Особлива увага має бути приділена живленню та енергоспоживанню системи. Окрім того, система повинна мати відкриту модульну архітектуру з можливістю подальшого розширення функцій.

Враховуючи вказані вимоги, було проаналізовано та обрано набір апаратних засобів, з яких складатиметься система: інтерфейсні модулі, символний дисплей, схема живлення, годинник реального часу. В якості обчислювального ядра системи обрано налагоджувальну плату Arduino Nano [1], що для даної задачі є найбільш оптимальною. Розроблено структурну схему системи. Визначено функції і розроблено блок-схему програмного забезпечення мікроконтролера. Створено віртуальну модель системи у середовищі Wokwi (рис. 1).

Важливим етапом моделювання системи контролю було створення цифрових двійників шин CAN та K-Line автомобіля для імітації передачі пакетів даних. Середовище Wokwi має обмежений набір вбудованих моделей апаратних засобів, проте надає можливість створення користувацьких компонентів та опису алгоритмів їх роботи [2]. Тому цифрові двійники шин реалізовано як користувацькі компоненти, що функціонують за логікою спрощеного кінцевого автомата. Опис компонентів складається з json-файлу, що містить перелік виводів компоненту, та програми мовою C, що описує алгоритми функціонування компоненту. Програма включає ініціалізацію компоненту і циклічне генерування переривань з формуванням тестових пакетів даних. Такий підхід дозволив налагодити роботу системи без підключення до реального ТЗ.

Дослідження роботи створеної моделі виконувалось у кілька етапів, що включають аналіз роботи системи в режимі CAN-сніффера (пасивного мережевого аналізатора) та у режимі бортового комп'ютера (активної взаємодії з електронними системами ТЗ). Особливу увагу приділено дослідженню роботи системи у режимі зчитування помилок. Моделювання повністю підтвердило працездатність розробленої схеми і програми мікроконтролера.

Створено макетний зразок системи, що складається з налагоджувальної плати Arduino Nano, інтерфейсних модулів MCP2515 і символного дисплею. Реалізовано модуль зв'язку з шиною K-Line на базі компаратора LM393. Створено схему живлення. Налагодження макету на початковому етапі виконувалось в лабораторних умовах з підключенням до панелі приладів автомобілю Volkswagen Bora. Підтверджено роботоздатність створеного макету.

АНАЛІЗ КІНЕМАТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ АВТОМАТИЗОВАНОГО НАМОТУВАННЯ ВІДВОДІВ СКЛОПЛАСТИКОВИХ ТРУБОПРОВОДІВ ВИСОКОГО ТИСКУ

Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, Україна

Склопластикові трубопроводи застосовують для транспортування рідких і газоподібних середовищ за умов, у яких важливими є корозійна стійкість, порівняно невелика маса конструкції та можливість формування заданої структури армування. Надійність трубопроводу визначається не лише характеристиками прямих ділянок, а й міцністю фасонних елементів, зокрема відводів. У цих елементах змінюється напрямок потоку, виникають додаткові гідродинамічні навантаження, а внутрішній тиск створює складний напружений стан на ділянках із різною кривизною.

Виготовлення відводів методом намотування ускладнюється тим, що їхня поверхня не є тілом обертання з постійним радіусом. Пряма труба має циліндричну поверхню, для якої траєкторія волокна може бути задана відносно постійного діаметра. Поверхня відводу складається з тороїдальної частини та, залежно від конструкції, циліндричних кінцевих ділянок. Внутрішній і зовнішній радіуси криволінійної частини мають різну довжину, тому однакове переміщення оправки не забезпечує однакових умов укладання волокна на всій поверхні. У відомих системах автоматизованого намотування відводів траєкторію волокна формують на основі геодезичних, напівгеодезичних або керованих негеодезичних ліній. Застосування наближених траєкторій без урахування локальної геометрії може спричинити зісковзування волокна, його відрив від поверхні та утворення перемичок над увігнутими ділянками. Для усунення цих дефектів потрібне спільне визначення траєкторії на оправці та закону руху виконавчих органів намотувального устаткування [1].

Метою роботи є аналіз кінематичних параметрів автоматизованого намотування відводів склопластикових трубопроводів високого тиску та визначення вимог до узгодження рухів оправки, ниткорозкладального пристрою і системи підтримання натягу армувального матеріалу.

Форма відводу може бути задана радіусом поперечного перерізу труби, радіусом осової лінії та кутом повороту. Кожній точці поверхні відповідають положення на дузі відводу та кутове положення в поперечному перерізі. На зовнішньому боці довжина елементарної ділянки поверхні більша, ніж на внутрішньому. Через це траєкторія, яка має однаковий кутовий приріст у параметричних координатах, у фізичному просторі може характеризуватися різними довжиною кроку, швидкістю укладання та щільністю покриття.

Під час проєктування траєкторії потрібно забезпечити прилягання волокна до оправки, заданий напрямок армування та рівномірне покриття поверхні. Геодезична траєкторія має природну стійкість на поверхні, оскільки за ідеалізованих умов волокно не зазнає поперечної сили, що спричиняє його зісковзування. Проте використання лише геодезичних ліній обмежує можливість вибору кутів армування та розподілу матеріалу. Негеодезичні траєкторії дозволяють змінювати структуру армування, але потребують контролю відхилення від стійкого положення і врахування зчеплення волокна з поверхнею оправки або попереднім шаром.

У дослідженні конструкції намотуваних композитних відводів показано можливість використання негеодезичних траєкторій як на тороїдальній частині, так і на циліндричних кінцевих ділянках. Числове моделювання таких схем підтверджує, що вибір початкового кута та способу переходу між ділянками впливає на структуру армування і розрахункову несучу здатність виробу [2].

Перетворення заданої траєкторії волокна на програму руху устаткування є окремим кінематичним завданням. Потрібно визначити положення точки сходження волокна з ниткорозкладального пристрою, орієнтацію напрямного елемента, кутове положення оправки та швидкості всіх керованих координат. Рухи мають бути синхронізовані так, щоб точка контакту волокна послідовно проходила розрахованою лінією, а вільна ділянка армувального матеріалу не перетинала оправку та елементи обладнання.

Для прямої циліндричної оправки поширеною є схема з її обертанням навколо нерухомої осі та зворотно-поступальним рухом ниткорозкладального пристрою. Намотування відводу потребує складнішого взаємного переміщення. Криволінійна оправка може встановлюватися на багатокоординатному позиціонері, а ниткорозкладальний пристрій – переміщуватися вздовж кількох лінійних координат із додатковою зміною орієнтації. Інший варіант передбачає нерухоме або обмежено рухоме закріплення оправки та обхід її поверхні робочим органом.

Кількість керованих координат визначається конструкцією обладнання та способом формування траєкторії. Мінімум необхідно забезпечити відносно обертання навколо поперечного перерізу відводу та переміщення вздовж його осьової дуги. Для запобігання зіткненням і підтримання заданого кута сходження волокна можуть використовуватися радіальне переміщення, зміна висоти, поворот ниткорозкладальної головки й орієнтація оправки.

Важливим кінематичним параметром є швидкість точки укладання волокна на поверхню. За нерівномірного руху приводів вона змінюється, навіть якщо середня частота обертання оправки залишається сталою. На зовнішньому радіусі відводу за однакового кутового переміщення точка поверхні проходить більшу відстань, ніж на внутрішньому. Тому закон руху повинен компенсувати зміну локального радіуса, інакше швидкість укладання та натяг волокна будуть періодично коливатися.

Кут намотування визначається напрямком дотичної до траєкторії відносно вибраної координатної лінії поверхні. На тороїдальній частині цей кут загалом змінюється вздовж траєкторії. Підтримання постійного кута в одній системі координат не гарантує однакового розташування волокон відносно головних напрямків поверхні. Для силової оболонки високого тиску траєкторії мають узгоджуватися з розрахунковою схемою армування, а кінематична система – відтворювати їх із допустимою похибкою.

Зміна швидкості руху ниткорозкладального пристрою відносно обертання оправки впливає на крок укладання. За недостатнього переміщення сусідні проходи перекриваються, унаслідок чого виникає локальне потовщення шару. Надмірне переміщення утворює проміжки між стрічками або пучками волокон. Для багатовиткової схеми похибка одного проходу може накопичуватися, тому після завершення циклу траєкторія не збігається з розрахованою лінією повернення. На стійкість укладання впливає положення ниткорозкладального пристрою відносно точки контакту. Надмірна відстань збільшує довжину вільної ділянки волокна, робить її чутливою до коливань і похибок руху. Надто мале наближення ускладнює обхід криволінійної поверхні та підвищує ризик зіткнення головки з оправкою. Напрямок виходу волокна повинен бути близьким до дотичного до траєкторії, оскільки значне кутове відхилення створює поперечну складову сили натягу.

Натяг визначає щільність укладання армувального матеріалу, його прилягання до поверхні та ущільнення шару. Недостатній натяг сприяє утворенню хвилястості, провисання і відриву волокна на увігнутих ділянках. Надмірний натяг може зміщувати попередньо укладені волокна, деформувати оправку, витискати надлишкову кількість зв'язувального матеріалу та створювати залишкові напруження. У процесі обходу відводу натяг може змінюватися через прискорення виконавчих органів, зміну довжини вільної ділянки волокна та відмінність локальних швидкостей поверхні. Пасивний гальмівний пристрій не завжди здатний компенсувати ці зміни. Для автоматизованого обладнання доцільно застосовувати керовану систему натягу зі зворотним зв'язком, яка враховує поточні координати, швидкість руху і сигнал датчика сили.

Особливо складними є переходи між циліндричними кінцевими ділянками та тороїдальною частиною. У цих зонах змінюються кривизна поверхні, напрямок осі виробу та закон формування траєкторії. Різка зміна кінематичних параметрів може спричинити стрибок прискорення, коливання натягу або відхилення волокна від заданої лінії. Перехід потрібно формувати як плавну ділянку траєкторії з безперервними положенням, швидкістю та, за можливості, прискоренням виконавчих органів.

Під час реверсу руху ниткорозкладального пристрою виникають додаткові ризики. Зупинення однієї координати та зміна її напрямку за безперервного обертання оправки змінюють кут укладання і можуть створювати скупчення волокна біля межі намотування. Закон реверсу має бути узгоджений з обертальним рухом і враховувати обмеження за швидкістю, прискоренням та ривком приводів. Основні кінематичні параметри, їхній вплив на процес та можливі порушення узагальнено в табл. 1.

Таблиця 1. Вплив кінематичних параметрів на автоматизоване намотування відводу

Кінематичний параметр	Вплив на процес	Можливе порушення
Кутове положення оправки	Визначає положення точки укладання в поперечному перерізі	Зміщення траєкторії та нерівномірність покриття
Швидкість обертання	Формує локальну швидкість поверхні	Коливання натягу та кута намотування
Переміщення вздовж осьової дуги	Визначає крок і напрямок траєкторії	Проміжки або надмірне перекриття
Радіальне положення головки	Задає відстань до точки укладання	Зіткнення або збільшення вільної ділянки волокна
Орієнтація ниткорозкладальної головки	Визначає напрям сходження волокна	Поперечна сила та зісковзування
Швидкість укладання	Впливає на просочування й рівномірність шару	Нерівномірне нанесення матеріалу
Прискорення приводів	Визначає динамічне навантаження системи	Коливання волокна та зміна натягу
Закон реверсу	Формує крайні ділянки проходу	Скупчення волокна або пропуск поверхні
Синхронізація координат	Забезпечує відтворення розрахованої траєкторії	Накопичення контурної похибки
Швидкість подавання волокна	Узгоджує витрату матеріалу з рухом точки укладання	Провисання або надмірне розтягування

Як видно з табл. 1, якість намотування визначається не окремою координатою, а точністю їх спільного руху. Наприклад, відхилення кута укладання може бути викликане похибкою обертання оправки, відставанням лінійного привода або неправильною орієнтацією головки. Коливання натягу може бути пов'язане як зі швидкістю подавання волокна, так і зі зміною довжини його вільної ділянки.

Для оцінювання точності руху доцільно розділяти похибку положення окремої координати та контурну похибку. Невеликі похибки кількох приводів можуть частково компенсуватися або, навпаки, складатися в напрямку, перпендикулярному до заданої траєкторії. Саме контурне відхилення визначає фактичне зміщення волокна на поверхні оправки.

Програмне керування має враховувати обмеження приводів. Траєкторія, що є геометрично допустимою, може виявитися технологічно невідтворюваною через надмірні швидкості або прискорення однієї з координат. Тому розрахунок програми повинен включати

перевірку кінематичних обмежень, згладжування переходів та, за потреби, зміну загальної швидкості проходження траєкторії.

Автоматизоване устаткування доцільно будувати на основі координатно керованих приводів оправки та ниткорозкладального пристрою, системи керованого натягу, пристрою просочування волокна, датчиків положення і засобів контролю зони укладання. Для виробів високого тиску важливо забезпечувати відтворюваність технологічного процесу та документування параметрів виготовлення. ISO 14692-2:2017 установлює вимоги до кваліфікації та виготовлення склопластикових труб і фасонних елементів, програм якості, маркування та технологічної документації [3].

Положення виконавчих органів може контролюватися енкадерами приводів, але цих даних недостатньо для повної оцінки процесу. Потрібно також реєструвати натяг волокна, швидкість його подавання, орієнтацію головки та фактичне положення пучка на поверхні. Відеоконтроль або оптичне вимірювання дозволяють виявляти поперечне зміщення, проміжки між проходами та надмірне перекриття.

Параметри, які доцільно використовувати для поточного контролю, та можливі коригувальні дії наведено в табл. 2. Дані таблиці показують, що коригування процесу має ґрунтуватися на спільному аналізі кількох сигналів. Зростання натягу за незмінної швидкості подавання може бути наслідком збільшення локальної швидкості поверхні або віддалення головки від точки укладання. Поперечне зміщення волокна може виникати через помилку траєкторії, неправильний напрям сходження або недостатнє зчеплення з поверхнею. Реакція системи керування повинна відповідати встановленій причині відхилення

Таблиця 2. Контрольовані параметри та можливі дії системи керування

Контрольований параметр	Інформація про стан намотування	Можлива коригувальна дія
Положення приводів	Відповідність фактичного руху програмі	Корекція положення та швидкості координат
Контурна похибка	Відхилення точки укладання від траєкторії	Узгоджене коригування кількох приводів
Натяг волокна	Стан подавання та прилягання матеріалу	Зміна гальмівного моменту або швидкості подавання
Довжина вільної ділянки	Положення головки відносно поверхні	Радіальне переміщення головки
Кут сходження волокна	Імовірність поперечного зміщення	Коригування орієнтації ниткорозкладального пристрою
Крок між проходами	Рівномірність покриття поверхні	Зміна співвідношення координатних швидкостей
Ширина армувальної стрічки	Фактична зона покриття	Уточнення кроку траєкторії
Положення волокна на оправці	Наявність зісковзування або відриву	Зниження швидкості, зміна натягу чи траєкторії
Швидкість укладання	Умови просочування та ущільнення	Масштабування швидкості проходження програми
Навантаження приводів	Наближення до граничних режимів	Зниження прискорення або зміна конфігурації руху

Під час налагодження обладнання спочатку доцільно перевіряти програму в режимі імітації без подавання волокна. Це дозволяє виявити можливі зіткнення, перевищення робочих ходів і надмірні швидкості координат. Наступний етап передбачає пробне укладання технологічного матеріалу з реєстрацією положення приводів і натягу. Після уточнення

траєкторії виконують намотування армувального матеріалу та оцінюють рівномірність сформованого шару.

Окремої уваги потребує калібрування взаємного положення оправки та ниткорозкладального пристрою. Похибка встановлення системи координат зміщує всю траєкторію, хоча окремі приводи можуть точно відпрацьовувати програмні команди. Для криволінійної оправки необхідно враховувати похибки її виготовлення, установлення, деформацію під власною вагою та можливе зміщення під дією натягу волокна.

Контроль готового відводу повинен включати перевірку геометрії, товщини стінки, орієнтації армувальних шарів, наявності проміжків, складок, порожнин і зон недостатнього просочування. Для систем високого тиску результати контролю потрібно зіставляти з протоколом технологічних параметрів. Це дозволяє встановлювати зв'язок між дефектами та відхиленнями швидкості, натягу або положення виконавчих органів.

Проведений аналіз показав, що визначальним чинником автоматизованого намотування відводів є узгодження руху всіх керованих координат із локальною геометрією криволінійної оправки. Застосування постійних співвідношень швидкостей, характерних для циліндричних виробів, не забезпечує рівномірного укладання на внутрішньому й зовнішньому радіусах відводу.

Кінематична модель обладнання повинна встановлювати зв'язок між траєкторією волокна на поверхні, положенням точки сходження, орієнтацією ниткорозкладального пристрою та координатами приводів. Програма руху має забезпечувати плавні переходи, допустимі швидкості й прискорення, мінімальну контурну похибку та стабільний натяг армувального матеріалу.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на розроблення параметричної моделі криволінійної оправки, автоматизоване формування геодезичних і негеодезичних траєкторій, розрахунок багатокоординатних законів руху та експериментальне визначення допустимих відхилень натягу й кута укладання. Окремим завданням є створення алгоритму корекції руху за даними оптичного контролю фактичного положення волокна.

Список використаних джерел

1. Li, H. CAM system for filament winding on elbows / H. Li, Y. Liang, H. Bao // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2005. – Vol. 161, No. 3. – P. 491–496. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2004.07.093.
2. Design of filament-wound composite elbows based on non-geodesic trajectories / B. Zhang, H. Xu, L. Zu [et al.] // *Composite Structures*. – 2018. – Vol. 189. – P. 635–640. – DOI: 10.1016/j.compstruct.2018.02.008.
3. ISO 14692-2:2017. Petroleum and natural gas industries – Glass-reinforced plastics (GRP) piping – Part 2: Qualification and manufacture. – 2nd ed. – Geneva : International Organization for Standardization, 2017. – 80 p.

АВТОМАТИЗАЦІЯ ТЕСТУВАННЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МІКРОКОНТРОЛЕРНИХ СИСТЕМ

Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова

Сучасний розвиток мікроконтролерних систем та embedded-технологій супроводжується постійним зростанням кількості пристроїв, що використовуються в системах автоматизації, промисловості, робототехніці, Інтернеті речей та побутовій електроніці. Збільшення складності програмного забезпечення мікроконтролерних систем підвищує вимоги до його якості, надійності та коректності функціонування. Одним із важливих етапів розробки є тестування програмного забезпечення, яке дозволяє виявляти помилки та забезпечувати відповідність роботи системи встановленим вимогам.

У більшості випадків перевірка мікроконтролерних проєктів виконується вручну шляхом аналізу програмного коду та електронної схеми, що потребує значних витрат часу та залежить від людського фактора. Використання сучасних середовищ моделювання відкриває можливості для автоматизації процесів контролю та оцінювання результатів розробки. У зв'язку з цим розробка системи автоматизованого тестування програмного забезпечення мікроконтролерних систем є актуальним завданням, спрямованим на підвищення ефективності перевірки проєктів та покращення якості програмного забезпечення.

Більшість існуючих рішень орієнтовані на моделювання або модульне тестування окремих компонентів, проте не забезпечують комплексної автоматичної перевірки апаратної схеми і програмної реалізації проєкту мікроконтролерної системи в цілому. Запропоновано виконувати тестування мікроконтролерних систем на основі проєктів, створених у середовищі Wokwi [1] за заданими правилами перевірки з формуванням звіту. Це дозволяє створити універсальну систему автоматизованої перевірки, яку можна адаптувати до різних задач оцінювання мікроконтролерних проєктів без зміни основної архітектури програми.

Основою розроблюваної системи є набір правил тестування, що зберігаються у форматі JSON. Для кожного завдання визначаються обов'язкові елементи схеми та програмного коду, а також параметри перевірки, що дозволяє додавати нові завдання без зміни програмної логіки.

Розроблено програмне забезпечення системи автоматизованого тестування. Для реалізації системи використано Python як основну мову програмування, бібліотеку PyQt6 [2] для створення графічного інтерфейсу користувача та мову розмітки HTML для формування підсумкових звітів. Програма складається з окремих модулів: графічного інтерфейсу, перевірки проєктів, формування звітів та набору правил тестування. Такий підхід забезпечує модульність, гнучкість та можливість подальшого розвитку системи.

Система реалізує послідовний процес перевірки проєкту. Користувач завантажує Wokwi-проєкт у вигляді архіву, після чого система виконує аналіз програмного коду та структури електронної схеми. На основі визначених правил тестування здійснюється перевірка компонентів, використаних функцій та відповідності проєкту поставленому завданню. Після завершення аналізу формується звіт (рис. 1), який містить результати перевірок та інформацію про виявлені помилки або невідповідності.

Для оцінювання роботи системи було підготовлено декілька типових навчальних завдань, які охоплюють роботу зі світлодіодами, кнопками, зумерами, аналоговими входами та багатокомпонентними схемами. Для кожного завдання визначено набір необхідних компонентів та перелік перевірок, що виконуються автоматично.

Звіт перевірки Wokwi-проєкту

Перевірка	Статус	Повідомлення
Файл .ino	OK	Файл програмного коду знайдено
Файл diagram.json	OK	Файл схеми знайдено
wokwi-arduino-uno	OK	Компонент знайдено
wokwi-led	OK	Компонент знайдено
wokwi-resistor	OK	Компонент знайдено
LED	OK	Світлодіод знайдено
Підключення LED	OK	LED green підключено до піна 12 через резистор rg
Відповідність коду і схеми	OK	У коді знайдено використання піна 12 та функції digitalWrite
Код: setup	OK	Елемент setup знайдено
Код: loop	OK	Елемент loop знайдено
Код: pinMode	OK	Елемент pinMode знайдено
Код: digitalWrite	OK	Елемент digitalWrite знайдено
Код: delay	OK	Елемент delay знайдено

Успішних перевірок: 13

Помилки: 0

Загальний бал: 100.0%

Висновок: Завдання виконано правильно

Рис. 1. Приклад звіту за результатами тестування проєкту мікроконтролерної системи

Експериментальні дослідження підтвердили працездатність розробленої системи автоматизованого тестування проєктів мікроконтролерних систем. У процесі дослідження система успішно виконала аналіз структури проєктів, електронних схем та програмного коду для всіх підготовлених тестових завдань. Проведено тестування на проєктах із навмисно внесеними помилками. У всіх досліджуваних випадках система успішно виявила невідповідності між схемою, програмним кодом та правилами тестування.

Список використаних джерел

1. Wokwi Docs [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://docs.wokwi.com> (дата звернення: 15.07.2026).
2. PyQt6 [Електронний ресурс] // PyPI. – Режим доступу: <https://pypi.org/project/PyQt6/> (дата звернення: 15.07.2026).

АВТОМАТИЗОВАНА ТЕХНОЛОГІЯ НАМОТУВАННЯ СКЛОПЛАСТИКОВИХ ТРУБ ВИСОКОГО ТИСКУ

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Україна

Склопластикові трубопроводи високого тиску широко застосовуються у нафтогазовій, хімічній, енергетичній та комунальній галузях завдяки високій корозійній стійкості, малій масі, тривалому терміну експлуатації та значній питомій міцності. Разом із тим надійність таких виробів значною мірою визначається якістю технологічного процесу їх виготовлення.

Одним із найефективніших способів виробництва композитних труб є автоматизоване намотування безперервного скловолокна на обертову оправку. Саме на цьому етапі формуються основні механічні характеристики виробу. Навіть незначні відхилення кута намотування, величини натягу армувального матеріалу або швидкості переміщення каретки можуть призвести до виникнення внутрішніх напружень, порушення структури композиту, появи пористості та мікротріщин, що негативно впливає на герметичність і довговічність трубопроводів.

У зв'язку з цим актуальним є вдосконалення автоматизованої технології намотування шляхом впровадження сучасних засобів контролю та регулювання технологічних параметрів.

Якість склопластикової труби визначається комплексом взаємопов'язаних технологічних факторів, серед яких найбільший вплив мають кут укладання армувальних волокон; натяг скляного ровінгу; швидкість обертання оправки; швидкість переміщення намотувальної каретки; рівномірність просочення полімерною смолою; температурний режим полімеризації.

Особливу увагу приділено автоматичному регулюванню натягу волокна. Недостатній натяг призводить до утворення складок та локальних порожнин між шарами композиційного матеріалу. Надмірний натяг, навпаки, викликає пошкодження волокон, зменшення міцності армування та появу залишкових напружень.

Для забезпечення стабільності процесу запропоновано автоматизовану систему керування, яка включає датчики контролю натягу армувального матеріалу; енкодери для вимірювання швидкості обертання оправки; систему синхронізації переміщення каретки; програмований логічний контролер; операторську панель візуалізації параметрів технологічного процесу. Отримані дані використовуються для безперервного коригування режимів намотування у реальному часі, що дозволяє підтримувати постійний кут укладання волокон та рівномірну товщину стінки виробу.

Суттєве значення має також оптимізація траєкторії руху намотувальної головки. Використання математичних моделей процесу намотування дозволяє мінімізувати локальні перевантаження композиційного матеріалу та забезпечити рівномірний розподіл армувальних волокон по всій поверхні труби.

На рисунку 1 наведено загальну схему автоматизованого намотування, що включає подачу скляного ровінгу через систему натягування, вузол просочення смолою, намотувальну головку, обертову оправку та систему автоматичного керування технологічним процесом.

Запропонований підхід передбачає інтеграцію системи збору технологічних параметрів із програмним забезпеченням керування обладнанням. Це дозволяє автоматично аналізувати поточний стан процесу, виявляти відхилення від заданих режимів та оперативно вносити корективи без участі оператора.



Рис.1. Схема автоматизованого процесу намотування склопластикової труби

Очікується, що впровадження удосконаленої технології автоматизованого намотування забезпечить підвищення герметичності трубопроводів; збільшення міцності при внутрішньому тиску; зменшення кількості внутрішніх дефектів композиційного матеріалу; підвищення повторюваності характеристик виробів; скорочення виробничих витрат та витрат на контроль якості.

Використання автоматизованих систем керування також створює передумови для реалізації концепції цифрового виробництва, у якій технологічні параметри накопичуються у базі даних та використовуються для статистичного аналізу, прогнозування якості й оптимізації режимів виготовлення.

Висновки. Обґрунтовано доцільність удосконалення технології автоматизованого намотування склопластикових трубопроводів високого тиску як одного з основних напрямів підвищення їх експлуатаційних характеристик. Встановлено, що найбільший вплив на герметичність і міцність виробів мають стабільність натягу армувального матеріалу, точність дотримання кута намотування, швидкість переміщення каретки та рівномірність просочення композиційної структури полімерною матрицею.

Запропонований підхід до автоматизованого контролю технологічних параметрів дозволяє забезпечити стабільність процесу намотування, підвищити якість готової продукції та зменшити кількість технологічних дефектів. Отримані результати є апробацією дисертаційного дослідження та становлять основу для подальшої розробки інтелектуальної системи керування процесом автоматизованого намотування склопластикових трубопроводів високого тиску.

Список використаних джерел

1. Сорокін В. М., Коваленко В. І. Композиційні матеріали та технології їх виробництва : монографія. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 356 с.
2. ISO 14692-1:2017. Petroleum and natural gas industries – Glass-reinforced plastics (GRP) piping – Part 1: Vocabulary, symbols, applications and materials. Geneva : ISO, 2017. 52 p.

3. ISO 14692-2:2017. Petroleum and natural gas industries – Glass-reinforced plastics (GRP) piping – Part 2: Qualification and manufacture. Geneva : ISO, 2017. 84 p.
4. Peters S. T. Composite Filament Winding. Materials, Product, and Process Engineering. Akron : ASM International, 2011. 368 p.
5. Gay D. Composite Materials: Design and Applications. 3rd ed. Boca Raton : CRC Press, 2015. 640 p.
6. Campbell F. C. Manufacturing Processes for Advanced Composites. Amsterdam : Elsevier, 2004. 532 p.
7. Мельник О. В., Шевченко О. М. Автоматизація технологічних процесів виготовлення виробів із композиційних матеріалів // Вісник Національного технічного університету України «КПІ ім. Ігоря Сікорського». Серія: Машинобудування. 2022. № 3. С. 45–53.

АВТОМАТИЗАЦІЯ ТЕСТУВАННЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МІКРОКОНТРОЛЕРНИХ СИСТЕМ

Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова

Сучасний розвиток мікроконтролерних систем та embedded-технологій супроводжується постійним зростанням кількості пристроїв, що використовуються в системах автоматизації, промисловості, робототехніці, Інтернеті речей та побутовій електроніці. Збільшення складності програмного забезпечення мікроконтролерних систем підвищує вимоги до його якості, надійності та коректності функціонування. Одним із важливих етапів розробки є тестування програмного забезпечення, яке дозволяє виявляти помилки та забезпечувати відповідність роботи системи встановленим вимогам.

У більшості випадків перевірка мікроконтролерних проєктів виконується вручну шляхом аналізу програмного коду та електронної схеми, що потребує значних витрат часу та залежить від людського фактора. Використання сучасних середовищ моделювання відкриває можливості для автоматизації процесів контролю та оцінювання результатів розробки. У зв'язку з цим розробка системи автоматизованого тестування програмного забезпечення мікроконтролерних систем є актуальним завданням, спрямованим на підвищення ефективності перевірки проєктів та покращення якості програмного забезпечення.

Більшість існуючих рішень орієнтовані на моделювання або модульне тестування окремих компонентів, проте не забезпечують комплексної автоматичної перевірки апаратної схеми і програмної реалізації проєкту мікроконтролерної системи в цілому. Запропоновано виконувати тестування мікроконтролерних систем на основі проєктів, створених у середовищі Wokwi [1] за заданими правилами перевірки з формуванням звіту. Це дозволяє створити універсальну систему автоматизованої перевірки, яку можна адаптувати до різних задач оцінювання мікроконтролерних проєктів без зміни основної архітектури програми.

Основою розроблюваної системи є набір правил тестування, що зберігаються у форматі JSON. Для кожного завдання визначаються обов'язкові елементи схеми та програмного коду, а також параметри перевірки, що дозволяє додавати нові завдання без зміни програмної логіки.

Розроблено програмне забезпечення системи автоматизованого тестування. Для реалізації системи використано Python як основну мову програмування, бібліотеку PyQt6 [2] для створення графічного інтерфейсу користувача та мову розмітки HTML для формування підсумкових звітів. Програма складається з окремих модулів: графічного інтерфейсу, перевірки проєктів, формування звітів та набору правил тестування. Такий підхід забезпечує модульність, гнучкість та можливість подальшого розвитку системи.

Система реалізує послідовний процес перевірки проєкту. Користувач завантажує Wokwi-проєкт у вигляді архіву, після чого система виконує аналіз програмного коду та структури електронної схеми. На основі визначених правил тестування здійснюється перевірка компонентів, використаних функцій та відповідності проєкту поставленому завданню. Після завершення аналізу формується звіт (рис. 1), який містить результати перевірок та інформацію про виявлені помилки або невідповідності.

Для оцінювання роботи системи було підготовлено декілька типових навчальних завдань, які охоплюють роботу зі світлодіодами, кнопками, зумерами, аналоговими входами та багатокомпонентними схемами. Для кожного завдання визначено набір необхідних компонентів та перелік перевірок, що виконуються автоматично.

Звіт перевірки Wokwi-проєкту

Перевірка	Статус	Повідомлення
Файл .ino	OK	Файл програмного коду знайдено
Файл diagram.json	OK	Файл схеми знайдено
wokwi-arduino-uno	OK	Компонент знайдено
wokwi-led	OK	Компонент знайдено
wokwi-resistor	OK	Компонент знайдено
LED	OK	Світлодіод знайдено
Підключення LED	OK	LED green підключено до піна 12 через резистор rg
Відповідність коду і схеми	OK	У коді знайдено використання піна 12 та функції digitalWrite
Код: setup	OK	Елемент setup знайдено
Код: loop	OK	Елемент loop знайдено
Код: pinMode	OK	Елемент pinMode знайдено
Код: digitalWrite	OK	Елемент digitalWrite знайдено
Код: delay	OK	Елемент delay знайдено

Успішних перевірок: 13

Помилки: 0

Загальний бал: 100.0%

Висновок: Завдання виконано правильно

Рис. 1. Приклад звіту за результатами тестування проєкту мікроконтролерної системи

Експериментальні дослідження підтвердили працездатність розробленої системи автоматизованого тестування проєктів мікроконтролерних систем. У процесі дослідження система успішно виконала аналіз структури проєктів, електронних схем та програмного коду для всіх підготовлених тестових завдань. Проведено тестування на проєктах із навмисно внесеними помилками. У всіх досліджуваних випадках система успішно виявила невідповідності між схемою, програмним кодом та правилами тестування.

Список використаних джерел

3. Wokwi Docs [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://docs.wokwi.com> (дата звернення: 15.07.2026).

4. PyQt6 [Електронний ресурс] // PyPI. – Режим доступу: <https://pypi.org/project/PyQt6/> (дата звернення: 15.07.2026).

АВТОМАТИЗАЦІЯ БЕТОНОНАСОСА ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ РОБІТ

Харківський національний університет міського господарства ім. О.М. Бекетова

У сучасних умовах відновлення пошкоджених будівель, споруд та об'єктів інфраструктури особливого значення набуває застосування мобільних бетононасосів, здатних швидко подавати бетонну суміш у важкодоступні місця. Ефективність виконання таких робіт значною мірою залежить від рівня автоматизації технологічного обладнання, що забезпечує точне керування подачею бетонної суміші, стабільність технологічного процесу, підвищення продуктивності та безпеки експлуатації.

Метою дослідження є розробка конструкції бетононасоса для проведення відновлювальних робіт та підвищення ефективності його функціонування шляхом впровадження сучасних засобів автоматизації процесів керування, контролю та моніторингу роботи обладнання.

У роботі виконано аналіз існуючих конструкцій бетононасосів, їх технічних характеристик та особливостей застосування під час відновлення будівель і споруд. Встановлено, що найбільш ефективними є двопоршневі гідравлічні бетононасоси, які забезпечують безперервну подачу бетонної суміші, високу продуктивність та надійність роботи.

Запропоновано конструкцію бетононасоса, що включає приймальний бункер, гідравлічні циліндри, насосні поршні, S-подібний розподільний клапан, систему трубопроводів та гідравлічний привід. Запропонована конструкція забезпечує стабільну подачу бетонної суміші при виконанні ремонтних і відновлювальних робіт у складних умовах експлуатації.

Особливу увагу приділено автоматизації роботи бетононасоса (рис. 1). Запропоновано використання програмованого логічного контролера (PLC), який координує роботу гідравлічного приводу, керує перемиканням розподільного клапана, регулює продуктивність подачі бетонної суміші та контролює режими роботи обладнання (рис. 2). Для моніторингу технологічних параметрів передбачено застосування датчиків тиску, рівня бетонної суміші, температури робочої рідини, положення поршнів і частоти обертання приводу.

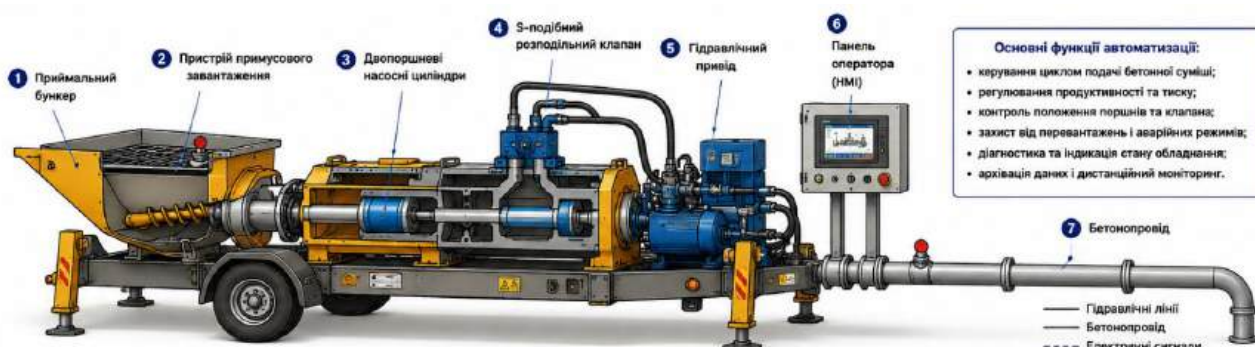


Рис. 1. Автоматизований бетононасос для проведення відновлювальних робіт



Рис. 2. Структурна схема системи автоматизації

Автоматизована система керування забезпечує підтримання оптимального режиму подачі бетонної суміші, своєчасне виявлення перевантажень, автоматичний захист обладнання від аварійних ситуацій та передачу інформації оператору через панель НМІ. Використання цифрових засобів контролю дозволяє зменшити простой обладнання, підвищити його надійність і скоротити витрати на технічне обслуговування.

У роботі виконано розрахунки продуктивності бетононасоса, параметрів гідравлічної системи, приводу, насосних циліндрів та інших основних вузлів конструкції. Отримані результати підтверджують працездатність запропонованої конструкції та можливість її використання під час проведення відновлювальних і ремонтних робіт.

Результати дослідження підтверджують, що впровадження автоматизованої системи керування бетононасосом забезпечує підвищення ефективності виконання відновлювальних робіт, покращення якості подачі бетонної суміші, скорочення енерговитрат і підвищення безпеки експлуатації обладнання. Застосування PLC-контролерів, датчиків технологічних параметрів, цифрового моніторингу та систем автоматичного захисту відповідає сучасним вимогам автоматизації будівельної техніки та концепції Industry 4.0.

Список використаних джерел

1. Kulwiec R. A. Materials Handling Handbook / R. A. Kulwiec. – New York : Wiley, 1985. – 1152 p.
2. Volkov D. Construction Machinery and Equipment / D. Volkov, M. Sukach. – Kyiv : KNUBA, 2019. – 412 p.
3. Peurifoy R. L. Construction Equipment and Methods / R. L. Peurifoy. – 8th ed. – New York : McGraw-Hill Education, 2018. – 768 p.

Семененко Ю.О., к.т.н., доцент
 semenenko_jo@kart.edu.ua.
 Сорока А.С., студентка
 a.soroka@khai.edu
 Семененко О.Д., асистент
 o.semenenko@khai.edu

ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ЖИТЛОВОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ НА БАЗІ ЕКОСИСТЕМИ «РОЗУМНИЙ ДІМ»

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Україна

Сучасний розвиток житлової інфраструктури спрямований на підвищення рівня комфорту мешканців та одночасне зменшення енергоспоживання. Одним із найбільш перспективних напрямків є впровадження інтелектуальних систем керування житлом, що реалізуються в концепції «розумного дому». Такі системи дозволяють автоматизувати побутові процеси, забезпечити ефективне використання ресурсів і створити комфортне середовище проживання. Метою роботи є дослідження функціональної системи «Розумний дім» задля підвищення її енергоефективності. Основну увагу приділено автоматизації процесів освітлення, підтримання мікроклімату та контролю роботи побутових приладів. Практичне значення дослідження полягає у зниженні фінансових витрат користувачів без втрати рівня повсякденного комфорту. Розумний дім являє собою інтегровану систему взаємопов'язаних пристроїв, датчиків і програмних засобів, які забезпечують централізоване або дистанційне керування інженерними системами будинку. Основною ідеєю такої концепції є автоматизація процесів та адаптація роботи обладнання до реальних потреб користувача.

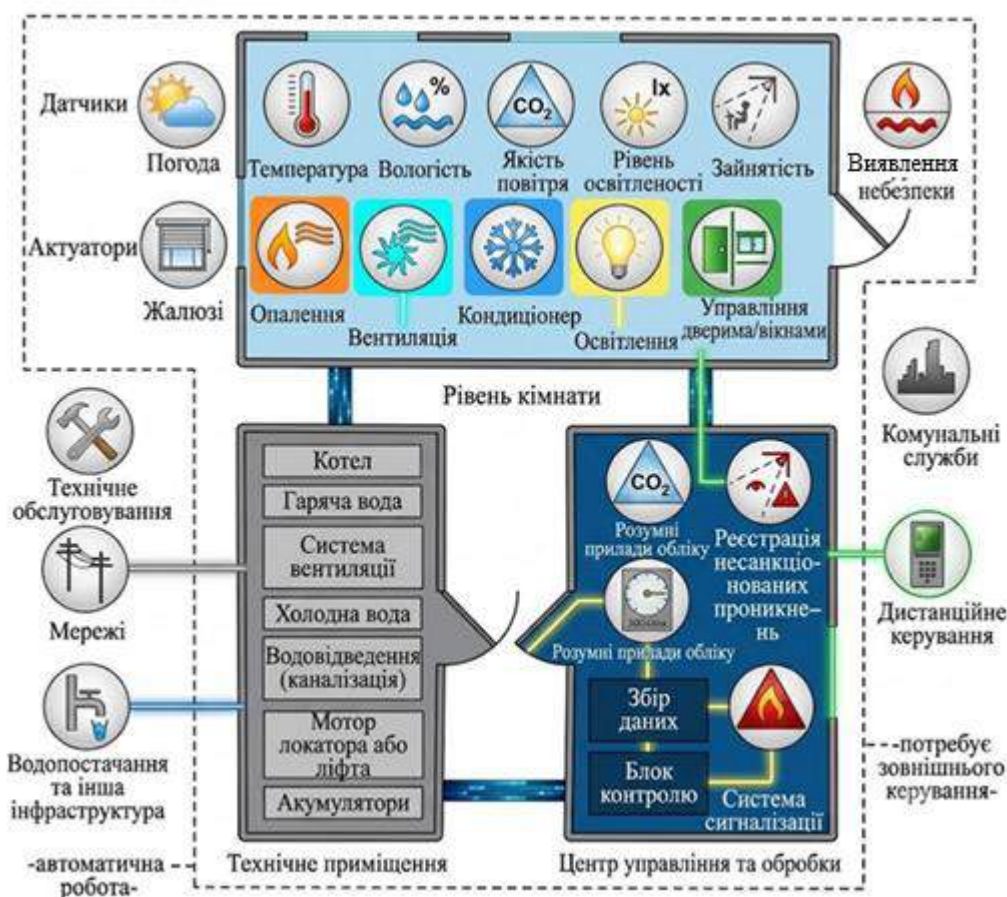


Рис. 1. Схема екосистеми розумного будинку

Одним із найважливіших компонентів є система розумного освітлення. Вона забезпечує автоматичне регулювання рівня освітленості залежно від присутності людини, часу доби та встановлених сценаріїв. Наприклад, у коридорі світло може вмикатися лише після спрацювання датчика руху та автоматично вимикатися через заданий проміжок часу. Такий підхід дозволяє скоротити споживання електроенергії орієнтовно на 30–40 %.

Не менш важливу роль відіграє автоматизований клімат-контроль. На відміну від традиційних систем опалення чи кондиціонування, інтелектуальні алгоритми враховують присутність мешканців та режим їхньої активності. Наприклад, під час відсутності людини температура автоматично знижується до енергозберігаючого рівня, а перед її поверненням система відновлює комфортні параметри мікроклімату.

Додатковий ефект економії досягається шляхом усунення прихованого енергоспоживання. Значна частина сучасної побутової техніки споживає електроенергію навіть у режимі очікування. Використання інтелектуальних розеток дозволяє автоматично знеструмувати пристрої відповідно до розкладу або за сигналом датчиків присутності.

На рисунку 1 наведено узагальнену структуру екосистеми розумного будинку. Центральним елементом системи виступає адаптивний блок керування, який об'єднує інформаційні потоки від датчиків і забезпечує взаємодію між усіма підсистемами будинку. До складу екосистеми входять системи освітлення, клімат-контролю, безпеки, керування побутовими пристроями та віддаленого моніторингу. Передача даних здійснюється через мережеву інфраструктуру із застосуванням технологій Інтернету речей (IoT), що забезпечує централізоване керування та можливість оперативної зміни режимів роботи.

Функціонування сучасного розумного будинку базується на використанні великої кількості датчиків: руху, температури, вологості, якості повітря та інших параметрів середовища. Інформація, що надходить від них, аналізується адаптивними алгоритмами в реальному часі, після чого система приймає рішення щодо оптимізації роботи обладнання.

Сучасні рішення активно інтегрують методи штучного інтелекту та машинного навчання. Алгоритми аналізують поведінку мешканців і формують персоналізовані сценарії роботи обладнання. Наприклад, система може автоматично підтримувати індивідуальний температурний режим у різних приміщеннях, регулювати інтенсивність освітлення або активувати вентиляцію залежно від концентрації CO₂.

Окремим напрямком розвитку є використання роботизованої автоматизації процесів (RPA), що дозволяє автоматизувати виконання повторюваних операцій: керування освітленням, підтримання мікроклімату, контроль безпеки та моніторинг стану обладнання [1]. Завдяки цьому система стає більш автономною та стабільною.

Основними перевагами адаптивних систем є:

- підвищення рівня комфорту користувачів;
- економія енергетичних і фінансових ресурсів;
- можливість дистанційного керування;
- покращення безпеки житлового середовища;
- гнучкість та масштабованість системи;
- зменшення негативного впливу на навколишнє середовище.

Моделювання системи «Розумний дім» підтверджує високу ефективність застосування інтелектуальних технологій для оптимізації енергоспоживання. Інтеграція адаптивного керування, Інтернету речей та методів штучного інтелекту створює передумови для формування сучасного енергоефективного житла, що забезпечує економію ресурсів, комфорт та екологічну стійкість.

Список використаних джерел

1. Енергоефективні алгоритми обробки сенсорної інформації для наземних роботизованих систем різного призначення /Семененко Ю. О., Сисоєв Ю. О., Семененко О. Д., Степаненко Д. Р., Сорока А. С., Широкий Ю. В //Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2026. – №2(165). – С 53-68.
<https://doi.org/10.18664/ikszt.v31i2.36222>

ВИЯВЛЕННЯ ДРОНІВ НА ЗОБРАЖЕННЯХ ТА ВІДЕО З ЗАСТОСУВАННЯМ КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Україна

У сучасному світі безпілотні літальні апарати (БПЛА) набули широкого поширення завдяки своїй доступності, мобільності та ефективності у вирішенні різноманітних задач. Вони активно застосовуються у цивільній сфері для аерофотозйомки, моніторингу територій, інспекції об'єктів інфраструктури, а також у військових цілях. Разом із цим збільшення кількості БПЛА створює нові виклики, пов'язані із забезпеченням безпеки, контролем повітряного простору та своєчасним виявленням потенційних загроз.

Одним із найбільш перспективних напрямів розв'язання задачі виявлення безпілотних літальних апаратів є використання методів комп'ютерного зору та машинного навчання. Сучасні алгоритми глибокого навчання, зокрема згорткові нейронні мережі, дозволяють автоматизувати процес аналізу зображень і відеопотоків та забезпечують достатній рівень точності при роботі в реальному часі [1].

Задачу виявлення безпілотних літальних апаратів можна розглядати як задачу детекції об'єктів на зображенні. Нехай вхідними даними є зображення або окремий кадр відеопотоку, який позначимо як I .

Необхідно визначити множину об'єктів, що присутні на зображенні:

Кожен об'єкт описується набором параметрів, що включає координати обмежувального прямокутника та ймовірність належності до певного класу. Для задачі детекції БПЛА розглядається один цільовий клас – «дрон».

Для кожного об'єкта визначаються такі параметри:

- координати прямокутника (x, y, w, h) , де x та y – координати центру або верхнього лівого кута, w та h – ширина та висота;
- значення ймовірності належності до класу p .

Результат роботи моделі можна представити у вигляді набору:

$$D = \{(x_i, y_i, w_i, h_i, p_i), i = 1 \dots n\}. \quad (1)$$

Таким чином, задачу детекції можна формалізувати як відображення:

$$f: I \rightarrow D, \quad (2)$$

де I – вхідне зображення, D – множина знайдених об'єктів.

Для навчання моделі детекції безпілотних літальних апаратів у даній роботі використано відкритий набір даних Seraphim Drone Detection Dataset, розміщений на платформі Hugging Face [2].

Даний датасет містить зображення безпілотних літальних апаратів, отримані в різних умовах зйомки, включаючи різні рівні освітлення, складні фони та зміну масштабу об'єктів. Це дозволяє сформувати навчальну вибірку, яка відображає реальні умови застосування системи. Кожне зображення супроводжується анотаціями у вигляді обмежувальних прямокутників (bounding boxes), що визначають положення об'єктів на зображенні. Загальна кількість зображень у датасеті становить близько 15000, що забезпечує достатній обсяг даних для навчання моделі.

Аналіз датасету показав, що більшість об'єктів на зображеннях мають невеликі розміри відносно розміру кадру. Це є типовою особливістю задачі детекції безпілотних літальних апаратів, оскільки вони часто знаходяться на значній відстані від камери. Розподіл об'єктів за

розмірами є нерівномірним, що може впливати на якість навчання моделі. Наявність значної кількості малорозмірних об'єктів потребує використання моделей та параметрів навчання, орієнтованих на детекцію дрібних деталей.

Також у датасеті присутні різноманітні умови зйомки: різні типи фону; зміни освітлення; різні кути огляду; часткове перекриття об'єктів. Подібна різноманітність дозволяє підвищити здатність моделі до узагальнення. Разом з тим можливі окремі неточності у розмітці, що характерно для відкритих наборів даних. Це може впливати на точність навчання, однак не є критичним при достатньому обсязі даних.

Для розв'язання задачі детекції безпілотних літальних апаратів у даній роботі було обрано модель сімейства YOLO (You Only Look Once), зокрема YOLOv8. Вибір даної моделі обумовлений тим, що вона забезпечує високу швидкодію та достатню точність детекції об'єктів у режимі реального часу. Це є важливим фактором для задач відеоаналізу та систем моніторингу [3]. Крім того, YOLOv8 підтримує роботу з малорозмірними об'єктами та має зручну інтеграцію з бібліотекою Ultralytics, що значно спрощує процес навчання та тестування моделі [4].

Попередня обробка зображень необхідна для приведенні вхідних даних до єдиного формату та підвищенні стабільності процесу навчання. Основним етапом є масштабування зображень до фіксованого розміру. Це забезпечує однакову розмірність вхідних даних, що є необхідною умовою для роботи нейронної мережі. Також виконується нормалізація значень пікселів, яка дозволяє привести дані до стандартного діапазону та покращити збіжність алгоритму навчання.

Для підвищення ефективності навчання моделі в роботі використано методи аугментації даних, що дозволяє штучно збільшити різноманітність навчальної вибірки та підвищити стійкість моделі до змін умов зйомки.

Після виконання детекції нейронною мережею необхідно провести постобробку результатів для отримання остаточного набору об'єктів. Основним методом постобробки є придушення немаксимумів (Non-Maximum Suppression, NMS). Даний алгоритм використовується для усунення надлишкових обмежувальних прямокутників, які можуть відповідати одному й тому самому об'єкту. Крім того, виконується фільтрація результатів за порогом впевненості, що дозволяє виключити малоімовірні детекції.

У даній роботі використано попередньо навчений варіант моделі YOLOv8n (nano), який характеризується невеликим розміром та високою швидкістю.

Такий вибір обумовлений обмеженнями апаратних ресурсів, зокрема обсягом відеопам'яті графічного процесора. Модель YOLOv8n дозволяє виконувати навчання та інференс навіть на відеокартах з невеликим обсягом пам'яті.

Попередньо навчена модель використовується як основа (pretrained), після чого виконується донавчання на спеціалізованому датасеті дронів.

Для навчання моделі було використано такі основні параметри:

- кількість епох: 80;
- розмір зображення: 768;
- розмір батчу: 1–4 (залежно від доступної пам'яті);
- оптимізатор: AdamW;
- початкова швидкість навчання: 0.0012;
- коефіцієнт регуляризації: 0.0005.

У результаті навчання сформовано графіки зміни функцій втрат, метрик Precision, Recall та mAP. На рисунку 1 зображено метрики процесу навчання.

Отримані результати підтверджують працездатність реалізованого підходу та коректність налаштування параметрів навчання. Модель демонструє стабільну поведінку у процесі навчання та здатність до подальшого використання для аналізу зображень і відеопотоку. Використання попередньо навченої моделі дозволило суттєво прискорити збіжність, а застосування аугментації підвищило здатність моделі до узагальнення.

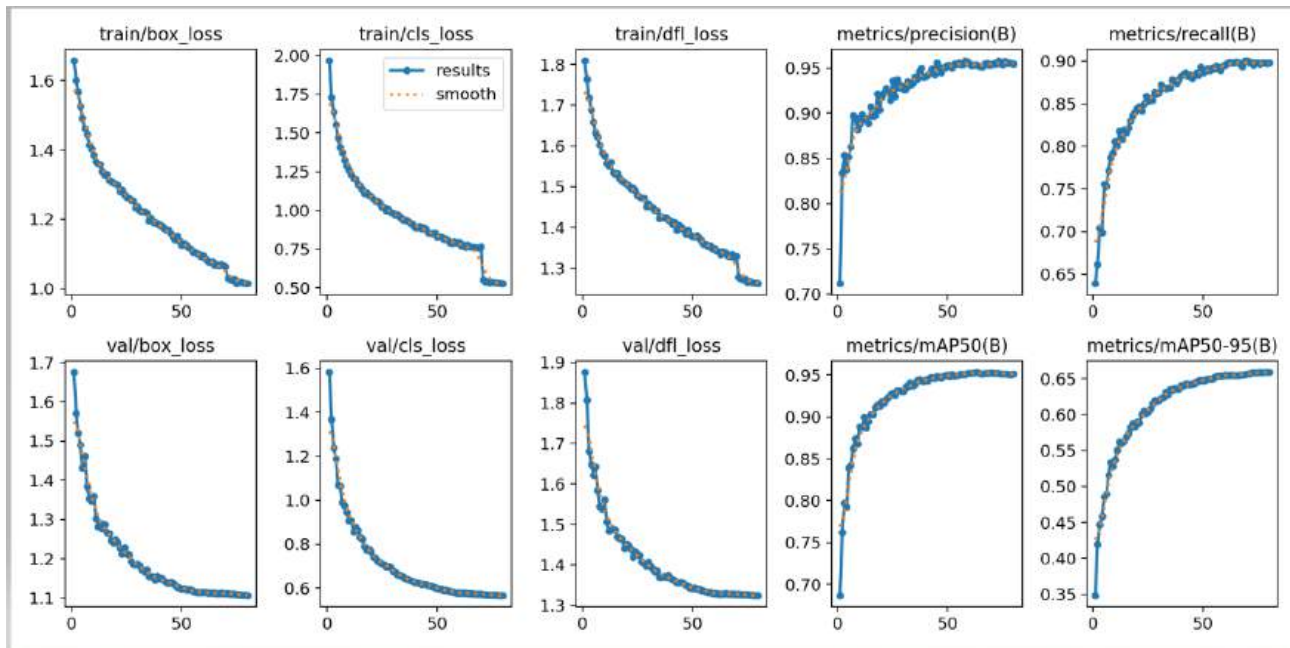


Рис. 1. Метрики моделі та функції втрат у процесі навчання

Для оцінки якості моделі детекції об'єктів використано стандартні метрики. Основні числові значення метрик, отримані після навчання моделі, наведено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Основні метрики якості навченої моделі YOLOv8n

Метрика	Значення	Пояснення
Precision	0,9549	Частка правильних спрацювань серед усіх передбачених моделлю об'єктів
Recall	0,8978	Частка знайдених дронів серед усіх об'єктів у валідаційній вибірці
mAP@50	0,9515	Середня точність при IoU = 0,5
mAP@50–95	0,6590	Узагальнена середня точність при різних порогах IoU від 0,5 до 0,95
Val box loss	1,1068	Помилка локалізації обмежувальних прямокутників
Val cls loss	0,5674	Помилка класифікації об'єктів
Val dfl loss	1,3252	Помилка уточнення координат bounding box
Епоха	80	Остання епоха навчання, на якій отримано найкраще значення mAP@50–95

Згідно з отриманими результатами, модель демонструє високе значення точності Precision, що свідчить про невелику кількість хибнопозитивних спрацювань. Значення Recall також є достатньо високим, тобто модель здатна знаходити більшість наявних у кадрі БПЛА. Метрика mAP@50 дорівнює 0,9515, що підтверджує високу якість детекції при стандартному порозі IoU. Значення mAP@50–95 є нижчим, оскільки ця метрика оцінює модель за більш суворими порогоми перекриття, однак отриманий результат 0,6590 є прийнятним для задачі виявлення малорозмірних об'єктів, таких як дрони.

Під час тестування застосунок було перевірено на зображеннях і відеофайлах, які не входили до навчального датасету. Це дозволило оцінити не лише якість моделі на валідаційній вибірці, а й її поведінку в умовах, наближених до практичного використання. Результати

тестування показали, що модель здатна виявляти БПЛА на різному фоні та при зміні положення об'єкта у кадрі (рис. 2). Водночас встановлено, що якість детекції знижується у випадках дуже малого розміру об'єкта, низької контрастності або складного фону, що є типовою проблемою для задачі виявлення дронів.

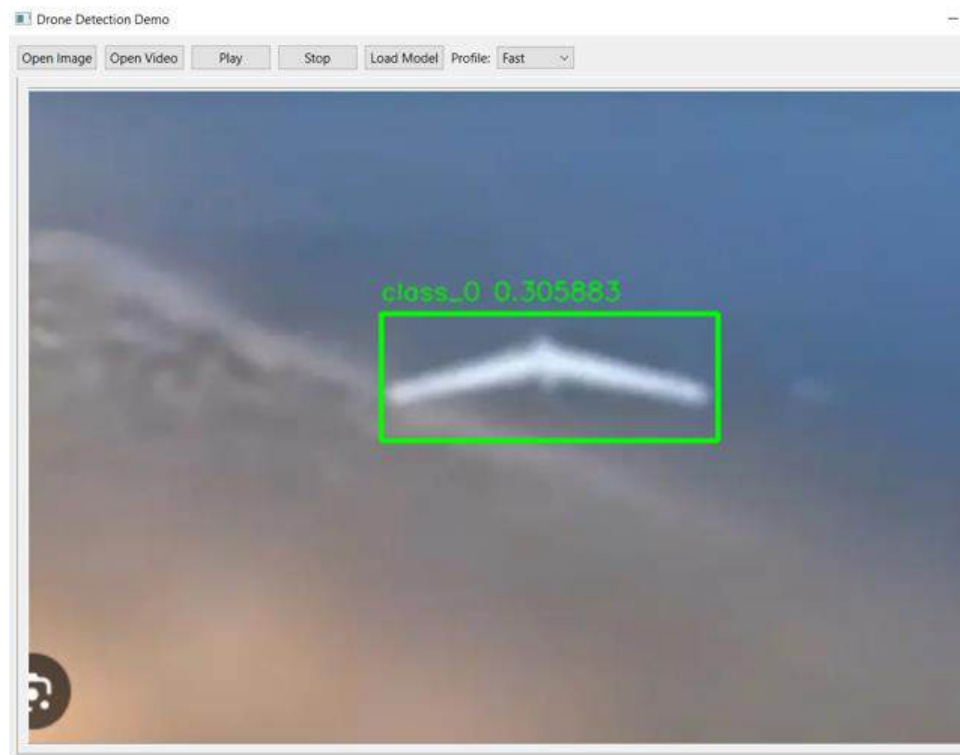


Рис. 2. Приклад роботи моделі на зображенні зі складним фоном

Розроблений програмний комплекс має практичну цінність як демонстраційна система комп'ютерного зору. Він дозволяє користувачу без запуску Python-скриптів завантажити навчену модель, обрати зображення або відеофайл і отримати візуальний результат детекції. Такий підхід робить систему зручною для демонстрації результатів навчання, перевірки моделі на нових даних та подальшого розвитку.

Подальший розвиток роботи може бути пов'язаний із розширенням навчального датасету, додаванням більшої кількості прикладів малорозмірних дронів, використанням продуктивніших backend інференсу, зокрема ONNX Runtime або TensorRT, підключенням камери в режимі реального часу, оптимізацією швидкодії відеообробки та покращенням якості виявлення об'єктів на складному фоні.

Вихідний код програмного застосунку збережено у відкритому репозиторії GitHub, що забезпечує можливість перегляду структури проєкту, аналізу реалізації основних модулів та подальшого супроводу програмного забезпечення: <https://github.com/Tik-tak753/dd>.

Список використаних джерел.

1. Seidaliyeva, Ulzhalgas, Lyazzat Ilipbayeva, Kyrmyzy Taissariyeva, Nurzhigit Smailov, and Eric T. Matson. 2024. "Advances and Challenges in Drone Detection and Classification Techniques: A State-of-the-Art Review" *Sensors* 24, no. 1: 125. <https://doi.org/10.3390/s24010125>
2. Grzybowski Ł. Seraphim Drone Detection Dataset <https://huggingface.co/datasets/lgrzybowski/seraphim-drone-detection-dataset>.
3. J. E. Gallagher and E. J. Oughton, "Surveying You Only Look Once (YOLO) Multispectral Object Detection Advancements, Applications, and Challenges," in *IEEE Access*, vol. 13, pp. 7366-7395, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3526458.
4. Ultralytics YOLO Documentation. <https://docs.ultralytics.com/>

ІНТЕГРАЦІЯ РОБОТОТЕХНІКИ ТА БІОТЕХНОЛОГІЙ У СУЧАСНОМУ ВИРОБНИЦТВІ

¹ Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

² Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Україна

Сучасний розвиток промисловості характеризується широким впровадженням цифрових технологій, автоматизації та інтелектуальних виробничих систем. Одним із найбільш перспективних напрямів є інтеграція робототехніки з біотехнологіями, що дозволяє підвищити ефективність виробничих процесів, забезпечити високу точність виконання технологічних операцій та мінімізувати вплив людського фактора.

Біотехнологічне виробництво передбачає виконання складних операцій, пов'язаних із культивуванням мікроорганізмів, клітинних культур, виробництвом ферментів, вакцин, лікарських препаратів та біоматеріалів. Значна частина цих процесів потребує суворого дотримання стерильності, стабільності параметрів середовища та безперервного контролю технологічних режимів. Саме тому використання роботизованих систем стає важливою складовою сучасних біотехнологічних підприємств.

Робототехнічні комплекси забезпечують автоматичне дозування реагентів, транспортування біологічних матеріалів, обслуговування біореакторів, проведення лабораторних досліджень, контроль якості продукції та пакування готових виробів. Використання промислових роботів значно зменшує ризик контамінації, підвищує продуктивність праці та забезпечує стабільність виробничих процесів.

Особливого значення набуває поєднання робототехніки зі штучним інтелектом, машинним навчанням та технологіями Інтернету речей. Інтелектуальні системи здатні аналізувати великі масиви технологічних даних, прогнозувати відхилення параметрів виробництва, оптимізувати режими культивування та здійснювати автоматичне керування обладнанням у режимі реального часу. Це сприяє підвищенню якості біотехнологічної продукції та скороченню виробничих витрат.

Важливою сферою застосування робототехніки є лабораторна автоматизація. Роботизовані платформи виконують високоточні операції з підготовки зразків, проведення аналізів, секвенування ДНК, культивування клітин та тестування нових біологічно активних сполук. Це значно прискорює наукові дослідження, підвищує відтворюваність експериментів та зменшує кількість можливих помилок.

Попри численні переваги, інтеграція робототехнічних систем у біотехнологічне виробництво супроводжується певними викликами. До них належать значні початкові інвестиції, необхідність підготовки висококваліфікованих фахівців, забезпечення кібербезпеки автоматизованих систем та інтеграція нового обладнання з існуючою виробничою інфраструктурою.

Отже, інтеграція робототехніки та біотехнологій є одним із пріоритетних напрямів розвитку сучасного високотехнологічного виробництва та важливим чинником підвищення його конкурентоспроможності. Впровадження роботизованих систем у біотехнологічні процеси забезпечує автоматизацію рутинних і високоточних операцій, підвищує продуктивність праці, стабільність технологічних режимів, якість готової продукції та рівень біологічної безпеки. Крім того, використання роботів сприяє зменшенню впливу людського фактора, скороченню виробничих витрат, раціональному використанню сировини та енергетичних ресурсів, а також мінімізації ризиків контамінації під час виробництва біологічно активних речовин, фармацевтичної продукції та медичних препаратів.

Перспективним напрямом розвитку є інтеграція робототехнічних систем із сучасними цифровими технологіями, зокрема штучним інтелектом, алгоритмами машинного навчання, цифровими моделями виробничих процесів, Інтернетом речей та хмарними платформами. Поєднання цих технологій дає змогу здійснювати постійний контроль технологічних параметрів, оперативно обробляти значні обсяги інформації, виявляти можливі відхилення в роботі обладнання та автоматично коригувати виробничі режими. Завдяки цьому підвищується ефективність управління виробництвом, забезпечується стабільна якість продукції, скорочуються експлуатаційні витрати та створюються умови для функціонування сучасних автоматизованих виробничих систем, здатних швидко адаптуватися до змін технологічних і ринкових вимог.

Разом із тим ефективне впровадження робототехнічних рішень у біотехнологічній галузі потребує комплексного підходу, який охоплює модернізацію виробничої інфраструктури, розроблення сучасного програмного забезпечення, забезпечення кібербезпеки автоматизованих систем та підготовку висококваліфікованих фахівців, здатних працювати з новітніми цифровими технологіями. Не менш важливими є розвиток міждисциплінарних досліджень, розширення співпраці між науковими установами, закладами вищої освіти та промисловими підприємствами, а також державна підтримка інноваційних проєктів.

Отже, подальше впровадження робототехнічних рішень у біотехнологічне виробництво сприятиме розвитку сучасних автоматизованих підприємств, які характеризуються високою продуктивністю, економним використанням ресурсів і дотриманням екологічних вимог. Застосування інтелектуальних роботизованих систем дозволить удосконалити технологічні процеси, підвищити якість і безпечність продукції, а також забезпечити гнучкість виробництва відповідно до сучасних потреб промисловості. Розширення використання таких технологій створює значні можливості для розвитку біофармацевтичної, харчової, аграрної та медичної галузей, стимулює впровадження інновацій і сприяє підвищенню конкурентоспроможності національної економіки.

Федорович О.Є., д.т.н., професор
oe.fedorovich@gmail.com

Єлізєва А.В., к.т.н., доцент
kafius@ukr.net

Єременко Н.В., к.т.н., доцент
kafius@ukr.net

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОТИДІЙ ВІД АТАКУЮЧИХ ДРОНІВ ПРОТИВНИКА

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Україна

Постановка проблеми. Сучасна війна це війна технологічних та тактичних інновацій. Використання дронів, в масованих атаках противником по критичній інфраструктурі, потребує планування та проведення превентивних заходів щодо охорони об'єктів [1]. Але, обмеженість ресурсів не дозволяє захистити всю множину критичних об'єктів. Тому, виникає **актуальне** завдання щодо пошуку раціональних рішень для створення оборони критичних об'єктів інфраструктури країни [2]. В доповіді представлені результати дослідження протидій щодо дронів атак противника, у вигляді множини розроблених моделей.

Метою доповіді є створення комплексу логічно пов'язаних моделей для обґрунтування плану проведення превентивних заходів щодо оборони критичних об'єктів від масованих дронів атак.

Постановка задач: провести системний аналіз необхідних дій щодо захисту об'єктів критичної інфраструктури; обґрунтувати виконання захисних дій в умовах обмеженості ресурсів; проаналізувати ризики дій по захисту від масованих дронів атак противника; розробити імітаційну модель для симуляції атак противника та активних протидій оборони. В дослідженні виділено два основних напрямки захисту критичних об'єктів: пасивні та активні методи. Пасивні методи потребують створення оборони у вигляді інженерних конструкцій, бетонних споруд, підземних укриттів, тощо. Проведено аналіз пасивного захисту, з використанням показників часу, витрат та ризиків для створення необхідних умов щодо оборони, в умовах обмежених ресурсів. Активні методи розглянуто у вигляді створення повітряного щиту оборони, з використанням дронів-перехоплювачів. Обмеженість ресурсів щодо множини дронів-перехоплювачів, призводить до їх раціонального розподілу по захисним об'єктам. Проведено оптимізаційний розподіл, з урахуванням важливості критичних об'єктів, які можуть бути використані противником в якості цілей. Розроблена імітаційна модель для симуляції, у часі, повітряних атак противника та активних протидій, з використанням дронів-перехоплювачів. Формуються можливі польоти дронів противника та ініціюються дії дронів-перехоплювачів, з використанням агентної платформи Any Logic. Для аналізу та впливу ризиків польоту дронів-перехоплювачів, створено алгоритм, який дозволяє сформулювати їх, відносно безпечні маршрути, з використанням можливих ризиків дій противника.

Висновки. Запропонований підхід дозволяє обґрунтувати превентивні заходи у вигляді активних та пасивних дій щодо створення оборони критичних об'єктів від масованих атак противника, що сприяє підвищенню обороноздатності країни.

Список використаних джерел.

1. Modeling waves of a strike drones swarm for a massive attack on enemy targets / O. Fedorovich, D. Krytskyi, O. Leshchenko, O. Yashina, Yu. Malieieva / Radioelectronic and Computer Systems, 2024, no. 2, P. 203-212
2. Lv, Huan & Liu, Fang & Yuan, NaiChang. (2021). Drone Presence Detection by the Drone's RF Communication. Journal of Physics: Conference Series. 1738. 012044. 10.1088/1742-6596/1738/1/012044.

Федорович О.Є., д.т.н., професор
oe.fedorovich@gmail.com
Попов І.Є., аспірант
kafius@ukr.net
Діденко С.І., аспірант
kafius@ukr.net

МОДЕЛЮВАННЯ ВИКОРИСТАННЯ ДРОНІВ-ІМІТАТОРІВ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ ФАЛЬШ-АТАК

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Україна

Постановка проблеми. Сучасна війна має новий, інноваційний характер. Поява інновацій, у вигляді дронів, дозволила підвищити ефективність проведення військових місій та сприяє зміні оперативного-тактичних дій на полі бою. З'явилась можливість проведення імітації атак по цілям противника, що сприяє виснаженню систем ППО та скороченню запасів боєприпасів [1]. Тому, **актуальна** тема доповіді, в якій розглядаються результати дослідження щодо моделювання проведення фальш-атак, за допомогою дронів-імітаторів. Виникає необхідність в науковому обґрунтуванні планування фальш-атаки, з використанням потрібної множини дронів-імітаторів та урахуванням їх можливостей щодо виснаження бойового потенціалу противника [2].

Метою доповіді є створення комплексу логічно пов'язаних моделей, за допомогою яких формується потрібна множина дронів-імітаторів та моделюється їх рух до цілей противника.

Постановка задач: провести аналіз можливостей дронів-імітаторів щодо проведення відволікаючих дій перед основною атакою, за допомогою ударних дронів; сформувати потрібний склад дронів-імітаторів для проведення фальш-атаки; оптимізувати множину цілей противника, з використанням обмежених бойових можливостей дронів-імітаторів; провести імітаційне моделювання руху дронів-імітаторів до цілей противника, з використанням активних протидій противника (ППО, зенітні дрони, дрони-перехоплювачі, тощо), які охороняють цілі противника. Проведено обґрунтування множини дронів-імітаторів, з урахуванням їх можливостей щодо виснаження противника. Сформована потрібна множина дронів, яка залежить від кількості та пріоритетності цілей противника, на які вони будуть спрямовані. Проведено оптимізаційне моделювання бойового потенціалу дронів-імітаторів та оборонного потенціалу противника, який планується виснажити. Використані обмеження щодо можливостей дронів-імітаторів, з урахуванням їх тактико-технічних характеристик (дальність, час польоту, можливість мати на борту вибухівку, тощо). Проведено раціональний розподіл рою дронів-імітаторів на групи, які спрямовані до цілей противника. Враховано ризики збиття дронів-імітаторів, які пов'язані з протидіями противника. Створена імітаційна модель руху дронів-імітаторів до цілей противника, з урахуванням ризиків впливу військових загроз.

Висновки. Запропонований підхід дозволяє обґрунтувати планування фальш-атаки за допомогою дронів-імітаторів, що сприяє ефективності проведення основної атаки роєм ударних дронів.

Список використаних джерел.

1. Modeling waves of a strike drones swarm for a massive attack on enemy targets / O. Fedorovich, D. Krytskyi, O. Leshchenko, O. Yashina, Yu. Malieieva / Radioelectronic and Computer Systems, 2024, no. 2, P. 203-212
2. Lv, Huan & Liu, Fang & Yuan, NaiChang. (2021). Drone Presence Detection by the Drone's RF Communication. Journal of Physics: Conference Series. 1738. 012044. 10.1088/1742-6596/1738/1/012044.

Федорович О.Є., д.т.н., професор
oe.fedorovich@gmail.com

Попов А.В., к.т.н., доцент
apv_juki@ukr.net

Лещенко Ю.О., к.т.н., доцент
juliet.leshchenko@gmail.com

МОДЕЛЮВАННЯ ПОСЛІДОВНОСТІ ДІЙ ЩОДО ПРОВЕДЕННЯ ПОВІТРЯНИХ ВІЙСЬКОВИХ МІСІЙ З ВИКОРИСТАННЯМ ДРОНІВ

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Україна

Постановка проблеми. Сучасні технології змінили характер війни завдяки використанню інноваційної зброї [1]. В першу чергу, це пов'язано з використанням повітряних дронів, які забезпечують створення «сірої зони» (Kill Zone), для відсічі атакуючих дій противника. Але для планування та проведення військової місії потрібно сформулювати послідовність дій, які розглядаються та моделюються у роботі. Тому, **актуальна** тема доповіді, в якій представлені результати дослідження щодо моделювання послідовності дій для проведення масованої атаки по цілям противника, з використанням повітряних дронів [2].

Метою дослідження є створення моделей для оцінки кожної дії щодо планування атакуючої місії, в умовах обмеженості ресурсів.

Постановка задач: провести системний аналіз послідовності дій щодо проведення військової місії, з використанням дронів; обґрунтувати актуальні цілі противника; сформулювати бойовий потенціал рою дронів для ураження цілей; сформулювати рух рою (групи) дронів до цілей противника; проаналізувати результати атаки для формування нової хвилі ударних дронів.

Створена модель для формування множини актуальних цілей противника, з урахуванням обмеження щодо кількості ударних дронів. Проведено обґрунтування бойового потенціалу рою ударних дронів, з урахуванням оборонного потенціалу противника. Проведена багатокритеріальна оптимізація щодо розподілу дронів та формуванні їх груп, які спрямовані на цілі противника. Обґрунтована кількість дронів-імітаторів для проведення фальш-атаки. Розроблена імітаційна модель щодо створення маршрутів польоту дронів, в умовах протидії противника.

Використані математичні методи та моделі: системний аналіз для обґрунтування послідовності військових дій; методи оптимізації для раціонального розподілу множини ударних дронів по цілям противника; багатокритеріальна оптимізація для пошуку компромісу щодо значень показників часу, вартості ресурсів та ризиків плану виконання атакуючої місії; імітаційне моделювання щодо пошуку раціональних маршрутів польоту ударних дронів до цілей противника.

Висновки. Запропонований комплекс логічно пов'язаних моделей, дозволяє обґрунтувати план проведення атакуючої місії, з використанням ударних дронів, в умовах обмеженості ресурсів. Це дозволяє зробити висновок щодо створення хвильової масованої атаки по цілям противника, для встановлення військового паритету сил у сучасній війні.

Список використаних джерел.

1. Modeling waves of a strike drones swarm for a massive attack on enemy targets / O. Fedorovich, D. Krytskyi, O. Leshchenko, O. Yashina, Yu. Malieieva / Radioelectronic and Computer Systems, 2024, no. 2, P. 203-212
2. Lv, Huan & Liu, Fang & Yuan, NaiChang. (2021). Drone Presence Detection by the Drone's RF Communication. Journal of Physics: Conference Series. 1738. 012044. 10.1088/1742-6596/1738/1/012044.

Фомін О.В.¹, д.т.н., професор
o.fomin@ntu.edu.ua

Черкашин О.П.², аспірант
alex.digma77@gmail.com

Безлуцький В.О.², аспірант
vladbezlutskiy@gmail.com

КЛЮЧОВІ АСПЕКТИ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ КОНТРОЛЮ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ АВТОЗЧЕПНИХ ПРИСТРОЇВ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

¹ Національний транспортний університет, Україна

² Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля

Постановка проблеми. Залізничний транспорт залишається критично важливою складовою логістичної системи держави, а надійність рухомого складу безпосередньо визначає безпеку перевезень та конкурентоспроможність галузі. Одним із найбільш навантажених вузлів рухомого складу є автозчепний пристрій, який сприймає поздовжні зусилля під час руху поїзда, а від його технічного стану залежить цілісність поїзда та безпека маневрування. Зростання маси та швидкостей поїздів, старіння вагонного парку і вплив людського фактора при традиційних оглядах зумовлюють необхідність переходу від планово-попереджувальних ремонтів до обслуговування за фактичним технічним станом на основі автоматизованих та інтелектуальних методів діагностики. Значна частка аварійних подій на залізниці пов'язана саме з несправністю автозчепних пристроїв, а саморозчеплення поїздів на ходу становить загрозу масштабних аварій. Традиційний візуальний огляд значною мірою залежить від суб'єктивного фактора та не завжди дозволяє виявити мікротріщини чи приховані дефекти в умовах обмеженого часу, що знижує пропускну здатність пунктів технічного обслуговування. У зв'язку з цим актуальним є впровадження технологій штучного інтелекту, комп'ютерного зору та сенсорних мереж для контролю технічного стану автозчепів у режимі, наближеному до реального часу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання діагностики та прогнозування ресурсу автозчепних пристроїв висвітлено в низці сучасних досліджень. Так, у роботі [1] запропоновано модель прогнозування залишкового ресурсу елементів автозчепу на основі аналізу росту тріщин з інтеграцією методів механіки руйнування та машинного навчання. У публікаціях [2, 3] розроблено методи інтелектуальної ідентифікації тягових зусиль та кута хитання автозчепу важких поїздів без складної сенсоризації. Дослідження [4] обґрунтовує впровадження цифрового автоматичного зчепу (DAC) у європейських вантажних перевезеннях як засобу підвищення безпеки та ефективності. Робота [5] присвячена цифровізації вантажних вагонів для моніторингу стану із застосуванням сенсорних комплексів та IoT-каналів передачі даних. Питання динамічного навантаження елементів рухомого складу та проєктування поглинаючих апаратів розглянуто в [6, 7]. Окрему групу становлять дослідження засобів автономного енергозабезпечення сенсорних вузлів на основі енергії вібрацій та деформацій [8, 9, 12, 13], а також систем передачі діагностичних даних в умовах завад [10, 11]. Разом з тим, аналіз літератури засвідчив, що застосування методів штучного інтелекту та комп'ютерного зору саме для комплексного контролю технічного стану автозчепних пристроїв перебуває на початковій стадії розробки, а комплексні праці, що поєднують аналіз динамічних навантажень із прогнозуванням залишкового ресурсу в режимі реального часу, практично відсутні.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Існуюча система технічного обслуговування автозчепів, що базується на візуальному огляді, досягла межі своєї ефективності через вплив людського фактора та високу ймовірність пропуску втомних тріщин і наднормативного зносу. Відсутність об'єктивних даних про поточний стан кожного окремого автозчепу унеможливорює перехід до стратегії обслуговування «за станом», а наявні засоби діагностики є громіздкими та не забезпечують миттєвого результату без зупинки рухомого

складу. На залізниці відсутня єдина автоматизована система, здатна інтегрувати дані візуального контролю, параметри навантажень та історію ремонтів конкретного вузла, що знижує точність прогнозування залишкового ресурсу.

Формулювання цілей дослідження. Метою дослідження є підвищення рівня безпеки руху та експлуатаційної надійності залізничного транспорту шляхом розробки інтелектуальної технології автоматизованого контролю технічного стану автозчепних пристроїв з можливістю раннього виявлення дефектів і прогнозування їх залишкового ресурсу.

Виклад основного матеріалу дослідження. Запропонована інтелектуальна технологія контролю (ІТК) поєднує сенсорну мережу, апаратно-програмні засоби обробки даних та алгоритми штучного інтелекту в єдиному інформаційному середовищі. Ключовими компонентами системи є: сенсорна мережа (тензometri, вібродіагностичні датчики, датчики зазору та температури, відеокамери з AI-обробкою); апаратна частина та зв'язок (бортові EDGE-блоки обробки, бездротові канали LoRaWAN/Wi-Fi/GSM-5G, автономне енергозабезпечення); програмне забезпечення (хмарна платформа, алгоритми виявлення аномалій, прогностичні моделі залишкового ресурсу, комп'ютерний зір, цифровий двійник модуля автозчеплення); інтерфейс користувача (панелі моніторингу, системи попередження, інтеграція з ERP/CRM).

Технологія реалізується у три етапи: збір діагностичних даних (камери, лазерні сканери, акселерометри, датчики температури, історія експлуатації), інтелектуальна обробка (сегментація та нейромережевий аналіз зображень, спектральний аналіз вібраційних сигналів, моделювання ресурсу) та прийняття рішень із тривірневою класифікацією стану вагона.

Узагальнено ІТК описується функцією, що перетворює вектор діагностичних параметрів D у вектор оцінки стану та прогнозу R : $R = F_{ITK}(D)$ (1)

Знос робочих поверхонь автозчепу $W(t)$ визначається як функція часу експлуатації та інтенсивності навантажень: $W(t) = W_0 + \int_0^t \dot{W}(\tau, I(\tau)) d\tau$ (2)

Імовірність відмови автозчепи описується моделлю Вейбулла: $P(t) = 1 - \exp[-(t/\eta)^\beta]$ (3)

де η – характеристичний ресурс, β – параметр форми, що визначає характер відмов.

Граничний стан визначається перевищенням допустимого зносу або критичної довжини тріщини: $W(t) \geq W_{дон}$ або $a(t) \geq a_{кр}$ (4)

Швидкість росту втомної тріщини оцінюється за рівнянням Паріса–Ердогана: $da/dN = C(\Delta K)^m$ (5)

Розпізнавання дефектів на зображеннях автозчепу реалізується згортковою нейронною мережею (архітектури YOLO або U-Net). Операція згортки над зображенням I із ядром K : $C[i,j] = \sum_m \sum_n I[i-m, j-n] \cdot K[m,n]$ (6)

з подальшим застосуванням функції активації $ReLU(x) = \max(0, x)$ (7) та мінімізацією функції втрат крос-ентропії при навчанні класифікатора дефектів (тріщина, знос, відсутність дефекту). Фінальна інтегральна оцінка стану S поєднує результати фізичної моделі зносу $W(t)$, імовірності відмови $P(t)$ та класифікації дефектів нейромережею: $S = f(W(t), P(t), C_{ЗНМ})$ (8)

На основі порогових значень $R_{безпеки}$, $R_{критичний}$ та ε_1 , ε_2 система формує тривірневу рекомендацію: «зелений» – вагон придатний до експлуатації; «жовтий» – рекомендовано додатковий контроль або плановий ремонт; «червоний» – негайна відчепка вагона та терміновий ремонт.

Порівняльний аналіз показав, що розроблена система забезпечує вищу точність виявлення тріщин, зносів і деформацій порівняно з традиційним візуальним оглядом, а інтеграція вібродіагностичних даних дозволяє виявляти приховані внутрішні дефекти, недоступні оптичним методам. Водночас встановлено обмеження технології при значному забрудненні поверхонь снігом чи брудом, що потребує додаткових заходів з очищення перед контролем. Отримані результати підтверджують універсальність підходу та можливість його адаптації для різних типів автозчепних пристроїв (зокрема СА-3 та її модифікацій).

Висновки та рекомендації. Розроблено та науково обґрунтовано інтелектуальну технологію контролю технічного стану автозчепних пристроїв залізничного транспорту, що поєднує сенсорну мережу, комп'ютерний зір, глибокі згорткові нейронні мережі та фізико-математичні моделі деградації (теорія надійності, модель Вейбулла, рівняння Паріса–Ердогана) в єдиному інформаційному середовищі. Показано, що запропонований підхід

дозволяє з високою точністю виявляти та класифікувати дефекти, прогнозувати залишковий ресурс елементів автозчепу і формувати цифровий двійник вузла, а також знизити вплив людського фактора на 80–90 %. Практична значимість результатів полягає у можливості впровадження технології в пунктах технічного обслуговування та вагонних депо для переходу до обслуговування за фактичним станом, що сприятиме підвищенню безпеки руху, скороченню простоїв вагонів та оптимізації витрат на ремонт. Подальші дослідження доцільно спрямувати на вдосконалення алгоритмів для роботи в надскладних погодних умовах та розширення переліку діагностованих вузлів рухомого складу.

Список використаних джерел

1. Wang, C., Zhu, T., Yang, B., Yin, M., Xiao, S., & Yang, G. (2023). Remaining useful life prediction framework for crack propagation with a case study of railway heavy duty coupler condition monitoring. *Reliability Engineering & System Safety*, 230, 108915. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2022.108915>
2. Ran, X., Chen, S., Xie, B., Song, P., & Wang, K. (2024). Dynamic identification of coupler force of heavy haul locomotive: An effective and long-term intelligent measurement method. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 133, 108478. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2024.108478>
3. Xie, B., Chen, S., Ran, X., et al. (2024). Dynamic identification of coupler yaw angle of heavy-haul locomotive: an optimal multi-task ELM-based method. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Article 110957. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2023.110957>
4. Cantone, L., Durand, T., Ottati, A., Russo, G., & Tione, R. (2022). The Digital Automatic Coupler (DAC): An effective way to sustainably increase the efficiency of freight transport in Europe. *Sustainability*, 14(23), 15671. <https://doi.org/10.3390/su142315671>
5. Moya, I., Perez, A., Zabalegui, P., de Miguel, G., Losada, M., Amengual, J., Adin, I., & Mendizabal, J. (2023). Freight wagon digitalization for condition monitoring and advanced operation. *Sensors*, 23(17), 7448. <https://doi.org/10.3390/s23177448>
6. Fomin, O., Lovska, A., Kulbovskiy, I., Holub, H., Kozarchuk, I., Kharuta, V. (2019). Determining the dynamic loading on a semi-wagon when fixing it with a viscous coupling to a ferry deck. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(7), 6–12.
7. Wagner, S., Cole, C., & Spiriyagin, M. (2021). A review on design and testing methodologies of modern freight train draft gear system. *Railway Engineering Science*, 29, 127–151. <https://doi.org/10.1007/s40534-021-00237-3>
8. Fan, C., Li, H., Zhang, Z., Pan, Y., Wu, X., & Ahmed, A. (2023). An H-shaped coupler energy harvester for application in heavy railways. *Energy*, 270, 126854. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.126854>
9. Sulim, A.O., Fomin, O.V., Khozya, P.O., Mastepan, A. (2018). Theoretical and practical determination of parameters of on-board capacitive energy storage of the underground rolling stock. *Scientific Bulletin of National Mining University*, 5(1), 79–87. doi: 10.29202/nvngu/2018-5/8
10. Zanelli, F., Sabbioni, E., Carnevale, M., Mauri, M., Tarsitano, D., Castelli-Dezza, F., & Debattisti, N. (2023). Wireless sensor nodes for freight trains condition monitoring based on geo-localized vibration measurements. *Proceedings of the IMechE, Part F*, 237(2), 193–204. <https://doi.org/10.1177/09544097221100676>
11. Kurdiuk, S., Dremluk, V., Melnyk, O., Onishchenko, O., Fomin, O., Píštěk, V., & Kučera, P. (2025). Development of a High-Reliability Hybrid Data Transmission System for Unmanned Surface Vehicles Under Interference Conditions. *Drones*, 9(3), 174. <https://doi.org/10.3390/drones9030174>
12. Gao, M., Cong, J., Xiao, J., He, Q., Li, S., Wang, Y., Yao, Y., Chen, R., & Wang, P. (2020). Dynamic modeling and experimental investigation of self-powered sensor nodes for freight rail transport. *Applied Energy*, 257, 113969. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113969>
13. Zhang, T., Kong, L., Zhu, Z., Wu, X., Li, H., Zhang, Z., & Yan, J. (2024). An electromagnetic vibration energy harvesting system based on series coupling input mechanism for freight railroads. *Applied Energy*, 353, 122047. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.122047>

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ МЕТОДУ СТРУКТУРНО-СЕМАНТИЧНОГО КОНТРОЛЮ СТВОРЕННЯ ПРОГРАМНОГО КОДУ

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Україна

Сучасні інтелектуальні системи навчання програмуванню широко використовують автоматизовані засоби перевірки програмного коду. Найпоширеніші підходи ґрунтуються на тестуванні програмних рішень та перевірці правильності отриманих результатів. Проте такі підходи не забезпечують достатнього аналізу структурних і семантичних особливостей програмного коду та часто формують обмежений зворотний зв'язок для студентів. У результаті студент отримує інформацію про наявність помилки, але не завжди розуміє її причину та способи усунення.

Проблема автоматизованого оцінювання програмного коду активно досліджується у сучасних роботах. У дослідженні [1] проведено систематичний аналіз сучасних інструментів автоматизованого оцінювання та формування зворотного зв'язку під час навчання програмуванню. У роботі [2] розглянуто практичне використання автоматизованих систем оцінювання для підтримки вивчення алгоритмів і структур даних та показано їх позитивний вплив на навчальний процес. Значна увага у сучасних дослідженнях приділяється застосуванню великих мовних моделей для генерації рекомендацій і пояснень щодо програмного коду. У роботах [3, 4] досліджуються можливості використання великих мовних моделей для формування підказок та персоналізованого зворотного зв'язку під час навчання програмуванню. Робота [5] демонструє перспективність використання великих мовних моделей для автоматичного формування рекомендацій щодо покращення програмного коду. Водночас більшість існуючих підходів зосереджені на аналізі результатів виконання програм або окремих показників якості коду. Тому залишається актуальною задача формування змістовного та інтерпретованого зворотного зв'язку з урахуванням структурних і семантичних характеристик програмного рішення.

Метою роботи є експериментальне оцінювання ефективності методу структурно-семантичного контролю створення програмного коду щодо формування зрозумілого та корисного зворотного зв'язку для студентів.

Метод структурно-семантичного контролю створення програмного коду є розвитком підходів інтелектуального аналізу програмного коду, запропонованих у роботі [2]. На відміну від підходів, що базуються виключно на тестуванні програмних рішень, метод передбачає аналіз структурних і семантичних характеристик програмного коду для виявлення недоліків та формування рекомендацій щодо їх усунення. Результати аналізу використовуються для автоматичного формування зворотного зв'язку, спрямованого на покращення якості програмного рішення та підтримку навчального процесу.

Для проведення дослідження було сформовано експериментальний набір даних на основі результатів виконання студентом практичних завдань з програмування мовою Python. До експерименту були включені теми, що охоплюють базові програмні конструкції та характеризуються наявністю типових синтаксичних, логічних і семантичних помилок. Характеристика навчальних модулів наведена в табл. 1.

У процесі експерименту для кожного студентського рішення виконувалися структурно-семантичний аналіз програмного коду та автоматичне формування рекомендацій щодо усунення виявлених недоліків. Загалом було проаналізовано 42 програмні завдання та отримано 42 анкети оцінювання.

Таблиця 1. Характеристика навчальних модулів, використаних під час експерименту

№	Модуль	Основні конструкції
3	Оператори та обчислення	арифметичні операції, логічні операції, порівняння, числові типи даних, вирази
4	Умовні конструкції	if, if-else, if-elif-else, вкладені умови, складні логічні вирази
5	Цикли	for, while, вкладені цикли, перебір послідовностей, накопичення результатів
6	Рядки	операції над рядками, індексація, пошук, обробка тексту, робота з символами
7	Списки	списки, вкладені списки, індексація, зрізи, додавання та видалення елементів
8	NumPy	масиви, багатовимірні структури даних, математичні операції
9	Функції	параметри, аргументи, return, *args, **kwargs

Якість сформованого зворотного зв'язку оцінювалася за шкалою Лайкерта від 1 до 5 балів. Результати анкетування наведені в табл. 2.

Таблиця 2 – Результати оцінювання сформованого зворотного зв'язку

№	Критерій оцінювання	Середня оцінка
1	Зворотний зв'язок був зрозумілим та легко сприймався	4,48
2	Виявлені у коді проблеми були описані коректно	4,31
3	Надані пояснення допомогли зрозуміти причини помилок або недоліків	4,26
4	Рекомендації щодо покращення коду були корисними	4,48
5	Отриманий зворотний зв'язок містив достатньо інформації для виправлення недоліків	4,43
6	Зворотний зв'язок допоміг краще зрозуміти вимоги до завдання	4,26
7	Після ознайомлення зі зворотним зв'язком я знаю, як покращити своє рішення	4,4
8	Отримані рекомендації є практичними та можуть бути застосовані на практиці	4,67
9	Зворотний зв'язок сприяв підвищенню моїх знань або навичок програмування	4,67
10	Я вважаю такий формат зворотного зв'язку корисним для навчання програмуванню	4,93
11	Я хотів(ла) б отримувати подібний зворотний зв'язок під час виконання інших завдань	4,93
12	Загалом я задоволений(а) якістю отриманого зворотного зв'язку	4,83

Як видно з табл. 2, усі критерії оцінювання отримали середні значення понад 4 бали з 5 можливих. Найвищі оцінки були зафіксовані для критеріїв корисності такого формату навчальної підтримки та готовності отримувати подібний зворотний зв'язок під час виконання інших завдань (4,93 бала). Високі оцінки також отримали критерії практичної застосовності

рекомендацій (4,67 бала), підвищення знань і навичок програмування (4,67 бала) та загальної задоволеності якістю сформованого зворотного зв'язку (4,83 бала).

Інтегральна оцінка корисності сформованого зворотного зв'язку становила 8,93 бала з 10 можливих. Отримані результати свідчать про високу практичну цінність запропонованого підходу та підтверджують можливість використання сформованого зворотного зв'язку як інструменту підтримки навчання програмуванню.

Висновок. Проведене експериментальне дослідження підтвердило ефективність методу структурно-семантичного контролю створення програмного коду щодо формування змістовного та практично орієнтованого зворотного зв'язку. Отримані результати показали високий рівень сприйняття сформованих рекомендацій та їх корисність для навчання програмуванню. Подальші дослідження доцільно спрямувати на розширення експериментальної вибірки та вдосконалення механізмів формування рекомендацій для різних типів програмних завдань.

Список використаних джерел:

1. Automated Grading and Feedback Tools for Programming Education: A Systematic Review / Marcus Messer [et al.] // ACM Transactions on Computing Education. – 2023. – <https://doi.org/10.1145/3636515>
2. Seliutin D. Intellectual code analysis in automation grading / Denys Seliutin, Elena Yashyna // Radioelectronic and Computer Systems. – 2024. – Vol. 2024, no. 4. – P. 68–82. – Mode of access: <https://doi.org/10.32620/reks.2024.4.06>
3. Automated assessment system for programming courses: a case study for teaching data structures and algorithms / Andre L. C. Barczak [et al.] // Educational technology research and development. – 2023. – <https://doi.org/10.1007/s11423-023-10277-2>
4. Jacobs S. Evaluating the Application of Large Language Models to Generate Feedback in Programming Education / Sven Jacobs, Steffen Jaschke // 2024 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON), Kos Island, Greece, 8–11 May 2024. – [S. l.], 2024. – <https://doi.org/10.1109/educon60312.2024.10578838>
5. Roest L. Next-Step Hint Generation for Introductory Programming Using Large Language Models / Lianne Roest, Hieke Keuning, Johan Jeuring // ACE 2024: Australian Computing Education Conference, Sydney NSW Australia. – New York, NY, USA, 2024. – <https://doi.org/10.1145/3636243.3636259>
6. BeGrading: large language models for enhanced feedback in programming education / Mina Yousef [et al.] // Neural Computing and Applications. – 2024. – <https://doi.org/10.1007/s00521-024-10449-y>

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИЙ АНАЛІЗ ДАНИХ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ НАВАНТАЖЕННЯ ОБЧИСЛЮВАЛЬНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Україна

Сучасні інформаційні системи функціонують у середовищі постійного зростання обсягів оброблюваних даних, що обумовлює збільшення навантаження на серверні ресурси та ускладнення процесів їх управління.

Згідно з результатами дослідження Uptime Institute, у глобальному опитуванні операторів дата-центрів 2024 року понад 53 % організацій повідомили про наявність збоїв у роботі інфраструктури протягом останніх трьох років, що свідчить про системний характер проблеми забезпечення надійності серверних систем [1]. При цьому, незважаючи на певне зниження частоти інцидентів у порівнянні з попередніми роками, загальна складність інфраструктури та обчислювального навантаження продовжує зростати, що створює додаткові ризики перевантаження ресурсів. Також наслідки перевантаження серверів мають суттєвий економічний характер. Навіть поодинокі збої можуть призводити до значних фінансових втрат, зниження довіри користувачів та порушення бізнес-процесів.

Це обумовлює необхідність розроблення підходів, що базуються на інтелектуальному аналізі телеметричних даних та прогнозуванні майбутніх станів системи.

У науковій літературі проблему ефективного керування ресурсами визначають як одну з ключових для хмарних платформ. Дослідники відзначають, що хмарні ресурси залишаються гнучкими та доступними, але їх розподілення стикається з низкою труднощів: перевантаження серверів, надмірне споживання енергії та непередбачувані сплески навантаження [2]. Традиційні методи управління часто реагують лише на вже наявні перевантаження та призводять до надмірного виділення ресурсів, що збільшує енергоспоживання. Застосування комбінації методів машинного навчання: лінійної регресії, експоненційного ковзного середнього та довгої короткострокової пам'яті (LSTM) – дозволяє прогнозувати споживання ресурсів у реальному часі та динамічного виділення ресурсів, щоб запобігати як недовантаженню, так і перевантаженню серверів [2].

Сучасні алгоритми прогнозування навантаження враховують характер притаманних хмарним додаткам відмов: короткотермінові піки, сезонні коливання, трансформації під впливом зовнішніх подій. Розробники систем штучного інтелекту (artificial intelligence, AI) стикаються з особливо високими вимогами до ресурсів. Наприклад, дослідження з короткотермінового прогнозування навантаження AI центрів зазначає, що великі центри, орієнтовані на задачі машинного навчання, мають швидкі, часто секундні коливання споживання електроенергії через нерівномірне завантаження графічних процесорів, що виконують операції зі штучним інтелектом [3]. Традиційні статистичні методи, такі як ARIMA, недостатньо добре відображають складні шаблони, характерні для високоінтенсивних AI навантажень, тоді як глибокі нейронні мережі досягають кращої точності прогнозування.

У процесі функціонування серверної інфраструктури ключові показники навантаження, зокрема використання центрального процесора та оперативної пам'яті, змінюються у часі та відображають динаміку обчислювальних процесів. Такі метрики природно інтерпретуються як часові ряди, що дозволяє застосовувати до них математичний апарат аналізу та прогнозування.

Нехай $y(t)$ – значення завантаження CPU у момент часу t . Тоді часовий ряд можна подати у вигляді послідовності спостережень:

$$y(t_1), y(t_2), y(t_3), \dots, y(t_n), \quad (1)$$

де t_i – дискретні моменти часу, що відповідають фіксації телеметричних даних. Аналогічно вводиться часовий ряд для використання оперативної пам'яті:

$$m(t_1), m(t_2), m(t_3), \dots, m(t_n), \quad (2)$$

де $m(t)$ – обсяг використаної пам'яті у момент часу t .

Особливістю серверних метрик є їх багатofакторна залежність від внутрішніх параметрів системи. Узагальнено залежність навантаження CPU можна подати у вигляді функціональної моделі:

$$y(t) = f(x_1(t), x_2(t), \dots, x_k(t)) + \varepsilon(t), \quad (3)$$

де $x_i(t)$ – фактори впливу (наприклад, кількість процесів, мережевий трафік, навантаження GPU), а $\varepsilon(t)$ – випадкова складова, що відображає шум і невраховані впливи. Такий підхід дозволяє враховувати комплексну природу формування навантаження, характерну для серверних систем.

Для подальшого аналізу часовий ряд доцільно розкласти на основні компоненти:

$$y(t) = T(t) + S(t) + R(t), \quad (4)$$

де $T(t)$ – трендова складова, що відображає довгострокову зміну навантаження; $S(t)$ – сезонна компонента, яка описує періодичні коливання; $R(t)$ – випадкова (залишкова) складова. Такий розклад дозволяє виявити закономірності зміни навантаження, зокрема регулярні піки, що виникають у певні часові інтервали.

Для метрик CPU характерні різкі короткотермінові коливання, що зумовлені зміною кількості активних процесів та нерівномірним розподілом обчислювальних задач. Формально це можна оцінити через приріст значення метрики:

$$\Delta y(t) = y(t) - y(t - 1), \quad (5)$$

що дозволяє виявляти аномальні зміни та потенційні перевантаження. Для оперативної пам'яті, навпаки, характерні більш згладжені зміни, які часто мають накопичувальний характер, що пов'язано з використанням кешів і буферів.

З метою зменшення впливу випадкових коливань доцільно застосовувати згладжування часових рядів, наприклад, за допомогою ковзного середнього:

$$\tilde{y}(t) = \frac{1}{k} \sum_{i=0}^{k-1} y(t - i), \quad (6)$$

де k – розмір вікна згладжування. Це дозволяє виділити загальну тенденцію зміни навантаження та підвищити стійкість прогнозних моделей.

Таким чином, представлення метрик CPU та RAM у вигляді часових рядів створює основу для застосування методів математичного моделювання та машинного навчання. Це дозволяє формалізувати процес прогнозування навантаження, враховувати динаміку змін параметрів системи та забезпечувати своєчасне виявлення критичних станів, що є необхідною передумовою для побудови ефективної підсистеми інтелектуального аналізу даних.

Прогнозування навантаження серверних ресурсів базується на аналізі часових рядів, що відображають зміну стану системи у часі. Для вирішення цієї задачі застосовуються різні математичні моделі, які дозволяють виявляти закономірності в даних, враховувати тренди, сезонність та випадкові коливання. Вибір конкретної моделі визначається характером даних, їх стаціонарністю та рівнем складності динаміки навантаження.

Для задачі прогнозування серверного навантаження ключовим критерієм стає здатність моделі адаптуватися до різких змін і стрибків метрик. Модель Prophet забезпечує гнучке моделювання трендових і сезонних компонентів без необхідності складної попередньої обробки даних. Вона демонструє стійкість до пропусків у даних та здатність враховувати аномальні значення, що є важливим для аналізу телеметричної інформації.

Для побудови підсистеми прогнозування навантаження серверів необхідним є використання репрезентативного набору даних, який відображає реальні умови функціонування обчислювальної інфраструктури та містить повний набір телеметричних показників. У межах даної роботи використано відкритий набір даних Alibaba Cluster Trace GPU, сформований на основі журналів роботи великомасштабного кластеру обробки задач машинного навчання, що включає понад 6500 графічних процесорів і близько 1800 серверів [4]. Дані охоплюють реальні обчислювальні навантаження, що виникають під час виконання як навчальних, так і інференсних задач, і характеризуються високою динамікою змін та наявністю пікових навантажень.

Набір даних представлений у форматі CSV та містить часові інтервали виконання задач разом із набором метрик, що характеризують стан серверних ресурсів. Особливістю даного датасету є наявність як цільової змінної, що відображає загальне навантаження CPU, так і допоміжних параметрів, які описують різні аспекти роботи системи, зокрема використання процесора, мережеву активність, кількість процесів і навантаження графічних пристроїв. Структура даних дозволяє формувати багатовимірну модель залежності навантаження від супровідних факторів.

Режим навчання моделі забезпечує побудову та оновлення прогнозовної моделі на основі історичної вибірки телеметричних даних. Для оцінювання якості побудованої моделі здійснюється обчислення метрик, зокрема середньої абсолютної помилки (MAE), середньоквадратичної помилки (RMSE) та середньої абсолютної відносної помилки (MAPE), що дозволяє кількісно оцінити точність прогнозування.

Значення MAE на рівні 15.6275 свідчить про відносно помірне середнє відхилення прогнозованих значень від фактичних, що є прийнятним для задач моніторингу навантаження. Показник RMSE (19.4072) демонструє підвищену чутливість до значних відхилень, що вказує на наявність окремих інтервалів часу з більш складною динамікою навантаження. Особливу увагу привертає значення MAPE (129.23 %), яке є досить високим і свідчить про значні відносні похибки прогнозування, що може бути зумовлено наявністю малих фактичних значень навантаження або високою варіативністю даних. У цілому результати тестування дозволяють зробити висновок, що модель здатна відтворювати загальні тенденції зміни навантаження, однак потребує подальшого вдосконалення або перенавчання на більш репрезентативних вибірках для підвищення точності прогнозування.

З метою тестування системи впроваджено механізм симуляції роботи серверів, що дозволяє тестувати підсистему у режимі, наближеному до реальних умов експлуатації. Комплексне тестування охоплює перевірку процесів завантаження та обробки даних, навчання моделі, формування прогнозів, роботи симуляційного модуля та відображення результатів у вебінтерфейсі. Результати виконання функціонального тестування та перевірки механізмів обробки виключних ситуацій відображаються у вигляді інтерактивної панелі спостереження (рисунк 1), яка забезпечує узагальнений огляд стану системи.

Для кількісного аналізу роботи підсистеми сформовано узагальнені результати функціонування моделі прогнозування для кількох серверних вузлів. У таблиці 1 наведено приклад порівняння фактичних та прогнозованих значень навантаження CPU для окремих серверів.

Наведені дані свідчать про те, що розроблена модель демонструє достатньо високий рівень узгодженості з фактичними показниками навантаження.

Водночас спостерігається тенденція до зростання похибки при збільшенні навантаження, що є характерним для моделей прогнозування часових рядів у умовах підвищеної варіативності даних. Це пояснюється складністю відтворення різких змін у поведінці системи, які можуть бути викликані короточасними піковими навантаженнями.

Незважаючи на це, загальна похибка залишається у прийнятних межах для задач моніторингу та попереднього виявлення критичних станів.

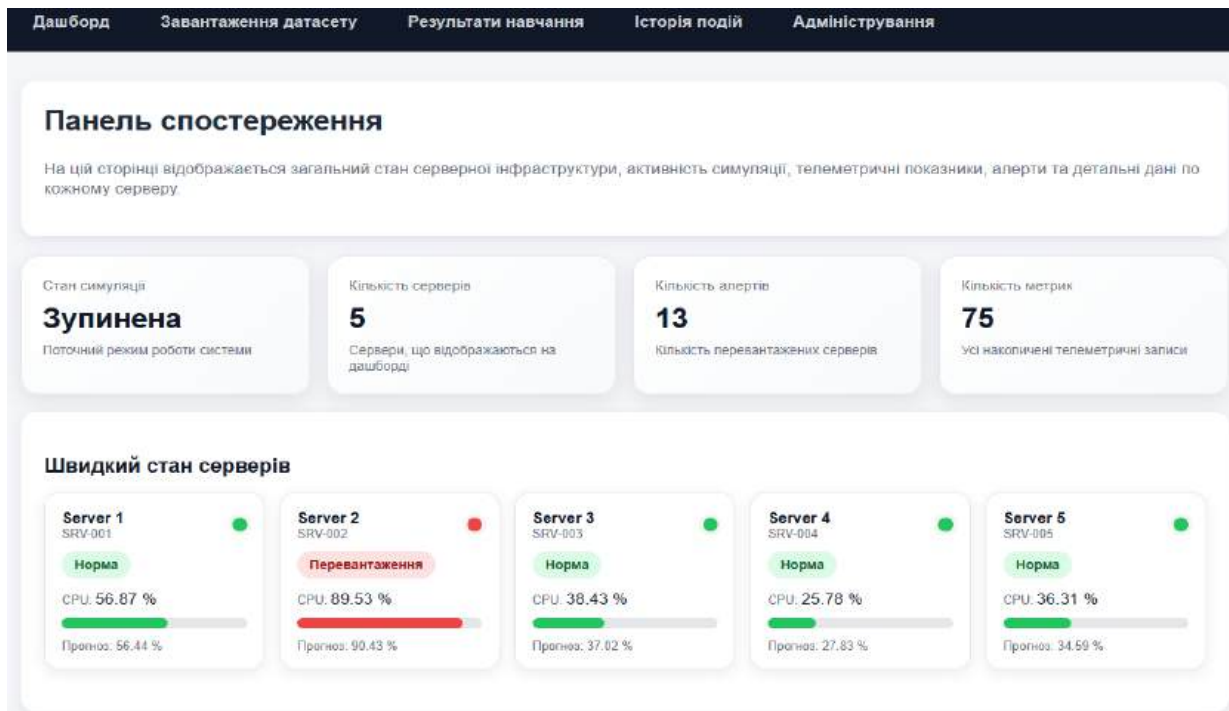


Рис. 1. Панель спостереження системи з відображенням стану серверів та алертів у режимі, наближеному до реального часу

Таблиця 1 – Порівняння фактичних та прогнозованих значень навантаження CPU

Сервер	Фактичне CPU (%)	Прогнозоване CPU (%)	Абсолютна похибка (%)
Server 1	56.87	56.44	0.43
Server 2	89.53	90.43	0.90
Server 3	38.43	37.02	1.41
Server 4	82.63	84.99	2.36
Server 5	36.31	34.59	1.72

Проведений аналіз підтверджує, що розроблена підсистема забезпечує достатній рівень точності прогнозування, ефективно виявляє перевантаження серверів та демонструє стабільну роботу у змодельованих умовах експлуатації. Реалізовані функціональні можливості дозволяють використовувати систему як інструмент для моніторингу та попередження критичних станів у серверній інфраструктурі.

Список використаних джерел.

1. UII KEYNOTE REPORT 146M. Uptime Institute Global Data Center Survey 2024. URL: <https://datacenter.uptimeinstitute.com/rs/711-RIA-145/images/2024.GlobalDataCenterSurvey.Report.pdf>.
2. Predictive Algorithms for Resource Utilization and Server Overload Management in Dynamic Cloud Environments. URL: <https://jisem-journal.com/index.php/journal/article/download/3933/1738/6440>.
3. Mughees M., Li Y., Chen Y., Li Y. Short-Term Load Forecasting for AI-Data Center. URL: <https://arxiv.org/html/2503.07756v1> (дата звернення 16.04.2026).
4. Alibaba Cluster Trace GPU. Mwiti D. 2020. URL: https://www.kaggle.com/datasets/derrickmwiti/cluster-trace-gpu-v2020?select=pai_machine_metric.csv.

4. ФУНКЦІОНАЛЬНІ КОМПЛЕКСИ ЛОГІСТИЧНИХ СИСТЕМ НА ВИРОБНИЦТВІ

УДК 658.7:004:621

Гомес Іглесіас О.О., к.е.н.
logmenkaf@gmail.com

ЦИФРОВІ ТЕХНОЛОГІЇ УПРАВЛІННЯ ЛОГІСТИЧНИМИ ПОТОКАМИ МАШИНОБУДІВНОГО ПІДПРИЄМСТВА

Класичний приватний університет, м. Запоріжжя, Україна

Цифрова трансформація виробничих процесів стала одним із визначальних чинників підвищення конкурентоспроможності машинобудівних підприємств, оскільки традиційні методи управління матеріальними потоками, засновані на паперовому документообігу та ручному плануванні, більше не забезпечують необхідної швидкості й точності реагування на зміну виробничих замовлень. Багатостадійність технологічних процесів, значна номенклатура деталей і вузлів та висока капіталомісткість обладнання, характерні для машинобудівного виробництва, зумовлюють особливу потребу в цифрових інструментах, здатних забезпечити наскрізну видимість матеріальних та інформаційних потоків на всіх етапах – від постачання сировини до відвантаження готової продукції. Саме тому питання застосування цифрових технологій в управлінні логістичними потоками машинобудівного підприємства набуває дедалі більшої практичної актуальності. Особливої гостроти ця проблема набуває для підприємств, що працюють в умовах воєнного часу та повоєнного відновлення, коли порушення традиційних логістичних маршрутів і ланцюгів постачання вимагає від підприємства здатності швидко перебудовувати графіки постачання та виробництва на основі актуальних, а не історичних даних.

Теоретичні засади побудови інтегрованих логістичних систем та ланцюгів постачання розкрито у праці Є. В. Крикавського, О. А. Похильченко та М. Фертча [1]. Питання автоматизації складських операцій як складової цифровізації логістики висвітлено у навчальному посібнику В. Є. Марчука, М. Ю. Григорак, О. М. Гармаш та О. В. Овдієнко [2]. Особливості формування логістичної інфраструктури підприємства, зокрема її інформаційної складової, досліджено М. Ю. Григорак, Л. В. Костюченко та О. Є. Соколовою [3]. Разом із тим питання комплексного застосування цифрових технологій саме для управління логістичними потоками машинобудівних підприємств, з урахуванням специфіки їх багатостадійного виробництва, залишається розкритим недостатньо.

Метою дослідження є визначення напрямів застосування цифрових технологій в управлінні логістичними потоками машинобудівного підприємства. Для досягнення поставленої мети визначено такі завдання: розкрити сутність цифровізації управління логістичними потоками; охарактеризувати основні цифрові технології, що застосовуються в логістиці машинобудівного підприємства; визначити чинники, що ускладнюють їх впровадження; окреслити практичні напрями підвищення ефективності цифрового управління логістичними потоками.

Під цифровими технологіями управління логістичними потоками машинобудівного підприємства розуміють сукупність програмно-апаратних засобів і методів, що забезпечують автоматизований збір, обробку та передавання даних про рух матеріальних ресурсів, напівфабрикатів і готової продукції на всіх стадіях логістичного циклу – від постачання сировини до відвантаження виробів споживачу. На відміну від традиційного управління, що спирається переважно на періодичну звітність і ручне узгодження дій між підрозділами, цифрове управління передбачає безперервний обмін даними в режимі, наближеному до реального часу, що дозволяє оперативно виявляти відхилення від плану та коригувати рішення до того, як вони спричинять простої виробництва чи надлишкові запаси.

Практично цифровізація управління логістичними потоками виявляється у кількох взаємопов'язаних напрямках. По-перше, це впровадження систем класу ERP і MES, які забезпечують наскрізне планування потреби в матеріалах та диспетчеризацію виробничих замовлень відповідно до фактичного завантаження обладнання. По-друге, застосування систем управління складом класу WMS, що автоматизують облік і розміщення матеріальних ресурсів та узгоджують складські операції з виробничим графіком. По-третє, використання технологій автоматичної ідентифікації – штрихового кодування та RFID-міток, які дозволяють фіксувати рух кожної партії матеріалів без ручного введення даних. Нарешті, окремим напрямом є застосування цифрових інструментів імітаційного моделювання, які дають змогу заздалегідь перевірити пропускну спроможність логістичних ланок і оцінити наслідки прийнятих рішень до їх фактичного впровадження.

Взаємодію фізичних (матеріальних) та інформаційних потоків у процесі цифрового управління логістикою машинобудівного підприємства наочно представлено на рисунку 1.



Рис. 1. Схема цифрового управління логістичними потоками машинобудівного підприємства

Наведена схема демонструє, що фізичний рух матеріалів послідовно проходить стадії постачання, виробництва, зберігання та збуту, тоді як цифрові технології – RFID та штрихове кодування, MES, WMS і портал електронного обміну даними з клієнтами – забезпечують паралельний інформаційний супровід кожної стадії. Центральне місце в такій архітектурі посідає ERP-система, яка об'єднує дані всіх цифрових модулів у єдиний інформаційний контур і виступає інструментом наскрізного планування. Окремим елементом схеми є блок імітаційного моделювання, пов'язаний з ERP зворотним зв'язком: він дозволяє попередньо перевіряти сценарії завантаження потужностей і коригувати планові рішення до того, як вони будуть реалізовані на фізичному рівні. Саме поєднання прямого зв'язку «фізичний потік – цифрова система» з подвійним зв'язком «цифрові модулі – ERP» і забезпечує наскрізну видимість логістичних потоків, про яку йшлося вище.

Ступінь цифровізації логістичних потоків може суттєво відрізнятися залежно від масштабу та типу організації виробництва. На великих машинобудівних підприємствах із серійним чи масовим виробництвом цифровізація здебільшого реалізується через впровадження повнофункціональних систем ERP і MES, інтегрованих з обладнанням через промислові контролери. На підприємствах з одиничним і дрібносерійним виробництвом, де номенклатура замовлень часто змінюється, доцільнішим є поетапне впровадження окремих цифрових модулів – насамперед систем WMS та автоматичної ідентифікації, які дають найшвидший практичний ефект за відносно невеликих витрат на впровадження.

Позитивний ефект від цифровізації управління логістичними потоками виявляється передусім у скороченні часу на обробку інформації про рух матеріалів, зменшенні кількості помилок, пов'язаних із ручним введенням даних, та підвищенні точності планування потреби в матеріальних ресурсах. Наскрізна видимість логістичних потоків дозволяє також швидше виявляти вузькі місця у взаємодії складського, виробничого та транспортного підрозділів і оперативно перерозподіляти ресурси для їх усунення. Водночас впровадження цифрових

технологій потребує суттєвих початкових інвестицій та перенавчання персоналу, що для багатьох машинобудівних підприємств залишається стримувальним чинником.

Узагальнену характеристику основних цифрових технологій управління логістичними потоками машинобудівного підприємства наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Цифрові технології управління логістичними потоками машинобудівного підприємства

№ з/п	Технологія	Функціональне призначення
1	ERP-системи	Наскрізне планування потреби в матеріальних ресурсах та узгодження виробничого й закупівельного графіків
2	MES-системи	Диспетчеризація виробничих замовлень і контроль виконання технологічних операцій у реальному часі
3	WMS-системи	Автоматизація обліку, розміщення та відпуску матеріальних ресурсів на складі
4	RFID / штрихове кодування	Автоматична ідентифікація та відстеження руху партій матеріалів без ручного введення даних
5	Імітаційне моделювання	Попередня перевірка пропускної спроможності логістичних ланок і сценаріїв завантаження потужностей

Найбільш поширеним напрямом цифровізації на машинобудівних підприємствах залишається впровадження ERP-систем, оскільки саме вони забезпечують єдину інформаційну основу для узгодження постачання, виробництва та збуту. Проте самостійне впровадження ERP без інтеграції з MES та WMS не дає повного ефекту, оскільки дані про фактичний хід виробничих операцій і складські залишки надходять із затримкою, що знижує точність оперативного планування та нівелює частину переваг цифровізації.

Окремої уваги в контексті цифровізації логістичних потоків потребує питання захисту даних. Об'єднання ERP, MES, WMS та систем автоматичної ідентифікації в єдиний інформаційний контур підвищує не лише швидкість обміну даними, а й вразливість підприємства до кібернетичних загроз: збій або несанкціонований доступ до центральної системи здатний одночасно порушити планування постачання, диспетчеризацію виробництва та облік складських запасів. Тому впровадження цифрових технологій управління логістичними потоками має супроводжуватися розробленням політики розмежування доступу до даних, регулярним резервним копіюванням інформації та підготовкою персоналу до дій у разі технічних збоїв, щоб цифровізація не перетворювалася на додаткове джерело ризику для безперервності виробничого процесу.

До основних чинників, що ускладнюють впровадження цифрових технологій управління логістичними потоками на машинобудівних підприємствах, належать значні витрати на придбання й налаштування програмного забезпечення, необхідність інтеграції нових систем із наявним технологічним обладнанням, опір персоналу зміні усталених процедур роботи, а також недостатня кваліфікація працівників для повноцінного використання можливостей цифрових інструментів. Подолання цих обмежень потребує поетапного впровадження – від окремих модулів автоматичної ідентифікації та обліку до повної інтеграції ERP, MES і WMS в єдиний інформаційний контур.

Слід зауважити, що ефективність наведеної на рисунку 1 архітектури значною мірою залежить від якості первинних даних, які надходять від цифрових систем нижнього рівня. Якщо RFID-мітки або штрихові коди наносяться на матеріали нерегулярно, а дані з MES вводяться з затримкою, центральна ERP-система оперує неповною або застарілою інформацією, що знижує точність планування навіть за наявності технічно досконалого програмного забезпечення. Тому впровадження цифрових технологій управління логістичними потоками доцільно розпочинати саме з налагодження дисципліни первинного обліку на рівні складу та виробничих дільниць, а вже потім переходити до інтеграції окремих модулів у єдиний контур ERP.

З практичної точки зору впровадження цифрових технологій управління логістичними потоками доцільно здійснювати поетапно. На першому етапі проводиться аудит наявних логістичних процесів і визначаються дільниці з найбільшими втратами часу через ручне оброблення інформації. На другому етапі впроваджуються системи автоматичної ідентифікації та обліку матеріальних потоків, що дають швидкий і вимірюваний ефект за відносно невеликих витрат. На третьому етапі здійснюється інтеграція окремих цифрових модулів у єдину інформаційну систему управління підприємством, яка об'єднує дані про постачання, виробництво, склад і збут в одному контурі прийняття рішень.

Перед ухваленням рішення про послідовність впровадження цифрових технологій доцільно провести попередню оцінку готовності підприємства до цифровізації, яка охоплює технічну, організаційну та кадрову складові. Технічна готовність визначається наявністю та станом обладнання, здатного до підключення цифрових датчиків і контролерів; організаційна – чіткістю розподілу функцій між складською, виробничою та плановою службами; кадрова – рівнем цифрової грамотності персоналу, який працюватиме з новими системами. Підприємства з низьким рівнем готовності за будь-якою з цих складових ризикують отримати формальне впровадження цифрових технологій без реального підвищення ефективності управління логістичними потоками, тому підготовчий етап оцінювання готовності є не менш важливим, ніж вибір конкретного програмного рішення.

Оцінювання економічної доцільності впровадження цифрових технологій управління логістичними потоками доцільно здійснювати за сукупністю показників, що відображають різні аспекти отриманого ефекту. До прямих показників належать скорочення часу обробки замовлення та зменшення трудовитрат на ручне введення даних, до непрямих – зниження рівня страхових запасів, скорочення простоїв обладнання через невчасне постачання матеріалів та підвищення точності виконання замовлень у встановлені терміни. Порівняння цих показників до та після впровадження окремих цифрових модулів дозволяє обґрунтовано визначати черговість подальшої цифровізації логістичних процесів машинобудівного підприємства та розраховувати період окупності відповідних інвестицій. При цьому доцільно враховувати не лише прямий економічний ефект від впровадження окремого цифрового модуля, а й синергетичний ефект від його інтеграції з іншими системами: практика свідчить, що ізольоване впровадження WMS або MES без подальшого підключення до ERP дає значно менший приріст ефективності, ніж поетапна, але узгоджена цифровізація всього логістичного циклу підприємства.

Проведене дослідження засвідчило, що цифрові технології є важливим інструментом підвищення ефективності управління логістичними потоками машинобудівного підприємства. Системи ERP, MES, WMS, технології автоматичної ідентифікації та імітаційного моделювання взаємно доповнюють одна одну і мають впроваджуватися узгоджено, з урахуванням масштабу підприємства та типу організації виробництва. Подальші дослідження доцільно спрямувати на розроблення методики оцінювання економічної ефективності впровадження окремих цифрових технологій для підприємств машинобудівної галузі. Практичне застосування запропонованої схеми цифрового управління дозволить машинобудівним підприємствам поетапно й обґрунтовано переходити до наскрізного цифрового контуру логістики без надмірних одноразових витрат.

Список використаних джерел

1. Крикавський Є. В., Похильченко О. А., Фертч М. Логістика та управління ланцюгами поставок : підручник. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2019. 848 с.
2. Марчук В. Є., Григорак М. Ю., Гармаш О. М., Овдієнко О. В. Складська логістика : навчальний посібник. Київ : ОЛДІ-ПЛЮС, 2020. 256 с.
3. Григорак М. Ю., Костюченко Л. В., Соколова О. Є. Логістична інфраструктура : навч. посібник. Київ : Логос, 2013. 400 с.

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ ГЛИБОКОГО НАВЧАННЯ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ПОСТАВОК В СКЛАДНІЙ ЛОГІСТИЧНІЙ СИСТЕМІ

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Україна

Традиційні логістичні системи покладаються на традиційні методи, такі як дослідження операцій та людська праця/досвід, коли технологія AI не використовується. Традиційні методи в цих областях зазвичай ґрунтуються на обмежувальних припущеннях або специфічних обмеженнях. На відміну від них, методи штучного інтелекту дозволяють приймати рішення з більшою гнучкістю, враховуючи динаміку реальних сценаріїв, та узагальнювати досвід вирішення однієї проблеми на інші проблеми тієї самої родини, що дозволяє швидко знизити обчислювальні витрати.

Розподіл ресурсів у логістичній системі ґрунтується на прогнозуванні станів системи, включаючи ринковий попит та якість обслуговування. Оскільки логістична система завжди тісно пов'язана з ланцюжком постачання, точна оцінка попиту в ланцюжку постачання є основою для завчасного та належного розподілу ресурсів у логістичній системі.

Логістична служба підтримується величезною мережею, що складається з вузлових об'єктів, включаючи склади, розподільні центри та термінальні станції, з транспортними маршрутами між ними як ребра. Ця інфраструктура сприяє торгівлі між компаніями та клієнтами, забезпечуючи доставку продукції від виробників до споживачів. Наприклад, у сценарії роздрібно торгівлі логістична система обслуговує виробників, підтримуючи їхню продукцію на складі на основі методологій управління ланцюжками поставок, щоб гарантувати високу ефективність за часом. Згодом придбані товари відвантажуються з відповідних складів, сортуються у регіональних розподільчих центрах та пересилаються транспортною мережею на місцеві станції для остаточної доставки клієнтам [1].

Задача оптимізації поставок сировини до мережі переробки та збуту продукції може бути формалізована у вигляді задачі змішаного цілочисельного лінійного програмування (mixed integer linear programming, MILP)

$$\text{minimize } \sum_s \sum_r x_{sr} \cdot c_{sr} + \sum_l \sum_r \sum_p y_{lrp} \cdot h_{rp} + \sum_l \sum_r \left(g_{lr} \cdot \sum_{l,r,p} y_{lrp} \right) \quad (1)$$

в умовах обмежень:

$$\begin{aligned} \sum_r x_{sr} &\leq C_s & \forall s & \quad (\text{обмеження потужності постачальників}) \\ \sum_s x_{sr} &= \sum_r \sum_p y_{lrp} & \forall r & \quad (\text{умова балансу потоків}) \\ \sum_r \sum_p y_{lrp} &\geq \sum_p D_{lp} & \forall l & \quad (\text{обмеження обсягу споживання}) \\ x_{sr}, y_{lrp} &\in \mathbb{N}^+, & & \quad (\text{обмеження цілочисельності}) \end{aligned}$$

де x_{sr} позначає кількість одиниць, закуплених у постачальника s для цеху обробки r ; y_{lrp} – кількість одиниць продукції p , що відправляється до роздрібно точки ℓ із цеху обробки r . Кожен постачальник s має виробничу потужність C_s , а кожна роздрібна точка ℓ має попит D_{lp} на продукцію p . Існує вартість c_{sr} для кожної одиниці сировини, закупленої у постачальника

s для цеху обробки r , вартість доставки g_{lr} для кожної одиниці сировини, що відправляється до роздрібною точки ℓ з цеху обробки r , та вартість виготовлення h_{lrp} на одиницю продукції p відповідно на цеху r [2].

Формулювання проблеми моделі з урахуванням додаткових чинників може призвести до складної проблеми MILP, з занадто великою кількістю змінних та обмежень [3]. Більшість сучасних ланцюгів поставок містять кілька рівнів з постачальниками постачальників, клієнтами клієнтів та ієрархіями постачальників послуг. Це призводить до створення надзвичайно складних глобальних мереж, де рішення повинні бути оптимізовані на кількох рівнях для задоволення запитів клієнтів при одночасному забезпеченні операційної ефективності. Складність процесу прийняття рішень часто вимагає розробки методів оптимізації, які можуть враховувати безліч обмежень і цілей і при цьому генерувати якісні рішення в прийнятні терміни.

Точні методи розв'язання задач MILP стосуються детермінованих алгоритмів, які ітеративно сходяться до рішення, що задовольняє певні умови оптимальності. Ці алгоритми продемонстрували успішне застосування в різних задачах інженерного проектування. Однак, основним недоліком точних методів MINLP є те, що вартість обчислень надмірно зростає, коли комбінаторний простір великий. Це може призвести до «комбінаторного вибуху» зі збільшенням розміру проблеми; таким чином, за допомогою такого підходу можна розв'язати лише невеликі комбінаторні простори. Отже, хоча існують точні методи розв'язання задач змішаної цілочисельної оптимізації, вони не завжди можуть бути застосовані. Як результат, метаевристики та інші методи апроксимації набувають популярності.

На відміну від точних методів, наближені методи дозволяють вирішувати проблеми великого розміру, надаючи задовільні рішення за розумний час. Однак незрозуміло, яка метаевристика забезпечує найкращу продуктивність [4].

Останнім часом увагу дослідників привертають методи, основані на глибокому навчанні та застосуванні штучного інтелекту. Новим підходом до вирішення оптимізаційних задач є «навчання для оптимізації» (Learning to optimize, L2O). Оскільки реальні задачі оптимізації часто мають спільні структури, L2O надає інструмент для використання цих структур для кращих або швидших рішень. L2O – це нова галузь, де традиційні методи оптимізації вдосконалюються або навіть замінюються моделями машинного навчання, що навчаються на даних. Замість того, щоб покладатися виключно на вручну розроблені алгоритми, L2O використовує підходи, керовані даними для розробки стратегій оптимізації [5].

Підхід L2O, запроваджений для подолання розриву між класичними методами оптимізації та підходами глибокого навчання, поєднує переваги обох областей. Розгортаючи ітеративний алгоритм оптимізації в нейронну мережу фіксованої глибини, його можна навчити вирішувати певний розподіл задач оптимізації, часто досягаючи значного прискорення порівняно з оригінальним алгоритмом для подібних задач. Ця здатність до навчання дозволяє розгорнутому алгоритму адаптуватися до класу задачі та вивчати оптимальні параметри для швидшої конвергенції.

Водночас, розгортання алгоритмів успадковує математичні структури та знання предметної області, вбудовані в класичні методи оптимізації, розроблені експертами. Ці успадковані знання діють як сильна регуляризація для нейронних мереж, обмежуючи простір пошуку та керуючи процесом навчання. Отже, розгорнуті алгоритми можна навчати ефективніше, вимагаючи менше навчальних вибірок порівняно зі звичайними глибокими нейронними мережами. Застосування методів L2O починається з навчання моделі машинного навчання, потім застосовується до моделі для прогнозування майбутніх даних і, нарешті, оптимізує рішення на основі цих прогнозів. Типові приклади включають прогнозування часу подорожі для оптимізації маршруту, прогнозування продажів для оптимізації запасів та прогнозування прибутковості оптимізації інвестиційного портфеля.

Інтеграція машинного навчання та методів оптимізації перебуває на стадії дослідження. На даний момент методи L2O непридатні для комерційного застосування.

В роботі [2] запропоновано підхід, оснований на застосуванні великих мовних моделей (Large language model, LLM) до задач оптимізації ланцюга поставок. Використання LLM у

даному контексті є складним завданням. Основні проблеми оптимізації часто є великомасштабними комбінаторними задачами оптимізації, і їх безпосереднє вирішення наразі недоступне для LLM. Замість цього LLM забезпечує генерування коду для оптимізаційного розв'язувача а також для пояснення відповіді. Цей підхід продемонстрував великий потенціал в аналізі сценаріїв «what-if», які потребують ітеративної модифікації вхідних даних та багаторазового моделювання.

Однак модель дуже вимоглива до точності та конкретності користувацьких запитань. Неоднозначність у формулюванні питання може призвести до генерації некоректного кода. Модель залежна від даних і може генерувати неточні рішення для нових задач. Крім того, адаптація системи до інших задач потребує значних інженерних зусиль. Також модель може «галюцинувати», генеруючи працездатний, але некоректний код. Тому застосування такого підходу потребує додаткової верифікації отриманих рішень.

Управління великомасштабними ланцюжками поставок включає безліч функцій, таких як збір даних, їх обробка та аналіз, процеси оптимізації, а також обмін інформацією та забезпечення виконання рішень між численними зацікавленими сторонами. Хоча системи керування ланцюжками постачання та допоміжні інструменти можуть виконувати частину цих функцій, необхідна комплексна структура, яка дозволить систематично вирішувати основні проблеми. Методи штучного інтелекту мають великий потенціал на багатьох етапах керування логістичними системами.

Висновок. Традиційні методи оптимізації логістичних процесів мають істотні обмеження, пов'язані зі збором даних та обміном інформацією, обчислювальною складністю оптимізаційних алгоритмів, спільною оптимізацією за багатьма критеріями. Вони погано адаптуються до динамічного зовнішнього середовища. Застосування штучного інтелекту забезпечує значну гнучкість у прийнятті рішень, аналізі динамічних сценаріїв застосування, узагальненні накопиченого досвіду до нових задач. Однак їх дослідження та застосування для багатьох практичних сценаріїв перебуває на початковій стадії і поки не готово до комерційного застосування системами. Інтеграція традиційних оптимізації, методів аналізу даних та глибокого навчання потребує поглиблених досліджень.

Список використаних джерел.

1. Y. Liu, X. Tao, X. Li, A. W. Colombo and S. Hu, "Artificial Intelligence in Smart Logistics Cyber-Physical Systems: State-of-The-Arts and Potential Applications," in IEEE Transactions on Industrial Cyber-Physical Systems, vol. 1, pp. 1-20, 2023, doi: 10.1109/TICPS.2023.3283230.
2. Beibin Li , Konstantina Mellou , Bo Zhang , Jeevan Pathuri , and Ishai Menache "Large Language Models for Supply Chain Optimization," arXiv:2307.03875v2, 2023. <https://arxiv.org/pdf/2307.03875>
3. Berbiche, Nawfal, Mouna Chakir, Mustapha Hlyal, and Jamila El Alami. "An Integrated Inventory-Production-Distribution Model for Crisis Relief Supply Chain Optimization: A Systematic Review and Mixed Integer Programming Formulation." Journal Européen des Systèmes Automatisés 57, no. 3 (2024). <https://pdfs.semanticscholar.org/ce1b/6ab29e6cb97921d7c1141f1ba0af1bebf7c2.pdf>
4. Jaber, Ahmed, Rafic Younes, Pascal Lafon, and Jihan Khoder. 2024. "A Review on Multi-Objective Mixed-Integer Non-Linear Optimization Programming Methods" Eng 5, no. 3: pp 1961-1979. <https://doi.org/10.3390/eng5030104>
5. Chen, Xiaohan, Jialin Liu, and Wotao Yin. "Learning to optimize: A tutorial for continuous and mixed-integer optimization." arXiv preprint arXiv:2405.15251, 2024. <https://arxiv.org/pdf/2405.15251?>

РОЗРОБКА МОДЕЛІ УПРАВЛІННЯ ЛОГІСТИЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ ВИРОБНИЧОГО ПІДПРИЄМСТВА

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Україна

На сьогодні підприємства України працюють в надто несприятливих умовах і стикаються з рядом проблем, пов'язаних з руйнуванням інфраструктури, нестабільністю попиту, проблемами в постачанні сировини та розподіленні готової продукції, фінансовими труднощами тощо [1, 2]. Це викликає необхідність оперативного управління логістичними процесами постачання сировини, виробництва продукції, транспортування та збуту готової продукції. В свою чергу, це призводить до вирішення таких оптимізаційних логістичних задач на виробництві, як управління ланцюгом постачань та транспортними перевезеннями, вибір постачальників, оптимальне використання обладнання та ресурсів. Для вирішення виділених задач використовують інноваційні підходи та новітні технології на основі штучного інтелекту, мультимодальні логістичні мережі, методи прогнозування та коригування основних логістичних процесів [3 – 5]. Але відсутні моделі системного подання параметрів зазначених процесів та задач, а також зовнішнього середовища.

Отже, розробка системної моделі управління логістичними процесами з урахуванням динаміки зміни їх параметрів в умовах воєнного часу є актуальною задачею. Системна модель показує взаємодію логістичних процесів та їх параметрів, що дозволяє застосовувати ефективні методи й алгоритми для їх розв'язання. Зв'язок параметрів логістичних процесів із параметрами зовнішнього середовища дозволяє оперативно враховувати динамічні зміни та застосовувати ймовірнісні методи для оцінки їх впливу на логістичні процеси підприємства.

Запропонована модель дозволить застосовувати методи штучного інтелекту, тобто різновиди нейронних мереж з різними видами навчання та їх комбінації для ефективного вирішення логістичних задач основних процесів підприємства та урахування змін параметрів зовнішнього середовища. Системна модель може бути корисною при прийнятті управлінських рішень для мінімізації негативного впливу динаміки навколишнього середовища та можливих збитків. В майбутньому вона також може бути застосована та розробці стратегій розвитку підприємства.

Список використаних джерел

1. Саблук Р.П., Денисенко А.А. Проблеми підприємництва в Україні під час воєнного стану. Економіка і управління. 2024. № 4. С. 48–53. DOI: <https://doi.org/10.36919/2312-7872.4.2024.48>.
2. Самодай В.П., Донський М.Л., Растова К.П. Проблеми сьогодення логістичної мережі України. Економіка та суспільство. 2024. № 60. С. 132–138. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-60-6>.
3. Tseller Vladyslav, Kramskyi Serhii. Economic optimization and strategic resilience of multimodal logistics networks in Ukraine: an economic analysis of the efficiency deficit in turbulence. Проблеми сьогодення логістичної мережі України. Економіка та суспільство. 2025. № 80. С. 245–251. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2025-80-102>.
4. Кузяк В.В. Управління логістичними процесами в Україні: проблеми та шляхи розв'язання в умовах воєнного стану. Економіка та суспільство. 2023. № 55. С. 132–138. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2023-55-13>.
5. Іванов Ю.В., Нагай Д.Р., Сохань Т.Д. Логістика в сучасних умовах розвитку економіки України. Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Економіка і управління. Том 36 (75). № 1, 2025. С. 72 – 77. DOI: <https://doi.org/10.32782/2523-4803/75-1-11>.

ІНТЕГРАЦІЯ ВИРОБНИЧОГО ТА СКЛАДСЬКОГО КОМПЛЕКСІВ У ЛОГІСТИЧНІЙ СИСТЕМІ МАШИНОБУДІВНОГО ПІДПРИЄМСТВА

Класичний приватний університет, м. Запоріжжя, Україна

Сучасне машинобудівне виробництво відзначається складною багатостадійною технологією обробки деталей, значною номенклатурою матеріальних ресурсів і високою капіталомісткістю обладнання, що зумовлює особливу роль виробничої та складської логістики у забезпеченні безперервності виробничого циклу. На відміну від підприємств з простим виробничим процесом, машинобудівне виробництво потребує узгодженого функціонування виробничого й складського комплексів як єдиної логістичної підсистеми: складські операції приймання, зберігання та відпуску матеріалів і напівфабрикатів безпосередньо вбудовані у технологічний маршрут виготовлення виробу, а не є допоміжною функцією, відокремленою від основного процесу. Це визначає актуальність дослідження питань інтеграції виробничого та складського комплексів саме в межах функціональних комплексів логістичної системи підприємства.

Питання побудови функціональних комплексів логістичної системи розкрито у працях Є. В. Крикавського, який обґрунтував системний підхід до логістики як науки про управління потоковими процесами [1]. Методологічні засади проектування логістичних систем підприємства, зокрема принципи узгодження виробничих і складських процесів, висвітлено у підручнику А. Г. Кальченка [2]. Особливості організації складського господарства як самостійного об'єкта логістичного управління докладно досліджено О. М. Тридідом та Ю. О. Леоною. Разом із тим у наявних дослідженнях виробничий і складський комплекси здебільшого розглядаються окремо один від одного, тоді як питання їх безпосередньої взаємної інтеграції саме в умовах машинобудівного виробництва з його багатостадійністю та широкою номенклатурою деталей залишається недостатньо розкритим.

Метою дослідження є обґрунтування підходів до інтеграції виробничого та складського комплексів у логістичній системі машинобудівного підприємства. Для досягнення поставленої мети визначено такі завдання: розкрити сутність виробничо-складської інтеграції як функціонального елемента логістичної системи; охарактеризувати форми взаємодії виробничого й складського комплексів; визначити чинники, що ускладнюють таку взаємодію в умовах машинобудування; сформулювати практичні напрями підвищення узгодженості цих комплексів.

Під інтеграцією виробничого та складського комплексів логістичної системи машинобудівного підприємства розуміють узгоджену організацію матеріальних та інформаційних потоків між технологічними дільницями підприємства й місцями зберігання матеріальних ресурсів, за якої складські операції підпорядковані ритму, послідовності та вимогам виробничого процесу, а не виконуються ізольовано від нього. На відміну від традиційної моделі, в якій склад функціонує як самостійний підрозділ із власним графіком роботи та власними критеріями ефективності, інтегрований підхід передбачає розгляд складських операцій як невід'ємної складової технологічного процесу виготовлення виробу. Це означає, що рішення щодо розміщення запасів, періодичності їх поповнення та маршрутів переміщення матеріалів приймаються не автономно складською службою, а узгоджено з виробничим підрозділом, виходячи з фактичної потреби конкретної технологічної операції, а не із зручності самого складу.

Практично інтеграція виробничого та складського комплексів виявляється у кількох взаємопов'язаних напрямках. По-перше, це створення проміжних і виробничих складів безпосередньо в цехах або на виробничих дільницях, що дозволяє скоротити відстань і час транспортування матеріалів до робочих місць та зменшити кількість проміжних перевантажень. По-друге, застосування адресного зберігання, синхронізованого з виробничим

графіком, коли місце розташування конкретної партії матеріалів визначається не довільно, а з урахуванням черговості її використання у виробничому процесі. По-третє, формування єдиного графіка постачання матеріалів на робочі місця відповідно до технологічного маршруту виготовлення виробу, що дозволяє уникнути як надлишкових запасів на окремих дільницях, так і простоїв обладнання через невчасне надходження комплектуючих. Окремим, і не менш важливим, напрямом є перегляд організаційної підпорядкованості складських підрозділів: закріплення відповідальності за забезпечення конкретної виробничої дільниці за окремим працівником або групою дозволяє оперативніше реагувати на зміну виробничих потреб і скорочує час узгодження рішень між складською та виробничою службами.

Ступінь інтеграції виробничого та складського комплексів може суттєво відрізнятися залежно від типу організації виробництва. За умов масового й великосерійного виробництва з усталеною номенклатурою деталей інтеграція здебільшого набуває планового характеру і реалізується через стабільні графіки постачання, розраховані на тривалий період. Натомість в умовах одиничного та дрібносерійного виробництва, типового для машинобудівних підприємств, що виконують індивідуальні замовлення, інтеграція має бути гнучкішою: графіки забезпечення матеріалами переглядаються під кожне нове замовлення, а адресне зберігання доповнюється можливістю оперативного перерозподілу запасів між дільницями відповідно до зміни пріоритетів виробництва.

Позитивний ефект від інтеграції виробничого та складського комплексів виявляється передусім у скороченні тривалості виробничого циклу за рахунок зменшення часу очікування матеріалів на робочих місцях, а також у зниженні рівня страхових запасів, які раніше формувалися складською службою «про всяк випадок» без урахування фактичного графіка виробництва. Крім того, наближення місць зберігання до робочих місць і синхронізація графіків постачання з виробничим розкладом дозволяють зменшити кількість внутрішньозаводських переміщень матеріалів, а отже — скоротити супутні транспортні витрати та ризик пошкодження деталей під час багаторазового перевантаження. Водночас перехід до інтегрованої моделі потребує перегляду усталеного розподілу функцій між складською та виробничою службами, що на практиці є не лише технічним, а й організаційним завданням і вимагає підтримки з боку керівництва підприємства.

Узагальнену характеристику основних форм інтеграції виробничого та складського комплексів машинобудівного підприємства наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Форми інтеграції виробничого та складського комплексів машинобудівного підприємства

№ з/п	Форма інтеграції	Зміст
1	Технологічна	Розміщення проміжних складів і буферних зон безпосередньо на виробничих дільницях відповідно до маршруту обробки деталей
2	Організаційна	Узгодження графіків роботи складу з виробничим розкладом, закріплення відповідальності за обслуговування конкретних дільниць
3	Інформаційна	Єдиний облік руху матеріалів між складом і виробництвом у режимі, наближеному до реального часу
4	Планова	Формування спільного графіка забезпечення матеріалами з урахуванням черговості виробничих операцій

Найбільш поширеною формою інтеграції на машинобудівних підприємствах є технологічна, за якої частину функцій центрального складу передають безпосередньо цеховим коморам і буферним зонам, розташованим на шляху проходження деталей. Це скорочує внутрішньозаводські переміщення матеріалів і зменшує час очікування комплектуючих на робочих місцях, проте потребує додаткового узгодження нормативів запасів на кожній дільниці, щоб уникнути надлишкового «розпорошення» матеріальних ресурсів між численними локальними точками зберігання.

Організаційна та планова форми інтеграції передбачають підпорядкування розкладу складських операцій виробничому графіку: терміни надходження матеріалів на робочі місця визначаються не окремо складською службою, а спільно з виробничим диспетчеруванням, з урахуванням послідовності технологічних операцій і завантаження обладнання. Особливого значення це набуває за умов серійного й одиничного виробництва, характерного для машинобудування, коли зміна номенклатури замовлення вимагає оперативного перегляду як виробничого розкладу, так і графіка складського забезпечення.

Інформаційна інтеграція забезпечується поєднанням систем класу WMS, що керують складськими операціями, із системами MES та ERP, які відповідають за диспетчеризацію виробництва й планування потреби в матеріалах. Наскрізний обмін даними про фактичні залишки на складі та хід виконання виробничих замовлень дозволяє уникнути як надлишкових страхових запасів, так і простоїв обладнання через невчасне постачання деталей, що особливо критично для машинобудівних підприємств із високою вартістю обладнання та тривалим виробничим циклом.

До основних чинників, що ускладнюють інтеграцію виробничого та складського комплексів на машинобудівних підприємствах, належать значна різноманітність деталей і вузлів, що потребує диференційованих умов зберігання; розгалуженість технологічних маршрутів, унаслідок чого одні й ті самі матеріали проходять через кілька проміжних складів; а також усталена організаційна відокремленість складської служби від виробничих підрозділів, яка ускладнює оперативне узгодження їхніх графіків роботи. Подолання цих обмежень потребує поетапного впровадження інтеграційних рішень: від перегляду розміщення проміжних складів і закріплення персональної відповідальності за постачання конкретних ділянок до впровадження єдиної інформаційної системи обліку матеріальних потоків.

З практичної точки зору впровадження інтегрованої моделі доцільно здійснювати поетапно. На першому етапі проводиться аналіз фактичних матеріальних потоків між складом і виробничими ділянками та виявляються найбільш проблемні точки — надлишкові переміщення, дублювання функцій обліку, невідповідність графіків роботи. На другому етапі переглядається розміщення проміжних складів і буферних зон з урахуванням реального маршруту обробки деталей, а не історично сформованої схеми. На третьому етапі впроваджується єдина інформаційна система обліку матеріальних потоків, яка об'єднує складські та виробничі дані в одному контурі управління. Лише після цього доцільно закріплювати персональну відповідальність працівників за забезпечення конкретних ділянок, оскільки без попереднього узгодження процесів і даних така відповідальність залишається формальною і не дає очікуваного ефекту.

Проведене дослідження засвідчило, що інтеграція виробничого та складського комплексів є самостійним і важливим напрямом підвищення ефективності логістичної системи машинобудівного підприємства. Технологічна, організаційна, планова та інформаційна форми інтеграції взаємно доповнюють одна одну і мають впроваджуватися узгоджено, з урахуванням особливостей номенклатури продукції та типу організації виробництва конкретного підприємства. Подальші дослідження доцільно спрямувати на розроблення методики кількісного оцінювання ефекту від інтеграції виробничого й складського комплексів для підприємств машинобудівної галузі.

Список використаних джерел

1. Крикавський Є. В. Логістика. Основи теорії : підручник. 2-ге вид., допов. і переробл. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2006. 456 с.
2. Кальченко А. Г. Логістика : підручник. Київ : КНЕУ, 2003. 284 с.

ФУНКЦІОНАЛЬНА ІНТЕГРАЦІЯ АВТОМОБІЛЬНОГО ТРАНСПОРТУ В ЛОГІСТИЧНУ СИСТЕМУ ВИРОБНИЧОГО ПІДПРИЄМСТВА

Філія Класичного приватного університету в м. Кременчук, Україна

Постановка проблеми. У сучасних умовах функціонування виробничих підприємств ефективність логістичної діяльності значною мірою визначається якістю організації транспортного забезпечення. Автомобільний транспорт виконує роль сполучної ланки між закупівельною, виробничою та розподільчою логістикою, забезпечуючи безперервність матеріальних потоків від постачальників сировини до кінцевого споживача готової продукції. Водночас на багатьох підприємствах транспортна складова досі розглядається як відокремлена допоміжна функція, слабо пов'язана з плануванням виробництва, управлінням запасами та складським господарством. Наслідками такого підходу є нераціональні маршрути перевезень, невідповідність графіків доставки виробничим потребам, зростання витрат на утримання парку транспортних засобів, надлишкові страхові запаси та втрата оперативності реагування на зміну попиту. У зв'язку з цим актуальності набуває дослідження функціональної інтеграції автомобільного транспорту в загальну логістичну систему підприємства як цілісного механізму управління, що охоплює організаційний, інформаційний, технологічний та економічний рівні узгодження.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання інтеграції транспортної складової в логістичні системи підприємств активно розглядаються в сучасній науковій літературі. Використання підходів корпоративної архітектури (Enterprise Architecture) розглядається як інструмент подолання розрізненості транспортних і логістичних операцій, підвищення операційної ефективності та скорочення часу виконання замовлень [1]. У межах концепції Логістики 4.0 системи управління автопарком дедалі частіше проєктуються як розподілені архітектури реального часу, здатні синхронізувати рух транспортних засобів із виробничими та складськими процесами [2]. Окремий напрям досліджень присвячено адаптивним підходам до управління економічною безпекою об'єднаних транспортно-логістичних систем, що дозволяє враховувати ризики порушення інтеграційних зв'язків [3]. Особливості формування корпоративної архітектури саме транспортних підприємств, зокрема питання управління персоналом у процесі такої інтеграції, висвітлено в [4]. Важливу роль у сучасних дослідженнях відіграє аналіз можливостей інтернету речей і кіберфізичних систем, які забезпечують поєднання людини-оператора з цифровими системами управління логістикою та транспортом у режимі реального часу [5]. Ширший контекст інтеграційних процесів розглядається також через призму циркулярної економіки, яка вимагає узгодження прямих і зворотних матеріальних потоків, включно з транспортною складовою [6]. Дослідники звертають увагу на потребу поєднання академічних напрацювань з практикою управління логістикою та ланцюгами постачання [7], а галузеві дослідження демонструють, як гнучка корпоративна архітектура підвищує адаптивність підприємств автомобільної промисловості [8]. Питання інформаційного забезпечення процесів зворотної логістики, що також потребують транспортної координації, розглянуто в [9].

Невирішені частини загальної проблеми. Попри значний масив публікацій, недостатньо опрацьованими залишаються методичні підходи саме до функціональної, а не лише інформаційно-технологічної інтеграції автомобільного транспорту як операційної підсистеми в загальну логістичну систему виробничого підприємства. Потребують уточнення критерії та показники оцінювання рівня такої інтеграції, механізми узгодження транспортного обслуговування з планами виробництва в умовах коливань попиту, а також бар'єри

стандартизації обміну даними між системами управління транспортом, складом і ресурсами підприємства, що особливо актуально для підприємств середнього розміру з власним автопарком.

Мета дослідження. Метою дослідження є аналіз функціональної інтеграції автомобільного транспорту в логістичну систему виробничого підприємства як механізму управління, визначення основних рівнів і напрямів такої інтеграції та формування рекомендацій щодо підвищення її ефективності.

Основний матеріал дослідження. Функціональна інтеграція автомобільного транспорту в логістичну систему підприємства передбачає узгоджену взаємодію транспортної підсистеми з підсистемами постачання, виробництва, складування та збуту в межах єдиного управлінського контуру. Доцільно виокремити кілька рівнів такої інтеграції.

Організаційний рівень передбачає об'єднання транспортного, складського та виробничо-диспетчерського підрозділів у межах єдиної логістичної служби з чіткими процедурами взаємодії та розподілу відповідальності. Формування гнучкої корпоративної архітектури дозволяє долати розрізненість підрозділів і забезпечувати наскрізну координацію операцій, зокрема й у транспортних та автомобілебудівних підприємствах [8].

Інформаційний рівень інтеграції базується на об'єднанні систем управління транспортом (TMS) із системами планування ресурсів підприємства (ERP) та управління складом (WMS) в єдиний інформаційний контур. Практика показує, що розподілені архітектури реального часу дозволяють синхронізувати дані про місцезнаходження транспортних засобів, стан замовлень і завантаженість складу [2]. Застосування технологій інтернету речей, телематики та кіберфізичних систем розширює можливості моніторингу транспортних операцій, забезпечуючи оперативний зворотний зв'язок між водієм, диспетчером і виробничими підрозділами [5].

Технологічний рівень інтеграції пов'язаний з узгодженням маршрутів і графіків перевезень із циклами виробництва та поставок, впровадженням систем динамічного планування маршрутів, а також уніфікацією процедур завантаження-розвантаження на межі транспортної та складської підсистем. Рациональна побудова маршрутної мережі дозволяє скоротити холості пробіги транспортних засобів і узгодити час подачі транспорту з ритмом випуску продукції.

Економічний рівень передбачає формування спільної системи показників (KPI), що пов'язує витрати на транспорт із загальними логістичними витратами підприємства, а також врахування ризиків економічної безпеки об'єднаної транспортно-логістичної системи під час прийняття управлінських рішень [3]. Особливості кадрового забезпечення транспортних підрозділів в умовах інтеграції також потребують окремої уваги, оскільки кваліфікація персоналу безпосередньо впливає на якість взаємодії між транспортною та іншими логістичними підсистемами [4].

Стратегічний рівень інтеграції реалізується через застосування підходів корпоративної архітектури, які дозволяють розглядати транспорт не як відокремлену функцію, а як складову загальної бізнес-моделі підприємства, узгоджену з цілями операційної ефективності та обслуговування клієнтів [1].

Окремої уваги заслуговує інтеграція транспорту в умовах циркулярної економіки, коли підприємству доводиться організовувати не лише прямі, а й зворотні матеріальні потоки -- повернення тари, переробку відходів виробництва, гарантійне обслуговування [6]. Функціонування зворотної логістики вимагає відповідного інформаційного забезпечення та координації транспортних маршрутів із процесами повернення продукції [9]. Поєднання академічних досліджень з практичними потребами підприємств є важливою умовою розроблення дієвих моделей такої інтеграції [7].

Практична реалізація функціональної інтеграції автомобільного транспорту в логістичну систему підприємства передбачає поетапне впровадження єдиної інформаційної платформи для транспортного, складського та виробничого підрозділів, розроблення спільних показників ефективності, поступову діджиталізацію автопарку засобами телематики та формування

організаційної структури, що забезпечує наскрізну координацію логістичних процесів. Такий підхід дає змогу перетворити транспорт із витратного допоміжного підрозділу на керовану підсистему, яка активно впливає на загальну ефективність логістичної діяльності підприємства.

Висновки та рекомендації. Проведений аналіз показує, що функціональна інтеграція автомобільного транспорту в логістичну систему виробничого підприємства є багаторівневим процесом, який охоплює організаційну, інформаційну, технологічну, економічну та стратегічну складові. Найбільш дієвим методологічним інструментом такої інтеграції є підходи корпоративної архітектури, які дозволяють узгодити транспортні операції із загальними бізнес-процесами підприємства [1; 8]. Ключовим фактором підвищення рівня інтеграції є цифровізація транспортних процесів на основі систем управління транспортом, телематики та технологій інтернету речей, що забезпечують синхронізацію транспортної підсистеми з виробництвом і складським господарством у режимі реального часу [2; 5]. Важливим напрямом подальших досліджень є розроблення кількісних моделей оцінювання рівня функціональної інтеграції транспорту в логістичну систему підприємства з урахуванням економічної безпеки такої системи [3] та адаптація напрацьованих підходів до умов вітчизняних виробничих підприємств, зокрема тих, що мають власний автомобільний парк і потребують узгодження прямих і зворотних матеріальних потоків [6; 9].

Список використаних джерел

1. Wedha B.Y. Optimizing Transportation Logistics through Enterprise Architecture: A Case Study of Integrated Management Systems. *Journal of Computer Networks, Architecture and High Performance Computing*. 2023. Vol. 5, No. 2. P. 693–702. DOI: 10.47709/cnahpc.v5i2.2779.
2. Dintén R., García S., Zorrilla M. Fleet management systems in Logistics 4.0 era: a real time distributed and scalable architectural proposal. *Procedia Computer Science*. 2023. Vol. 217. P. 806–815. DOI: 10.1016/j.procs.2022.12.277.
3. Ermoshin N., Romanchikov S., Denisov A. Adaptive approach to economic security management of transport and logistics systems. *Transportation Research Procedia*. 2022. Vol. 63. P. 195–202. DOI: 10.1016/j.trpro.2022.06.005.
4. Petrov I., Malysheva N., Lukmanova I., Panfilova E. Transport enterprise architecture and features of its personnel management. *Transportation Research Procedia*. 2022. Vol. 63. P. 1462–1472. DOI: 10.1016/j.trpro.2022.06.157.
5. Tsang Y.P., Yang T., Chen Z.S., Wu C.H., Tan K.H. How is extended reality bridging human and cyber-physical systems in the IoT-empowered logistics and supply chain management? *Internet of Things*. 2022. Vol. 20. Art. 100623. DOI: 10.1016/j.iot.2022.100623.
6. Zhang A., Hartley J., Wang Y., Wang S. Special issue Editorial: Logistics and supply chain management in an era of circular economy. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2022. Vol. 166. Art. 102911. DOI: 10.1016/j.tre.2022.102911.
7. Sandberg E., Oghazi P., Chirumalla K., Patel P.C. Interactive research framework in logistics and supply chain management: Bridging the academic research and practitioner gap. *Technological Forecasting and Social Change*. 2022. Vol. 178. Art. 121563. DOI: 10.1016/j.techfore.2022.121563.
8. Gonçalves D., Ferreira L., Campos N. Enterprise architecture for high flexible and agile company in automotive industry. *Procedia Computer Science*. 2021. Vol. 181. P. 1077–1082. DOI: 10.1016/j.procs.2021.01.303.
9. Starostka-Patyk M. The use of information systems to support the management of reverse logistics processes. *Procedia Computer Science*. 2021. Vol. 192. P. 2586–2595. DOI: 10.1016/j.procs.2021.09.028.

СТРАТЕГІЇ УПРАВЛІННЯ ЛОГІСТИЧНИМИ КОМПЛЕКСАМИ МАШИНОБУДІВНОГО ПІДПРИЄМСТВА

Класичний приватний університет м. Запоріжжя, Україна

Сучасні умови мінливого зовнішнього середовища, посилення конкуренції на ринках машинобудівної продукції та зростання вимог до швидкості й точності виконання замовлень зумовлюють необхідність переходу від оперативного управління окремими логістичними операціями до стратегічного управління цілісними логістичними комплексами машинобудівного підприємства. Формування обґрунтованої стратегії управління такими комплексами дозволяє підприємству не лише своєчасно реагувати на поточні зміни, а й завчасно готуватися до довгострокових трансформацій ринкового середовища, підвищуючи стійкість виробничо-логістичної системи в цілому.

Актуальність стратегічного підходу до управління логістичними комплексами машинобудівного підприємства зумовлена також зростанням складності ланцюгів постачання, залученням значної кількості зовнішніх контрагентів та посиленням вимог споживачів до термінів і надійності поставок готової продукції. За таких умов управлінські рішення, що приймаються без урахування довгострокової перспективи розвитку логістичних комплексів, здатні забезпечити лише короткострокову економію ресурсів, натомість стратегічно обґрунтовані рішення створюють підґрунтя для стійкого розвитку підприємства протягом тривалого періоду.

Під логістичним комплексом машинобудівного підприємства розуміють сукупність взаємопов'язаних підрозділів і процесів, що забезпечують рух матеріальних, інформаційних та фінансових потоків від постачальників сировини до кінцевого споживача готової продукції. Стратегія управління логістичним комплексом визначає довгостроковий напрям розвитку цієї сукупності підрозділів, узгоджений із загальною стратегією підприємства, та передбачає вибір пріоритетів розвитку постачальницької, виробничої, складської, транспортної і збутової складових [1].

У теорії стратегічного управління виокремлюють кілька базових типів стратегій управління логістичними комплексами. Стратегія лідерства за витратами спрямована на мінімізацію сукупних логістичних витрат за рахунок оптимізації маршрутів перевезень, укрупнення партій постачання та раціонального розміщення складських потужностей. Стратегія диференціації передбачає підвищення рівня логістичного обслуговування споживачів – скорочення термінів виконання замовлень, розширення асортименту супутніх послуг, індивідуалізацію умов постачання. Стратегія фокусування орієнтує логістичний комплекс на обслуговування вузького сегмента ринку з особливими вимогами до якості чи термінів постачання, що характерно для машинобудівних підприємств, які виготовляють спеціалізоване обладнання на замовлення.

Вибір конкретного типу стратегії управління логістичним комплексом залежить від становища підприємства на ринку, характеру конкуренції в галузі та особливостей продукції, що виготовляється. Для великих машинобудівних підприємств із масовим чи великосерійним виробництвом типової продукції стратегія лідерства за витратами часто виявляється найдоцільнішою, оскільки дозволяє утримувати конкурентні позиції за рахунок цінового чинника. Натомість підприємства, що спеціалізуються на виготовленні унікального або високотехнологічного обладнання, частіше обирають стратегію диференціації чи фокусування, орієнтуючись на якість логістичного обслуговування та індивідуальний підхід до кожного замовлення, а не на мінімізацію витрат.

Формування стратегії управління логістичним комплексом машинобудівного підприємства здійснюється поетапно. На першому етапі проводиться стратегічний аналіз

зовнішнього і внутрішнього середовища підприємства, зокрема оцінювання конкурентних позицій, ринкових тенденцій та наявного стану логістичної інфраструктури [2]. На другому етапі визначаються стратегічні цілі розвитку логістичного комплексу, узгоджені із загальнокорпоративною стратегією підприємства. Третій етап передбачає розроблення альтернативних варіантів стратегії та вибір найдоцільнішого з них з урахуванням ресурсних обмежень підприємства. Завершальний етап охоплює реалізацію обраної стратегії та контроль досягнення встановлених стратегічних показників.

На етапі стратегічного аналізу доцільно застосовувати традиційні інструменти стратегічного менеджменту, адаптовані до специфіки логістичних комплексів. SWOT-аналіз дозволяє системно виявити сильні й слабкі сторони наявної логістичної інфраструктури підприємства, а також можливості та загрози, пов'язані зі зміною кон'юнктури ринку матеріалів і комплектувальних виробів. Побудова матриці можливостей і загроз для кожного функціонального комплексу окремо – постачання, виробництва, складування, транспортування та збуту – дає змогу точніше визначити пріоритетні напрями стратегічних змін і уникнути надмірного узагальнення під час формування загальної стратегії підприємства.

Специфіка машинобудівного виробництва накладає особливі вимоги на формування стратегії управління логістичними комплексами. Значна капіталомісткість основних фондів і тривалий виробничий цикл обумовлюють необхідність довгострокового горизонту стратегічного планування логістичних процесів, оскільки зміна параметрів одного комплексу – наприклад, реорганізація складського господарства – потребує суттєвих інвестицій і часу на впровадження. Багатономенклатурність продукції та широка кооперація із зовнішніми постачальниками комплектувальних виробів підвищують роль стратегій інтеграції, спрямованих на побудову довгострокових партнерських відносин із ключовими постачальниками та логістичними посередниками.

Додатковим чинником, який слід урахувати під час формування стратегії управління логістичними комплексами машинобудівного підприємства, є циклічність попиту на продукцію важкого й енергетичного машинобудування, пов'язана із загальногосподарською кон'юктурою та інвестиційною активністю галузей-споживачів. У періоди зростання попиту стратегічним пріоритетом стає нарощування пропускної спроможності виробничого й транспортного комплексів, тоді як у періоди спаду доцільнішою є стратегія підвищення гнучкості та скорочення постійних логістичних витрат. Урахування цієї циклічності під час стратегічного планування дозволяє підприємству уникати як дефіциту логістичних потужностей у фазі підйому, так і надлишкових витрат на їх утримання у фазі спаду.

Стратегії вертикальної інтеграції логістичних комплексів набувають особливого значення для машинобудівних підприємств із розгалуженою мережею кооперації. Пряма інтеграція передбачає посилення контролю над збутовими каналами й післяпродажним обслуговуванням, тоді як зворотна інтеграція орієнтована на встановлення довгострокових відносин із ключовими постачальниками сировини та комплектувальних виробів, що дозволяє знизити ризики перебоїв постачання і підвищити передбачуваність виробничого процесу. Поряд з інтеграційними стратегіями дедалі більшого поширення набувають стратегії аутсорсингу окремих логістичних функцій, зокрема передання транспортних перевезень і складського зберігання спеціалізованим логістичним операторам, що дозволяє підприємству зосередити ресурси на основній виробничій діяльності.

Окремим напрямом сучасної стратегії управління логістичними комплексами машинобудівного підприємства є стратегія цифрової трансформації, що передбачає поетапне впровадження технологій автоматизованого обліку запасів, систем підтримки прийняття рішень і засобів дистанційного моніторингу транспортних перевезень. Цифровізація логістичних комплексів дозволяє підвищити прозорість руху матеріальних потоків між постачальницьким, виробничим, складським і збутовим комплексами, скоротити час на узгодження управлінських рішень та своєчасно виявляти відхилення від запланованих показників. Водночас реалізація такої стратегії потребує узгодження з наявним рівнем технологічної готовності підприємства та кваліфікацією персоналу логістичних підрозділів.

Ефективність реалізованої стратегії управління логістичним комплексом доцільно оцінювати за системою збалансованих показників, що охоплюють фінансову, клієнтську, процесну складові та складову розвитку персоналу [3]. До фінансових показників належать рівень логістичних витрат у структурі собівартості продукції та рентабельність логістичних операцій. Клієнтська складова відображає рівень задоволеності споживачів термінами й якістю виконання замовлень. Процесні показники характеризують тривалість логістичного циклу та ритмічність роботи виробничого комплексу, а показники розвитку персоналу – рівень кваліфікації працівників логістичних підрозділів та їхню готовність до впровадження нових технологічних і управлінських рішень.

Періодичний перегляд обраної стратегії управління логістичними комплексами доцільно здійснювати на основі порівняння фактичних значень збалансованих показників із запланованими стратегічними орієнтирами. Суттєве й стійке відхилення фактичних показників від планових слугує сигналом для перегляду стратегії – або її часткового коригування в межах обраного стратегічного напрямку, або переходу до принципово іншого типу стратегії управління логістичним комплексом. Такий цикл стратегічного контролю дозволяє підприємству підтримувати відповідність логістичної стратегії реальним умовам функціонування, уникаючи як надмірного консерватизму в управлінні, так і невинновиправдано частих стратегічних змін, що дестабілізують роботу логістичних комплексів.

Реалізація стратегії управління логістичними комплексами машинобудівного підприємства супроводжується низкою стратегічних ризиків, які доцільно враховувати на етапі планування. До них належать ризик неузгодженості стратегії логістичного комплексу із загальнокорпоративною стратегією підприємства, ризик недостатньої гнучкості обраної стратегії в умовах різкої зміни ринкового попиту, а також ризик надмірної залежності від обмеженого кола постачальників чи логістичних партнерів у разі надмірної орієнтації на інтеграційні стратегії. Мінімізації цих ризиків сприяє періодичний перегляд стратегічних пріоритетів логістичного комплексу відповідно до змін зовнішнього середовища та регулярний моніторинг ключових показників його функціонування.

Важливою умовою успішної реалізації обраної стратегії є відповідність організаційної структури управління логістичними комплексами її змісту. Централізована модель управління, за якої стратегічні рішення щодо всіх функціональних комплексів приймаються єдиним логістичним підрозділом, забезпечує високий рівень узгодженості дій, але може знижувати оперативність реагування на локальні зміни в окремих цехах чи дільницях машинобудівного підприємства. Децентралізована модель, навпаки, підвищує гнучкість управління на рівні окремих комплексів, проте потребує розвинених механізмів координації для запобігання суперечностям між стратегічними пріоритетами суміжних підрозділів. Вибір моделі управління доцільно узгоджувати з масштабом підприємства та рівнем складності його виробничо-логістичної структури.

Практика впровадження стратегій управління логістичними комплексами на машинобудівних підприємствах свідчить про доцільність поєднання елементів різних базових стратегій залежно від особливостей окремого функціонального комплексу. Так, стратегія лідерства за витратами може застосовуватися до комплексу складування типової сировини, тоді як щодо комплексу постачання унікальних комплектувальних виробів доцільніша стратегія тісної інтеграції з постачальником. Така диференційована стратегічна модель дозволяє підприємству одночасно утримувати конкурентні переваги за витратами на масових позиціях номенклатури та забезпечувати необхідний рівень надійності постачання за критично важливими комплектувальними виробами.

Успішність реалізації стратегії управління логістичними комплексами значною мірою залежить від кадрового забезпечення та рівня управлінської культури підприємства. Формування у працівників логістичних підрозділів стратегічного мислення, здатності бачити зв'язок між локальними операційними рішеннями та довгостроковими цілями підприємства є не менш важливою умовою успіху стратегії, ніж технологічна модернізація складської чи транспортної інфраструктури. Тому програми підвищення кваліфікації персоналу, орієнтовані

на засвоєння сучасних підходів стратегічного й логістичного менеджменту, доцільно розглядати як невід'ємну складову загальної стратегії розвитку логістичних комплексів машинобудівного підприємства.

Таким чином, стратегічне управління логістичними комплексами є важливою умовою забезпечення довгострокової конкурентоспроможності машинобудівного підприємства. Обґрунтований вибір стратегії – лідерства за витратами, диференціації, фокусування чи інтеграції – з урахуванням специфіки виробництва дозволяє підвищити ефективність постачальницького, виробничого, складського, транспортного та збутового комплексів у їх взаємодії. Подальші дослідження доцільно спрямувати на розроблення методичного інструментарію оцінювання ефективності стратегій управління логістичними комплексами в умовах цифрової трансформації машинобудівного виробництва.

Список використаних джерел

1. Крикавський Є. В. Логістика. Основи теорії : підручник. 2-ге вид., допов. і переробл. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2006. 456 с.
2. Шершньова З. Є. Стратегічне управління : підручник. 2-ге вид., переробл. і допов. Київ : КНЕУ, 2004. 699 с.
3. Окландер М. А. Логістика : підручник. Київ : Центр учбової літератури, 2008. 346 с.

Федорович О.Є., д.т.н., професор
o.fedorovych@khai.edu
Губка О.С., к.т.н., доцент
gaspost79@gmail.com
Малєєва Ю.А., к.т.н., доцент
kafius@ukr.net

МОДЕЛЮВАННЯ ПОСТАЧАННЯ КОМПЛЕКТУЮЧИХ В РІЗНОРІДНОМУ ТРАНСПОРТНОМУ СЕРЕДОВИЩІ

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Україна

Постановка проблеми. Високотехнологічне масоване та масштабоване виробництво сучасної техніки (БПЛА) потребує своєчасного постачання потрібної множини комплектуючих [1]. Виробники комплектуючих можуть знаходитись на великій відстані від виробників БПЛА. Це призводить до використання довгих логістичних ланцюгів постачання в різnorідному транспортному середовищі (автомобільний, залізничний, морський та інші види транспорту). Логістичні транспортні компоненти, які використовуються в перевезеннях, мають вузькі місця, вразливості та можливі впливи від загроз. Тому, формування раціональних маршрутів постачання комплектуючих потребує врахування ризиків логістичних компонент. Таким чином, можна стверджувати про **актуальність** теми доповіді, в якій представлені результати дослідження постачання комплектуючих в довгих логістичних ланцюгах.

Метою дослідження є створення моделей та алгоритмів для пошуку раціональних маршрутів постачання комплектуючих, для виробництва БПЛА, в довгих логістичних ланцюгах різnorідного транспортного середовища. Проведено аналіз існуючих публікацій за даною темою дослідження та виявлено недоліки, які пов'язані з вирішенням часткових завдань, з відсутності динамічного аналізу руху комплектуючих, в умовах впливу загроз [2].

Постановка задач: проаналізувати труднощі, які виникають при постачанні комплектуючих в довгих ланцюгах транспортних перевезень; створити алгоритм маршрутизації вантажів, в умовах вузьких місць та вразливостей; розробити імітаційну модель для дослідження та пошуку раціональних маршрутів перевезень, в умовах впливу загроз. Проведено аналіз щодо множини перешкод, які виникають в логістиці постачання, в різnorідному транспортному середовищі (застарілі компоненти, критичні компоненти, вплив загроз). Проведено обґрунтування та вибір підмножини логістичних компонент для проведення превентивних заходів щодо підвищення логістики перевезень, в умовах обмежених можливостей. Створено алгоритм агентного моделювання руху комплектуючих та виникнення вразливостей, прояви вузьких місць та впливу загроз. Розроблена імітаційна модель щодо дослідження, у часі, маршрутів перевезень, з урахуванням перевалок з однієї транспортної магістралі на іншу та ризиків появи перешкод.

Висновки. Запропонований підхід спрямований на дослідження постачання комплектуючих, з урахуванням різnorідного транспортного середовища та довгих логістичних ланцюгів, для формування раціональних маршрутів руху вантажів щодо забезпечення масованого, масштабованого виробництва БПЛА, в умовах обмеженості ресурсів та логістичних ризиків.

Список використаних джерел.

1. Федорович, О., Прончаков, Ю., Рибка, К., & Лещенко, Ю. Вибір постачальників для виробництва високотехнологічної продукції з урахуванням довгих логістичних ланцюгів постачання вантажів. Авіаційно-космічна техніка і технологія, 2021, (5), 75-81.
2. Pecina, M. Application of the new NATO logistics system [Text] / M. Pecina, J. Husak // Land Forces Academy Review. – 2018. – Vol. 23, No. 2. – P. 121-127. DOI: 10.2478/raft-2018-0014.

Федорович О.Є., д.т.н., професор
o.fedorovych@khai.edu

Коновалова О.В., ст. викладач
kafius@ukr.net

Пісклова Т.С., м.н.с.
kafius@ukr.net

МОДЕЛЮВАННЯ ВУЗЬКИХ МІСЦЬ ЛОГІСТИКИ ПОСТАЧАННЯ ВИРОБНИЦТВА ВИСОКОТЕХНОЛОГІЧНОЇ ПРОДУКЦІЇ

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Україна

Постановка проблеми. Сучасне виробництво високотехнологічної продукції (БПЛА) потребує налагодження постачання комплектуючих від різних виробників, у тому числі, які знаходяться за кордоном [1]. Використання, для постачання комплектуючих мультимодальних перевезень, у різноманітному транспортному середовищі, призводить до появи вузьких місць, в яких накопичуються вантажі. Звідси виникає, **актуальність** теми дослідження, результати якого представлені у доповіді. Виникає необхідність в науковому обґрунтуванні дій щодо мінімізації вузьких місць в русі комплектуючих до основного виробництва БПЛА.

В існуючих публікаціях ця проблема розглядається частково без динамічного аналізу потоків комплектуючих в різноманітному транспортному середовищі. Тому було проведено комплексне дослідження вузьких місць, з метою планування превентивних заходів щодо зменшення їх впливу на час постачання [2].

Метою проведеного дослідження є створення комплексу логічно пов'язаних моделей, які дозволяють аналізувати вплив вузьких місць на логістику постачання комплектуючих, а також обґрунтувати превентивні заходи щодо їх зменшення.

Постановка задач: провести динамічний аналіз руху комплектуючих в різноманітному транспортному середовищі; виявити множину вузьких місць, які впливають на появу черг у логістичних компонент, що використовуються для перевезень; оптимізувати превентивні заходи щодо мінімізації впливу вузьких місць на час постачання комплектуючих, в умовах обмежених ресурсів. Створена агентна імітаційна модель аналізу, у часі, потоків комплектуючих в різноманітному транспортному середовищі (автомобільний, залізничний, морський та інші види транспорту). Виявлена поява черг при обслуговуванні вантажів в логістичних компонентах постачання. Розмір черг вказує на рівень впливу вузького місця (час) на логістику постачання. Розглянуто два напрямки для мінімізації впливу вузьких місць: підвищення продуктивності логістичної компоненти, формування нового маршруту постачання в обхід вузького місця. Проведена багатокритеріальна оптимізація для множини вузьких місць, для яких використовуються обмежені ресурси щодо зменшення їх впливу.

Висновки. Запропонований підхід дозволяє обґрунтувати множину дій щодо зменшення впливу вузьких місць на логістику постачання комплектуючих для виробництва БПЛА. Це дозволяє створити раціональні маршрути постачання в різноманітному транспортному середовищі, з урахуванням часу, витрат та ризиків.

Список використаних джерел.

1. Федорович, О., Прончаков, Ю., Рибка, К., & Лещенко, Ю. Вибір постачальників для виробництва високотехнологічної продукції з урахуванням довгих логістичних ланцюгів постачання вантажів. Авіаційно-космічна техніка і технологія, 2021, (5), 75-81.
2. Pecina, M. Application of the new NATO logistics system [Text] / M. Pecina, J. Husak // Land Forces Academy Review. – 2018. – Vol. 23, No. 2. – P. 121-127. DOI: 10.2478/raft-2018-0014.

Федорович О.Є., д.т.н., професор
o.fedorovych@khai.edu
Малєєв Л.В., аспірант
kafius@ukr.net
Федорович В.А., аспірант
kafius@ukr.net

МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ ЗАГРОЗ НА ПОСТАЧАННЯ КОМПЛЕКТУЮЧИХ ДЛЯ ВИСОКОТЕХНОЛОГІЧНОГО ВИРОБНИЦТВА

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Україна

Постановка проблеми. Для забезпечення обороноздатності країни необхідно налагоджувати масоване, масштабоване виробництво сучасної військової техніки (БПЛА) [1]. Це потребує формування потрібної множини постачальників-виробників комплектуючих. Так, як більшість з них знаходиться в різних кутках світу, то виникають довгі ланцюги постачання в різноманітному транспортному середовищі, логістичні компоненти яких вразливі по відношенню до впливу загроз (політико-економічні, кліматичні, терористичні, військові, тощо). Тому, **актуальна** тема дослідження, результати якого представлені у доповіді. Виникає необхідність в науковому обґрунтуванні планів постачання комплектуючих для масованого виробництва БПЛА в умовах загроз. В існуючих публікаціях представлені часткові рішення щодо впливу загроз, відсутнє проведення імітаційного моделювання постачання комплектуючих, в умовах появи перешкод, які виникають в довгих ланцюгах постачання різноманітного транспортного середовища.

Метою проведеного дослідження є створення комплексу оптимізаційних та імітаційної моделей, за допомогою якого формуються вимоги до планування постачання комплектуючих, з використанням можливого впливу загроз [2].

Постановка задач: провести системний аналіз логістики постачання, в умовах впливу загроз; розробити модель щодо раціонального складу постачальників комплектуючих; створити модель щодо оптимізації запасів комплектуючих; провести імітаційне моделювання постачання комплектуючих, в умовах впливу загроз.

Створена модель щодо обґрунтування множини та складу постачальників-виробників комплектуючих, з урахуванням їх потужностей та логістичних зв'язків з виробництвом БПЛА. Для формування потрібних запасів комплектуючих, проведена оптимізація та їх раціональний розподіл, з використанням показників (обсяг запасів, час формування, ризику впливу загроз). Створена модель для обґрунтування складу логістичних компонент для постачання, у вигляді потрібної множини видів транспорту в різноманітному транспортному середовищі. Для планування маршрутів руху комплектуючих, створена імітаційна модель, в якій використовується поява ризиків від впливу загроз. Розроблено алгоритм для пошуку відносно безпечних маршрутів постачання, в умовах особливого стану країни.

Висновки. Запропонований підхід дозволяє обґрунтувати плани постачання комплектуючих для масованого, масштабованого виробництва БПЛА, з урахуванням складу постачальників-виробників та впливу загроз, які спрямовані на довгі ланцюги постачання в різноманітному транспортному середовищі.

Список використаних джерел.

1. Федорович, О., Прончаков, Ю., Рибка, К., & Лещенко, Ю. Вибір постачальників для виробництва високотехнологічної продукції з урахуванням довгих логістичних ланцюгів постачання вантажів. Авіаційно-космічна техніка і технологія, 2021, (5), 75-81.
2. Pecina, M. Application of the new NATO logistics system [Text] / M. Pecina, J. Husak // Land Forces Academy Review. – 2018. – Vol. 23, No. 2. – P. 121-127. DOI: 10.2478/raft-2018-0014.

ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ЗАВАНТАЖЕННЯ ВАГОНА-ПЛАТФОРМИ З КОНТЕЙНЕРАМИ-ЦИСТЕРНАМИ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ СТІЙКОСТІ КОЛІСНИХ ПАР У КРИВИХ МАЛОГО РАДІУСА

Національний транспортний університет, Україна

Постановка проблеми. Для вантажних перевезень на колії 1520 мм стійкість колісних пар у криволінійних ділянках є одним з базових чинників експлуатаційної безпеки. Особливо це стосується вагонів-платформ із танк-контейнерами, оскільки підвищене положення центра мас, нерівномірність заповнення та похибки позиціонування вантажу змінюють розподіл вертикальних реакцій між колесами. У кривих малого радіуса ці відхилення посилюються дією відцентрових сил, що може спричинити зростання бічних сил, розвантаження коліс та наближення до умов сходу. Тому оцінювання такої системи лише за статичними або гранично допустимими параметрами завантаження є недостатнім: потрібен аналіз сумісної дії швидкості, радіуса кривої та координат центра мас.

Аналіз досліджень і публікацій. У працях, присвячених динаміці вантажних вагонів, доведено, що взаємодія «вагон-колія» формується як вертикальними, так і поперечними коливаннями, а достовірне прогнозування потребує урахування параметрів підвішування, контактної взаємодії колеса з рейкою та фактичного навантаження [1-4, 12]. Окремий напрям становлять дослідження транспортування контейнерів і знімних модулів на платформах, де розглядаються динамічні навантаження, міцність несівних конструкцій та вплив зміщення фітингів відносно упорів [1-3, 5]. Разом із тим роботи щодо зміщення центра мас вантажу показують, що найчутливішими до асиметрії є показники Y/Q , коефіцієнт розвантаження колеса та запас стійкості у кривих [8-10]. Це створює основу для переходу від загальних нормативних обмежень до розрахунково-оптимізаційного вибору параметрів завантаження.

Невирішена частина проблеми. Наявні моделі часто описують або міцність рами, або окремі динамічні режими, тоді як для вагона-платформи 13-4012 з двома ISO танк-контейнерами моделі 15-1443 важливо розглядати просторову схему навантаження як єдину систему. Для практики недостатньо знати лише допустимі межі ексцентриситету: потрібно встановити, за яких поєднань позовжнього зміщення x , поперечного зміщення y , висоти центра мас z , швидкості v та радіуса R зберігається прийнятний запас безпеки. Саме ця багатофакторність визначає доцільність поєднання аналітичних залежностей із багатотільним імітаційним моделюванням.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є обґрунтування раціональних параметрів завантаження вагона-платформи з двома танк-контейнерами для підвищення стійкості колісних пар у кривих малого радіуса. Для досягнення мети виконано такі задачі: визначено вплив просторового положення центра мас на перерозподіл навантажень; оцінено зміну коефіцієнта розвантаження колеса та критерію Надаля при різних швидкостях; порівняно номінальні, зміщені й оптимізовані схеми розміщення контейнерів; сформовано рекомендації для зменшення ризику сходу без конструктивної модернізації вагона.

Методика. Об'єктом моделювання прийнято платформу 13-4012 на візках 18-100 з двома танк-контейнерами 15-1443. Розрахункові режими охоплювали криві радіусом 300-600 м, швидкість 40-100 км/год, поперечне зміщення до 0,20 м, позовжнє зміщення до 0,30 м та висоту центра мас у межах 1,8-2,3 м. Методика включала квазістатичне оцінювання навантажень і комп'ютерну MBS-модель у середовищі Universal Mechanism; геометрична частина формувалася на основі паспортних параметрів рухомого складу. Як контрольні показники використано відношення бічної та вертикальної сил Y/Q , коефіцієнт розвантаження

колеса UN і запас стійкості від сходу. Такий підхід узгоджується із сучасною практикою MBS-аналізу рухомого складу та валідації моделей за динамічними показниками [6, 7].

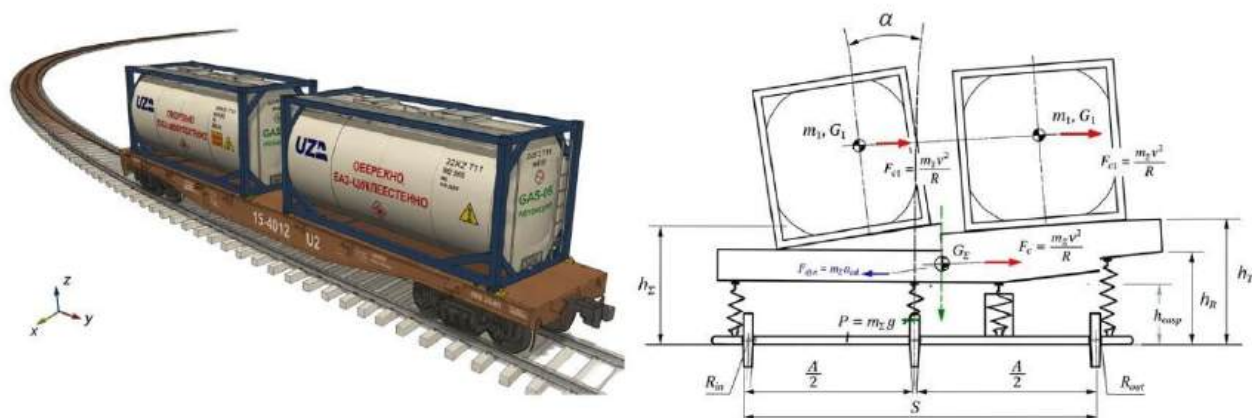


Рис. 1. Розрахункова схема вагона-платформи з двома танк-контейнерами у кривій ділянці колії

Основні результати. Моделювання підтвердило, що навіть відносно малі відхилення центра мас можуть помітно змінювати динаміку платформи. За поздовжнього зміщення контейнерів до 0,30 м коефіцієнт вертикальної динаміки зростає приблизно з 0,450 до 0,470. Саме по собі таке зростання не є критичним, але воно підвищує нерівномірність завантаження візків і зменшує резерв для безпечного проходження кривої. Значно небезпечнішим виявилось поперечне зміщення: при y близько 0,20 м у поєднанні з просторовим ексцентриситетом динамічний коефіцієнт наближався до 0,51, тобто система переходила до області, де додаткове підвищення швидкості або висоти центра мас швидко погіршує контакт колеса з рейкою.

Порівняння варіантів завантаження показало перевагу симетричного або майже симетричного розміщення контейнерів. Для базового режиму $R = 300$ м і $v = 60$ км/год оптимізована схема з поздовжнім зміщенням близько 0,03 м, поперечним зміщенням близько 0,01 м та зниженням висоти центра мас до 2,30 м забезпечила зменшення максимального Y/Q до 0,48 і коефіцієнта розвантаження до 0,16. Запас стійкості при цьому досяг 33,3%, тоді як для схеми з поперечним відхиленням 0,05 м він зменшувався до 18,3%. Отже, мінімізація поперечного ексцентриситету є більш результативною, ніж компенсація лише поздовжнього зміщення.

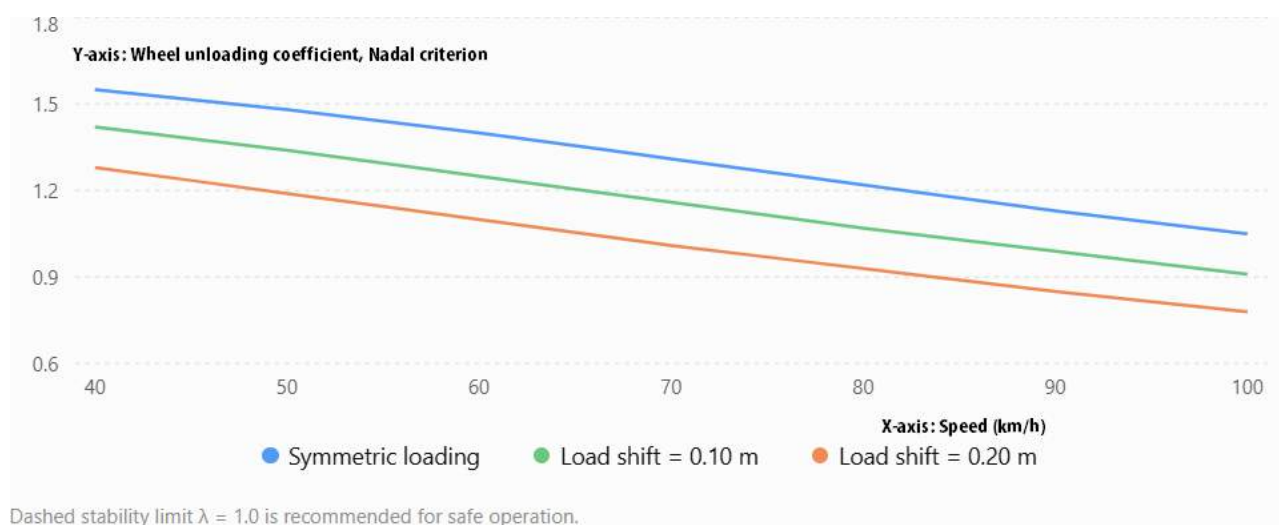


Рис. 2. Зміна критерію стійкості за різних схем зміщення вантажу та швидкості руху

Вплив швидкості проявляється як системне погіршення всіх контрольних показників. Для кривої радіусом 300 м при збільшенні швидкості з 40 до 70 км/год бічна сила зростала з 42,6 до 61,5 кН, а відношення Y/Q - з 0,43 до 0,64. Одночасно коефіцієнт розвантаження

підвищувався з 0,11 до 0,30. У ширшому діапазоні швидкостей, до 100 км/год, для малого радіуса спостерігалось наближення UN до 0,75 і падіння запасу стійкості нижче безпечної області. Це узгоджується з висновками про критичний вплив масового розподілу на вписування вагона у криву [9, 10] і підтверджує необхідність диференційованого обмеження швидкості залежно від фактичного стану завантаження.

Таблиця 1. Узагальнене порівняння варіантів завантаження при $R = 300$ м і $v = 60$ км/год

Показник	Номінальна	Зсув x	Зсув y	Оптимізована
x, м	0,00	0,10	0,00	0,03
y, м	0,00	0,00	0,05	0,01
z, м	2,35	2,35	2,35	2,30
Макс. Y/Q	0,52	0,55	0,59	0,48
UN	0,18	0,20	0,24	0,16
Запас, %	27,8	23,8	18,3	33,3

Дані таблиці додатково демонструють, що оптимізація не зводиться до одного параметра. Найкращий результат досягається тоді, коли одночасно зменшується поперечний зсув, не допускається надмірне підняття центра мас і контролюється поздовжнє положення контейнерів. За такого підходу покращення запасу стійкості забезпечується не за рахунок посилення конструкції, а за рахунок раціональної організації вантажної операції.

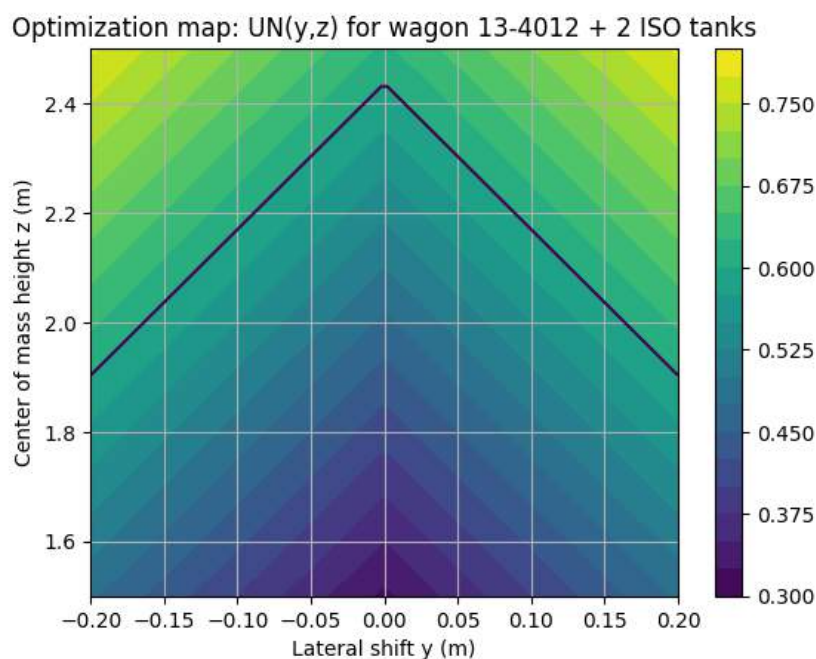


Рис. 3. Приклад карти допустимих поєднань поперечного зміщення та висоти центра мас

Оптимізаційна карта дає змогу інтерпретувати результати не тільки як окремі числові значення, а як область допустимих технологічних рішень. Центральна частина карти відповідає малому поперечному зміщенню, а нижня частина - нижньому положенню центра мас. Саме там рівень динамічного розвантаження мінімальний. Перехід у зони з більшим y та z означає зростання перекидального моменту, погіршення контакту внутрішнього колеса з рейкою і скорочення запасу за критерієм Надаля. Тому карта може застосовуватися як швидкий інженерний інструмент для попереднього відбракування небезпечних схем завантаження ще до формування поїзда.

Практичне тлумачення. Отримані залежності доцільно використовувати як розрахункову основу для технологічних карт завантаження. Безпечною слід вважати область, де центр мас розташований якомога нижче, поперечний зсув мінімізований, а швидкість у

кривих малого радіуса вибрана з урахуванням фактичної схеми завантаження. Небезпечною є комбінація високого центра мас, поперечної асиметрії та швидкості, близької до верхньої межі експлуатаційного діапазону. Для платформ із двома танк-контейнерами першочерговим має бути контроль поперечного положення контейнерів, рівномірності заповнення і надійності фіксації у фітингових вузлах.

Висновки та рекомендації. Запропонований підхід дозволяє оцінювати стійкість колісних пар не ізольовано, а з урахуванням реального поєднання параметрів вантажу, вагона та колії. Найбільш значущим фактором ризику є поперечне зміщення центра мас, яке прискорює зростання Y/Q і UN та зменшує запас стійкості. Поздовжній ексцентриситет також збільшує динамічну навантаженість, однак його вплив стає особливо небезпечним у поєднанні з поперечним зсувом і високою швидкістю. Для експлуатації рекомендується забезпечувати максимально симетричне розміщення танк-контейнерів, зменшувати висоту сумарного центра мас, застосовувати розрахункові карти допустимих параметрів і обмежувати швидкість у кривих малого радіуса за наявності асиметрії завантаження. Подальші дослідження варто спрямувати на врахування коливань рідкого вантажу всередині цистерни, зносу профілів колеса і рейки та випадкових нерівностей колії.

Список використаних джерел

1. Fomin O., Gerlici J., Lovska A., Kravchenko K. Analysis of the loading on an articulated flat wagon of circular pipes loaded with tank containers. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11(12). 5510. <https://doi.org/10.3390/app11125510>
2. Fomin O., Gerlici J., Lovskaya A., Gorbunov M., Kravchenko K., Prokopenko P., Lack T. Dynamic loading of the tank container on a flat wagon considering fittings displacement relating to the stops. *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 234. 05002. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823405002>
3. Fomin O., Gerlici J., Lovskaya A., Kravchenko K., Burlutski O., Hauser V. Peculiarities of the mathematical modelling of dynamic loading on containers in flat wagons transportation. *MATEC Web of Conferences*. 2019. Vol. 254. 02039. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201925402039>
4. Zhai W.M., Cai C.B., Guo S.Z. Coupling model of vertical and lateral vehicle/track interactions. *Vehicle System Dynamics*. 1996. Vol. 26(1). P. 61-79. <https://doi.org/10.1080/00423119608969302>
5. Gerlici J., Lovska A., Kravchenko O., Solcansky S., Krasnokutskyi Y. The computer modelling of the vertical loading on a long-base flat wagon loaded with hopper containers. *Transportation Research Procedia*. 2023. Vol. 74. P. 387-394. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.11.159>
6. Krasoń W., Sławiński G., Dobrowolski D. Numerical tests of the influence of railway bogie suspension on the wagon motion parameters. *Acta Mechanica et Automatica*. 2025. Vol. 19(4). P. 683-694. <https://doi.org/10.2478/ama-2025-0077>
7. Silva R., Ribeiro D., Bragança C., Costa C., Arêde A., Calçada R. Model updating of a freight wagon based on dynamic tests under different loading scenarios. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11(22). 10691. <https://doi.org/10.3390/app112210691>
8. Shatunov O.V., Shvets A.O. Study of dynamic indicators of flat wagon with load centre shift. *Science and Transport Progress*. 2019. No. 2(80). P. 127-143. <https://doi.org/10.15802/stp2019/165160>
9. Zhang D., Tang Y., Peng Q., Dong C., Ye Y. Effect of mass distribution on curving performance for a loaded wagon. *Nonlinear Dynamics*. 2021. Vol. 104(3). P. 2259-2273. <https://doi.org/10.1007/s11071-021-06386-3>
10. Zhang D., Tang Y., Sun Z., Peng Q. Optimising the location of wagon gravity centre to improve the curving performance. *Vehicle System Dynamics*. 2020. P. 1-15. <https://doi.org/10.1080/00423114.2020.1865546>

11. Lovska A.O., Muradian A.O., Demydiakov O.V. Дослідження вертикальної динаміки вагона-платформи, завантаженого з'ємними модулями при русі стиковою нерівністю. *Transport Development*. 2024. No. 1(20). P. 35-43. <https://doi.org/10.33082/td.2024.1-20.04>
12. Sun Y.Q., Dhanasekar M. A dynamic model for the vertical interaction of the rail track and wagon system. *International Journal of Solids and Structures*. 2002. Vol. 39(5). P. 1337-1359. [https://doi.org/10.1016/S0020-7683\(01\)00224-4](https://doi.org/10.1016/S0020-7683(01)00224-4)
13. Mănescu T.Ş. Static and dynamic tests at a railway tank wagon. *Studia Universitatis Babeş-Bolyai Engineering*. 2020. Vol. 65(1). P. 105-114. <https://doi.org/10.24193/subbeng.2020.1.11>
14. Fomin O., Lovska A., Pavliuchenkov M., Sova S. Research into the dynamic loading on the carrying structure of a flat wagon with lower center of gravity when transporting firing equipment. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 1002. 012013. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1002/1/012013>
15. Fomin O., Lovska A., Safronov O., Soroka O. Study of the dynamic loading of the load-bearing structure of a flat wagon during transportation by sea. *EUREKA: Physics and Engineering*. 2020. No. 6. P. 41-49. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2020.001512>

Фомін О.В., д.т.н., професор
fominaleksejvictorovic@gmail.com
Мартиненко В.І., аспірант
martynenko.vi@ntu.edu.ua
Мартиненко Д.І., аспірант
martynenko.di@ntu.edu.ua

ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ РОБОТИ СУДНОВОГО УСТАТКУВАННЯ З УРАХУВАННЯМ КОНСТРУКТИВНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ ВАГОНІВ-ЦИСТЕРН

Національний транспортний університет, Україна

Постановка проблеми та її зв'язок із науковими і практичними задачами. Сучасний розвиток мультимодальних перевезень вимагає впровадження ефективних технологічних рішень для інтеграції водного та залізничного транспорту. Система «судно – вагон-цистерна» є стратегічно важливим об'єктом для оптимізації логістики рідких вантажів і скраплених газів. Суднові енергетичні установки (СЕУ) під час вантажних операцій функціонують у нетипових режимах, що спричиняє підвищені витрати палива та прискорене зношування агрегатів. Конструктивні особливості вагонів-цистерн – місткість, тип продукту, система підігріву – безпосередньо впливають на навантажувальний профіль суднового устаткування. Невідповідність між продуктивністю насосних систем судна та пропускною здатністю залізничного термінального фронту призводить до нераціонального використання ресурсів і затримок у графіках перевезень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання надійності паливної апаратури дизелів та стабільної роботи СЕУ розглянуто у працях А.С. Сагіна та Ю.В. Заблоцького [1]. Методи оптимізації енергоефективності суден в складних навігаційних умовах систематизовано у роботі [2]. Перспективи використання відновлюваної енергетики та зниження викидів у морських транспортних системах досліджено в [3]. Застосування байпасу відпрацьованих газів для покращення екологічних характеристик дизелів розглянуто в [4]. Проблеми оптимізації енергоефективності та оцінки ризиків у мультимодальних перевезеннях висвітлено в [8]. Аналіз показав, що більшість досліджень зосереджуються або на морській, або на залізничній складовій окремо, залишаючи поза увагою їх спільний енергетичний вплив у системі «судно – вагон-цистерна».

Виділення невирішених частин проблеми. Незважаючи на значні напрацювання, у науковій літературі відсутня єдина методологія визначення раціональних параметрів роботи суднового устаткування з урахуванням конструктивних особливостей вагонів-цистерн. Дослідники ігнорують динамічну зміну режимів СЕУ в процесі циклічного навантаження цистерн. Також не розроблено комплексних алгоритмів, які б узгоджували гідравлічні характеристики цистерн різних типів з оптимальними режимами роботи суднових насосів і дизель-генераторів.

Мета дослідження. Визначити раціональні параметри роботи суднового устаткування в системі «судно – вагон-цистерна» шляхом урахування конструктивних особливостей вагонів-цистерн, що забезпечить мінімізацію питомих витрат палива та часу вантажних операцій.

Виклад основного матеріалу. Вагони-цистерни класифікуються за вантажопідйомністю, типом вантажу (нафтопродукти, скраплені гази, хімічні речовини), наявністю нагрівальних пристроїв та конструкцією зливно-наливної арматури. Кожен тип цистерн формує специфічний гідравлічний опір і темп наповнення, що безпосередньо впливає на необхідну продуктивність суднових вантажних насосів.

Суднова енергетична установка функціонує у чотирьох основних режимах: ходовому, маневровому, вантажному та стоянковому. Під час вантажного режиму кілька допоміжних дизель-генераторів забезпечують роботу насосів потужністю до сотень кіловат. Традиційне

одночасне увімкнення всіх насосів на максимальну продуктивність є неефективним і призводить до роботи дизелів при неоптимальних навантаженнях.

Для визначення раціональних параметрів запропоновано три підходи до управління насосним обладнанням: 1) каскадне регулювання – послідовне підключення насосів відповідно до темпу наповнення цистерни; 2) частотне регулювання – адаптація швидкості обертання насосів залежно від поточного гідравлічного опору залізничної ємності; 3) синхронізація режимів – узгодження продуктивності суднових насосів із пропускнуою здатністю термінального фронту з урахуванням типу цистерни.

Математична задача оптимізації зводиться до мінімізації цільової функції питомої витрати палива при забезпеченні заданої сумарної продуктивності та дотриманні конструктивних обмежень вагона-цистерни (максимальний тиск наповнення, допустима швидкість наливу). Врахування теплового режиму в'язких вантажів та потреби в підігріві суттєво уточнює баланс потужності СЕУ і дозволяє коректно розподілити навантаження між дизель-генераторами.

Оптимізація графіків подачі вагонів-цистерн під перевантаження із застосуванням методів кластеризації дозволяє скоротити час стоянки судна та зменшити кількість перехідних режимів роботи СЕУ, які є найменш економічними.

Висновки та рекомендації. Визначено, що раціональні параметри роботи суднового устаткування безпосередньо залежать від типу та конструктивних характеристик вагонів-цистерн. Застосування каскадного та частотного регулювання насосів дозволяє підтримувати режим роботи дизель-генераторів у зоні мінімальної питомої витрати палива. Синхронізація подачі рухомого складу із суднових режимами скорочує час вантажних операцій і зменшує знос агрегатів. Отримані результати є основою для розробки галузевих норм проектування мультимодальних наливних терміналів.

Список використаних джерел

1. Sagin A.S., Zablotskyi Yu.V. Reliability maintenance of fuel equipment on marine and inland navigation vessels // *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences*. 2021. № 7-8. P. 14–17. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-14-17>.
2. Wang K., Wang Y., Liang H. та ін. Ship energy efficiency optimization considering the influences of multiple complex navigational environments // *Marine Pollution Bulletin*. 2025. Vol. 216. 117976. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2025.117976.
3. Melnyk O., Bulgakov M., Fomin O. та ін. Sustainable development of renewable energy in shipping // *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*. 2025. Vol. 127. P. 165–188. <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2025.127.10>.
4. Sagin S., Kuropyatnyk O. Determination of optimal operating modes of the selective catalytic reduction system for marine diesel exhaust gases // *Technology Audit and Production Reserves*. 2025. 5(3(85)). P. 12–22. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2025.340411>.
5. Ibrahim A.M., Klevtsov K.M. Optimization of energy efficiency and risk assessment for its implementation in marine multimodal eco-oriented transportation // *Transport Development*. 2025. No. 3(26). DOI: 10.33082/td.2025.3-26.02.
6. Fomin O., Gorbunov M., Lovska A. та ін. Dynamics and Strength of Circular Tube Open Wagons with Aluminum Foam Filled Center Sills // *Materials*. 2021. Vol. 14. 1915. <https://doi.org/10.3390/ma14081915>.

ПРОЄКТУВАННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ КОМПЛЕКСІВ ЛОГІСТИЧНИХ СИСТЕМ У ВИРОБНИЧИХ ПРОЦЕСАХ МАШИНОБУДУВАННЯ

Класичний приватний університет м. Запоріжжя, Україна

Сучасне машинобудівне виробництво характеризується високим рівнем технологічної складності, багатомономенклатурністю продукції та жорсткими вимогами до термінів виконання замовлень. За таких умов ефективність підприємства значною мірою визначається не окремими логістичними операціями, а узгодженою роботою цілісних функціональних комплексів логістичної системи, які об'єднують процеси постачання, виробництва, складування, внутрішньозаводського транспортування та збуту готової продукції. Загострення конкуренції на ринках машинобудівної продукції, скорочення життєвого циклу виробів та необхідність гнучкого реагування на коливання попиту зумовлюють потребу в науково обґрунтованому проєктуванні таких комплексів як цілісних об'єктів управління, а не сукупності розрізнених логістичних операцій. Проблема проєктування функціональних комплексів безпосередньо пов'язана з практичними завданнями підвищення конкурентоспроможності машинобудівних підприємств, оскільки саме узгодженість роботи логістичних комплексів визначає тривалість виробничого циклу, рівень логістичних витрат та якість обслуговування споживачів.

Теоретичні засади побудови логістичних систем та їхніх функціональних складових розкрито у працях Є. В. Крикавського, який обґрунтував системний підхід до логістики як науки про управління потоковими процесами [1]. Питання методології проєктування логістичних рішень, зокрема принципів формування логістичних систем підприємства, висвітлено в підручнику М. А. Окландера [2]. Особливості організації транспортної складової логістичних систем, що є однією з ключових функціональних ланок виробничого підприємства, досліджено І. Г. Смирновим та Т. В. Косаревою [3]. Разом із тим більшість наявних досліджень розглядає функціональні комплекси логістичної системи переважно узагальнено, без достатньої деталізації особливостей їх проєктування саме для умов машинобудівного виробництва з його багатостадійністю, капіталомісткістю обладнання та широкою кооперацією із зовнішніми постачальниками.

Незважаючи на значний доробок у сфері теорії логістичних систем, недостатньо розробленими залишаються питання комплексного проєктування функціональних комплексів логістичної системи саме для машинобудівних підприємств з урахуванням взаємної залежності постачальницької, виробничої, складської, транспортної та збутової складових. Потребують уточнення методичні підходи до оцінювання узгодженості проєктних рішень щодо окремих комплексів між собою, а також до вибору критеріїв ефективності, які б відображали не лише результати роботи окремого комплексу, а й його вплив на функціонування логістичної системи підприємства в цілому.

Метою дослідження є систематизація методичних підходів до проєктування функціональних комплексів логістичної системи у виробничих процесах машинобудування. Відповідно до поставленої мети визначено такі завдання: розкрити сутність поняття функціонального комплексу логістичної системи; охарактеризувати його структурні складові стосовно машинобудівного підприємства; обґрунтувати методологічні принципи та етапи проєктування; визначити особливості проєктування, зумовлені специфікою машинобудівного виробництва; сформулювати систему критеріїв оцінювання ефективності спроектованого комплексу.

Під функціональним комплексом логістичної системи розуміють сукупність організаційно й технологічно взаємопов'язаних підсистем, що виконують окрему логістичну функцію – постачання, виробництво, складування, транспортування або розподіл – і

забезпечують наскрізне управління матеріальними, інформаційними та фінансовими потоками в межах підприємства [1]. На відміну від окремої логістичної операції, функціональний комплекс має власну організаційну структуру, критерії ефективності та механізми взаємодії з іншими комплексами системи, що дозволяє розглядати його як відносно самостійний об'єкт проєктування, який водночас підпорядкований загальній меті логістичної системи підприємства.

У структурі логістичної системи машинобудівного підприємства традиційно виокремлюють п'ять функціональних комплексів, кожен з яких виконує самостійну логістичну функцію, водночас перебуваючи у взаємозв'язку з іншими складовими системи. Узагальнену характеристику цих комплексів наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Функціональні комплекси логістичної системи машинобудівного підприємства

№ з/п	Комплекс	Основні завдання
1	Постачання	Формування потреби в сировині й матеріалах, вибір постачальників, укладання договорів, вхідний контроль якості
2	Виробничий	Логістична підтримка технологічного процесу, організація міжцехових і міжопераційних матеріальних потоків
3	Складський	Приймання, розміщення, зберігання та відпуск матеріальних ресурсів на всіх стадіях виробничого циклу
4	Транспортний	Внутрішньозаводське і зовнішнє переміщення вантажів, узгодження графіків перевезень із виробничим розкладом
5	Збутовий	Розподіл готової продукції, формування партій відвантаження, взаємодія з посередниками та споживачами

Проектування функціональних комплексів логістичної системи базується на низці методологічних принципів, серед яких системний підхід, принцип наскрізного управління потоками, принцип альтернативного вибору технологічних і організаційних рішень та принцип економічної доцільності [2]. Системний підхід передбачає розгляд кожного функціонального комплексу не ізольовано, а як елемента цілісної логістичної системи підприємства, ефективність якого оцінюється за критерієм впливу на кінцевий результат діяльності всього підприємства, а не лише окремої підсистеми. Це особливо важливо для машинобудування, де локальна оптимізація одного комплексу – наприклад, скорочення запасів на складі – без урахування взаємозв'язків із виробничим і транспортним комплексами може призвести до зниження ритмічності виробництва та зростання втрат від простоїв.

Особливості машинобудівного виробництва суттєво впливають на зміст проєктних рішень щодо функціональних комплексів логістичної системи. Багатономенклатурність продукції та значна кількість деталей і вузлів, що входять до складу кінцевого виробу, вимагають високого рівня узгодженості постачальницького й виробничого комплексів, зокрема застосування систем постачання за принципом «точно в термін». Складність і розгалуженість технологічних маршрутів обробки деталей обумовлюють потребу в розвиненій транспортно-складській інфраструктурі, здатній забезпечити безперерйне переміщення матеріальних потоків між виробничими дільницями та цехами [3]. Крім того, для машинобудівних підприємств характерна висока капіталомісткість основного технологічного обладнання, що підвищує вимоги до точності планування його завантаження та синхронізації графіків роботи транспортного й складського комплексів із виробничим розкладом.

Процес проєктування функціонального комплексу логістичної системи доцільно здійснювати поетапно. Спочатку проводиться аналіз наявного стану логістичних процесів, виявляються вузькі місця та резерви підвищення ефективності. Далі формулюються цілі й

критерії проектування – мінімізація логістичних витрат, скорочення тривалості виробничого циклу, підвищення рівня обслуговування споживачів, після чого розробляються альтернативні варіанти організаційної та технологічної структури комплексу з урахуванням наявних потужностей і ресурсних обмежень підприємства. На завершальних етапах здійснюється порівняльна оцінка альтернатив, вибір оптимального варіанта та його впровадження з подальшим моніторингом ефективності в процесі експлуатації. Послідовність етапів такого проектування наочно представлено на рис. 1.



Рис. 1. Схема етапів проектування функціонального комплексу логістичної системи машинобудівного підприємства

Важливою складовою сучасного проектування функціональних комплексів є застосування методів імітаційного моделювання та цифрових інструментів планування, які дозволяють ще на етапі проектування перевірити пропускну спроможність окремих ланок логістичної системи, виявити потенційні вузькі місця у взаємодії комплексів і оцінити наслідки прийнятих рішень без фактичного втручання у виробничий процес. Використання таких інструментів особливо доцільне для машинобудівних підприємств із багатостадійним виробничим циклом, де ціна помилки проектування є високою через значну капіталомісткість обладнання та тривалість виробничих циклів. Побудова імітаційної моделі функціонального комплексу дає змогу заздалегідь перевірити декілька сценаріїв завантаження виробничих потужностей і обрати варіант, який забезпечує найменші втрати часу на стиках між суміжними комплексами.

Окремої уваги в проектуванні функціональних комплексів заслуговує питання інформаційної інтеграції. Узгоджена робота постачальницького, виробничого, складського, транспортного та збутового комплексів можлива лише за умови єдиного інформаційного простору, який забезпечує своєчасний обмін даними про стан запасів, хід виконання виробничих замовлень і графіки перевезень. Відсутність такої інтеграції призводить до дублювання функцій, затримок у прийнятті рішень та зростання страхових запасів на межах комплексів, що особливо помітно на машинобудівних підприємствах із розгалуженою номенклатурою деталей і вузлів.

Оцінювання ефективності спроектованого функціонального комплексу логістичної системи доцільно здійснювати за сукупністю показників, що відображають різні аспекти його функціонування. До економічних показників належать рівень логістичних витрат на одиницю продукції та оборотність оборотних коштів, вкладених у запаси. Часові показники охоплюють тривалість виробничого й логістичного циклу та час виконання замовлення споживача. Якісні показники характеризують рівень виконання замовлень у встановлені терміни та частку втрат, спричинених порушеннями логістичних процесів. Окремої уваги заслуговують показники гнучкості, які відображають здатність комплексу адаптуватися до зміни обсягів і номенклатури виробництва без істотного зростання витрат. Комплексне застосування зазначених критеріїв дозволяє обґрунтовано порівнювати альтернативні проєктні рішення та обирати варіант, який найповніше відповідає стратегічним цілям підприємства.

Слід також враховувати, що функціональні комплекси логістичної системи машинобудівного підприємства перебувають у стані постійної взаємної залежності, тому проєктне рішення, оптимальне для одного комплексу, не завжди є оптимальним для системи в цілому. Наприклад, скорочення обсягів вхідних партій сировини знижує витрати на зберігання в комплексі постачання, проте може підвищити частоту транспортних рейсів і завантаженість транспортного комплексу. Це обумовлює необхідність застосування узгодженого, а не ізольованого підходу до проєктування кожного окремого комплексу, коли зміна параметрів одного з них обов'язково оцінюється з погляду впливу на суміжні комплекси та кінцеві показники роботи всієї логістичної системи підприємства.

Практична реалізація проєктних рішень щодо функціональних комплексів логістичної системи пов'язана з низкою типових ризиків, які доцільно враховувати ще на етапі проєктування. Серед них – опір персоналу змінам усталених процедур роботи зі складом і транспортом, недостатня точність вихідних даних про фактичні матеріальні потоки, а також обмеженість фінансових ресурсів на модернізацію транспортно-складської інфраструктури машинобудівного підприємства. Мінімізації цих ризиків сприяє поетапне впровадження проєктних рішень, попереднє пілотне тестування нових процедур на окремій ділянці та залучення працівників профільних служб до розроблення проєкту комплексу ще до його остаточного затвердження.

Практика проєктування функціональних комплексів на машинобудівних підприємствах свідчить, що найбільшого ефекту досягають ті проєктні рішення, які поєднують типові методичні підходи з урахуванням індивідуальних особливостей конкретного виробництва – номенклатури продукції, типу організації виробничого процесу (одиничного, серійного чи масового) та наявної інфраструктури підприємства. В умовах одиничного та дрібносерійного виробництва першочергового значення набуває гнучкість комплексу постачання й виробничого комплексу, здатних оперативно реагувати на зміну складу замовлення, тоді як у серійному й масовому виробництві на перший план виходить синхронізація виробничого, складського й транспортного комплексів, спрямована на підтримання ритмічності випуску продукції.

Проведене дослідження засвідчило, що проєктування функціональних комплексів логістичної системи є важливим напрямом підвищення ефективності машинобудівного виробництва. Обґрунтований вибір організаційної структури, технологічних рішень та критеріїв оцінювання кожного комплексу – постачання, виробництва, складування, транспортування і збуту – дозволяє забезпечити узгоджену роботу всієї логістичної системи підприємства, скоротити тривалість виробничого циклу, зменшити логістичні витрати та підвищити рівень обслуговування споживачів. Машинобудівним підприємствам рекомендується проєктувати функціональні комплекси не ізольовано, а з урахуванням їх взаємної залежності, застосовуючи методи імітаційного моделювання для попередньої перевірки прийнятих рішень. Подальші дослідження в цьому напрямі доцільно зосередити на розробленні методичного інструментарію для кількісного оцінювання взаємного впливу функціональних комплексів у процесі їх спільного проєктування, а також на адаптації методів імітаційного моделювання до умов конкретних машинобудівних підприємств.

Список використаних джерел

1. Крикавський Є. В. Логістика. Основи теорії : підручник. 2-ге вид., допов. і переробл. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2006. 456 с.
2. Окландер М. А. Логістика : підручник. Київ : Центр учбової літератури, 2008. 346 с.
3. Смирнов І. Г., Косарева Т. В. Транспортна логістика : навч. посібник. Київ : Центр учбової літератури, 2008. 224 с.

5. ПРОЄКТУВАННЯ РОБОТІВ

УДК 681.5

Бабасєв В.В., здобувач
Volodymyr.Babaiev@kname.edu.ua
Кулаєнко О.О., к.т.н., доцент
Oleh.Kulaienko@kname.edu.ua

БАГАТОКООРДИНАТНИЙ РОБОТ-МАНІПУЛЯТОР НА ОСНОВІ КРОКОВИХ ДВИГУНІВ

Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова

Сучасний розвиток робототехніки та автоматизованих виробничих систем характеризується широким впровадженням багатокоординатних роботизованих маніпуляторів, здатних виконувати операції складання, транспортування, сортування, зварювання та оброблення деталей. Одним із перспективних напрямів є створення доступних роботизованих систем на основі крокових двигунів, які забезпечують високу точність позиціонування, простоту керування та відносно невисоку вартість. Такі системи можуть ефективно використовуватися як у навчальному процесі, так і під час автоматизації окремих виробничих операцій.

У роботі розроблено конструкцію п'ятикоординатного роботизованого маніпулятора, виконано вибір кінематичної схеми, приводів та елементної бази системи керування. Для реалізації приводів використано крокові двигуни NEMA 23 та NEMA 17 із зовнішніми драйверами керування, що забезпечують необхідну точність переміщення ланок маніпулятора. Конструкція максимально адаптована для виготовлення із застосуванням технологій 3D-друку, що значно знижує вартість виготовлення та спрощує модернізацію окремих вузлів.

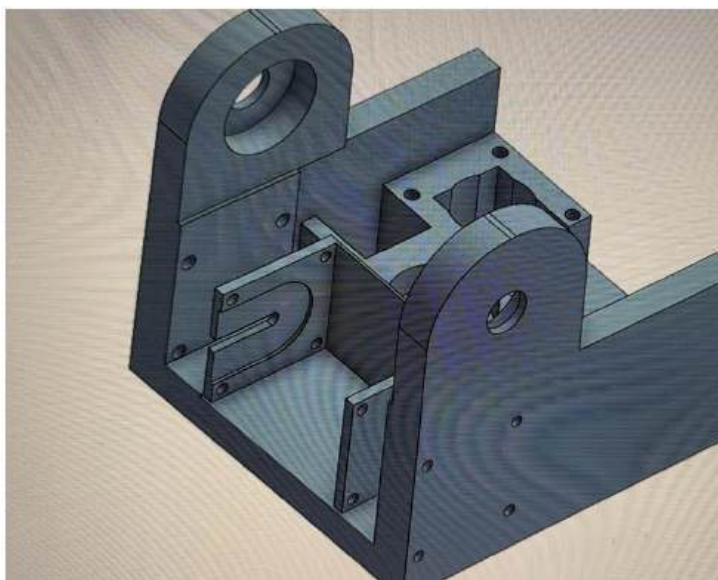
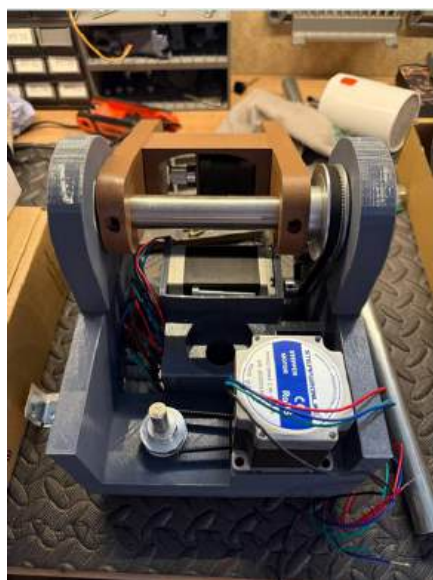


Рис. 1. Загальний вигляд багатокоординатного роботизованого маніпулятора (зліва) та 3D-модель станини (зправа)

Під час проєктування виконано аналіз кінематичних характеристик маніпулятора, розроблено механічну конструкцію та систему керування приводами. Особливу увагу приділено модульності конструкції, що дозволяє змінювати конфігурацію робочого органу відповідно до поставлених технологічних завдань.

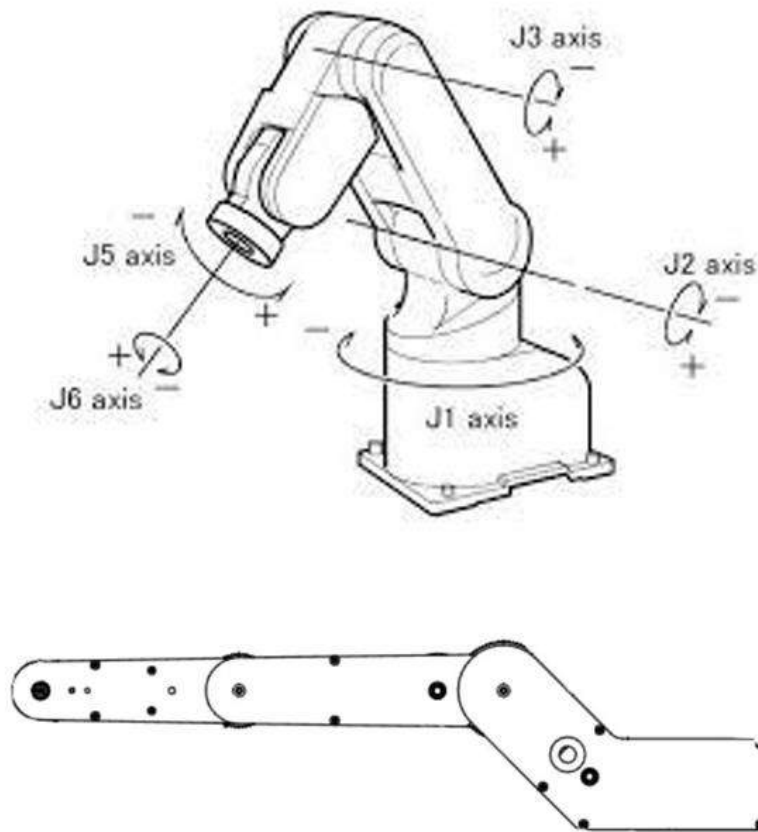


Рис. 2. Кінематична схема маніпулятора

Запропоноване технічне рішення може бути використане як навчальний стенд для підготовки фахівців з автоматизації та робототехніки, а також як основа для створення спеціалізованих роботизованих комплексів. Подальший розвиток роботи доцільно пов'язати із впровадженням систем комп'ютерного зору, алгоритмів планування траєкторії руху та методів штучного інтелекту для підвищення автономності функціонування маніпулятора.

Список використаних джерел

1. Craig J. J. Introduction to Robotics: Mechanics and Control. 4th ed. Pearson, 2018.
2. Siciliano B., Khatib O. Springer Handbook of Robotics. Springer, 2016.
3. Groover M. P. Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing. 5th ed. Pearson, 2020.

МОДЕЛЮВАННЯ МОБІЛЬНОГО РОБОТА З ДИСТАНЦІЙНИМ КЕРУВАННЯМ

¹Відокремлений структурний підрозділ Харківський фаховий коледж інформаційних технологій Національного аерокосмічного університету «Харківський авіаційний інститут»

²Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Україн

Стрімкий розвиток робототехніки, технологій Інтернету речей (IoT) та засобів бездротового зв'язку сприяє широкому впровадженню роботизованих систем у промисловості, логістиці, медицині, освіті та побуті. Сучасні роботизовані комплекси забезпечують автоматизацію виробничих процесів, підвищують продуктивність праці, мінімізують вплив людського фактору та дозволяють виконувати роботи у небезпечних умовах. Особливої актуальності набуває створення доступних навчально-дослідницьких роботизованих платформ, що поєднують сучасні апаратні рішення, відкриті програмні засоби та можливості дистанційного керування.

Метою роботи є створення моделі навчально-експериментальної роботизованої платформи та перевірка алгоритмів дистанційного керування з використанням MQTT брокеру контролеру ESP32 та Arduino UNO. Розроблена модель дозволяє дистанційне налагодження та перевірку алгоритмів керування мобільною роботизованою платформою з подальшим перенесенням програмного коду на фізичний стенд для вивчення робототехніки, мікроконтролерних систем та технологій Інтернету речей.

Мобільна роботизована платформа (рис. 1) має чотириколісний привід і оснащена контролером Arduino UNO з драйвером двигунів, ультразвуковим датчиком відстані для сканування простору та оптичними датчиками виявлення маршрутною лінії під платформою, сонячним модулем заряджання акумулятора та контролером ESP32-CAM є перспективною основою для впровадження у виробничих процесах з метою автоматизації внутрішньоцехових операцій. Запропоноване рішення дозволяє розподілити виконавчі дії на Arduino Uno та розвантажити центральний процесор ESP32 для виконання комунікаційних операцій через інтернет. Обрана архітектура забезпечує стабільну роботу системи, високу точність позиціонування та можливість подальшого масштабування конструкції.



Рис. 1. Мобільна роботизована платформа

Особливу увагу приділено розробці програмного забезпечення системи керування. Реалізовано комунікацію через Wi-Fi мережу з виходом до інтернету та MQTT-брокером для подальшого використання даних різними пристроями. Для дистанційного керування використано мобільний застосунок Virtuino, який забезпечує інтуїтивно зрозумілий графічний інтерфейс із кнопками керування.

Для перевірки працездатності розробленої системи виконано моделювання роботи системи у середовищі Wokwi, після чого проведено тестування програмного забезпечення та алгоритмів керування. Симулятор Wokwi підтримує широкий спектр сучасних контролерів. За умови правильного налаштування він дозволяє організувати взаємодію двох контролерів у різних робочих вікнах симулятора, що забезпечує

реалізацію запропонованої архітектури проекту. Для моделювання драйвера двигунів використано компонент Custom Chip, а роботу електродвигунів імітовано за допомогою світлодіодних індикаторів, що дозволяє візуально контролювати напрямок обертання кожного двигуна. Отримані результати підтвердили можливість використання розробленої моделі та подальшого використання коду на стенді як навчально-демонстраційного комплексу для вивчення сучасних технологій робототехніки.

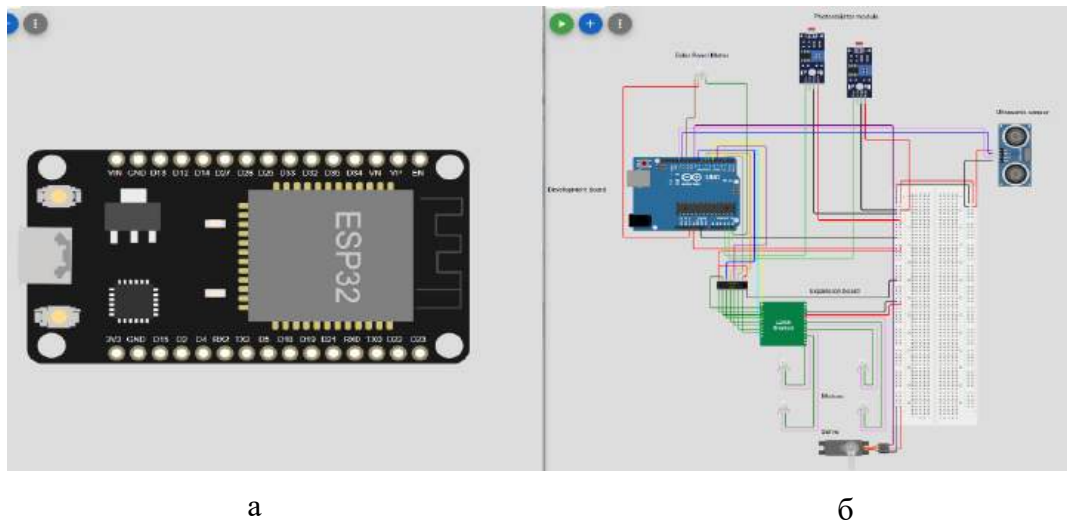


Рис 2. Модель електричної частини колісного робота на ESP32 та Arduino Uno.
а – перше робоче вікно з контролером ESP32; б – друге робоче вікно з контролером Arduino UNO

Практична цінність роботи полягає у можливості перевірки алгоритмів комунікації, а також логіку обробки даних від датчиків у віртуальному середовищі без ризику пошкодження реального обладнання. У разі використання Wokwi забезпечується вища точність симуляції з підтримкою ESP32, MQTT-брокера та інших сучасних протоколів. Отримані результати можуть бути основою для створення повнофункціонального навчального роботизованого комплексу, який може бути використаний у закладах освіти під час вивчення дисциплін, пов'язаних з робототехнікою, автоматизацією виробництва, програмуванням мікроконтролерів та Інтернетом речей. Запропоновані технічні рішення можуть бути використані як основа для створення більш складних роботизованих систем із підтримкою комп'ютерного зору, машинного навчання, голосового керування та інтеграції із хмарними сервісами.

Таким чином, результати моделювання підтвердили працездатність запропонованої архітектури мобільної роботизованої платформи та доцільність використання середовища Wokwi для відпрацювання алгоритмів керування перед їх реалізацією на фізичному стенді.

Список використаних джерел

1. Онлайн симулятор електричних кіл [Електронний ресурс] // Wokwi : сайт. – Режим доступа: <https://wokwi.com> (15.07.26)
2. Сорока А. С., Степаненко Д. Р. Дистанційна система керування колісним роботом / А. С. Сорока, Д. Р. Степаненко // Нові технології в машинобудуванні [Текст]: тези доп. Тридцять п'ятої Всеукраїн. конф. – Харків : Нац. аерокосм. ун-т «Харків. авіац.ін-т», 2025. – 230 с

ЕКСТРЕМАЛЬНА РОБОТОТЕХНІКА: КОМПЛЕКСНІ ІНЖЕНЕРНІ РІШЕННЯ ДЛЯ РОБОТИ В УМОВАХ ІОНІЗУЮЧОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ТА АГРЕСИВНОГО ВОДНОГО СЕРЕДОВИЩА

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Україна

Робототехнічні системи для експлуатації в екстремальних умовах набувають особливого значення в енергетиці, аварійно-рятувальних роботах, ядерній галузі та ліквідації наслідків техногенних катастроф. До таких умов належать середовища з підвищеним рівнем іонізуючого випромінювання, високою вологістю або повним затопленням, значними перепадами температур і обмеженим доступом людини. Проектування роботів для таких задач суттєво відрізняється від традиційних підходів і потребує комплексного врахування фізичних, матеріалознавчих та інформаційних факторів.

Одним із найбільш показових прикладів необхідності спеціалізованого підходу стала ліквідація наслідків аварії на Чорнобильській атомній електростанції у 1986 році [1]. Для очищення території від високоактивних уламків використовували дистанційно керовані роботизовані комплекси, частина яких була адаптована зі зразків техніки космічного призначення. Проте навіть високотехнологічні системи виявилися недостатньо стійкими до інтенсивного гамма-випромінювання. Основними причинами втрати працездатності стали деградація напівпровідникових компонентів, порушення роботи систем зв'язку, зниження якості оптичних систем та відмови блоків керування.

Сьогодні для захисту електроніки в умовах радіації застосовують комплексний підхід. Електронні плати закривають екранами з важких металів – свинцю, танталу або вольфраму – які ефективно послаблюють гамма-промені. Додатково додають шари борованого поліетилену або карбіду бору, що добре поглинають нейтронне випромінювання. Саму електроніку обирають спеціальну, радіаційно-стійку, наприклад на основі технології «кремній-на-ізоляторі» (КНІ), і обов'язково дублюють усі критичні канали керування: якщо один процесор «зловить збій» від радіації, резервний миттєво перехопить контроль, щоб робот не загубився і не потонував. Для корпусу звичайний метал не підходить – він швидко іржавіє у воді реактора, особливо в присутності окисників, а також накопичує радіоактивний пил, який потім неможливо відмити. Тому корпус виготовляють з титану або хромонікелевої нержавіючої сталі з обов'язковим дзеркальним поліруванням – це зменшує прилипання забруднень. Всі стики та рухомі вузли герметизують подвійними кільцями з фторкаучуку – це спеціальна гума, яка не тріскається і не розсипається від випромінювання. Окрема проблема – змащення. Звичайне мастило в суглобах робота під дією радіації полімеризується і перетворюється на тверду смолу, що призводить до заклинювання. Тому замість нього використовують сухе графітове або фторопластове наплення, а в найвідповідальніших вузлах – вакуумні мастила на основі перфторполієфірів.

Іонізуюче випромінювання чинить суттєвий вплив на електроніку через накопичення заряду в діелектричних структурах і виникнення одиничних збоїв у цифрових компонентах. В умовах підвищених доз опромінення напівпровідникові елементи втрачають стабільність характеристик, що може призводити до неконтрольованої поведінки робота або повної втрати зв'язку із системою управління.

Для забезпечення працездатності сучасних роботизованих платформ застосовують багаторівневий радіаційний захист. На фізичному рівні використовуються захисні екрани з матеріалів високої густини (вольфрам, тантал, свинець), які знижують інтенсивність гамма-випромінювання. Для ослаблення потоку нейтронів додатково застосовують боровані полімери або композиційні матеріали з карбідом бору. Електронні системи реалізують на

основі радіаційно-стійких компонентів, зокрема технологій «кремній-на-ізоляторі», що забезпечують підвищену стійкість до накопичення заряду.

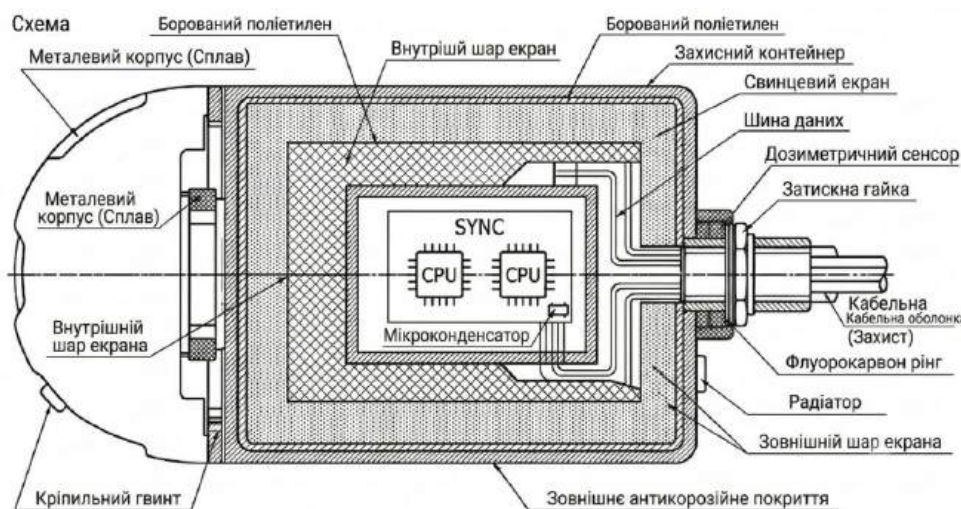


Рис. 1. Схема вузла радіаційно-стійкого бортового обладнання [2]

Не менш складним фактором є експлуатація в умовах контакту з водою. Водне середовище створює додаткові навантаження на корпус, сприяє розвитку корозійних процесів та підвищує ризик коротких замикань. Для корпусних елементів використовують титанові сплави, аустенітні нержавіючі сталі та композиційні матеріали з низькою схильністю до накопичення забруднень. Зовнішні поверхні проходять полірування для зменшення адгезії радіоактивних частинок та полегшення подальшої дезактивації.

Особливу увагу приділяють герметизації та забезпеченню працездатності рухомих вузлів. Ущільнювальні елементи виготовляють із фторкаучукових матеріалів, які характеризуються стійкістю до радіаційного старіння та впливу агресивного середовища. Традиційні мастильні матеріали в умовах інтенсивного опромінення можуть втрачати свої властивості внаслідок полімеризації та деградації структури. Тому застосовуються тверді антифрикційні покриття, графітові композиції або спеціалізовані мастила на основі перфторполієфірів.

Важливим напрямом сучасного розвитку екстремальної робототехніки є впровадження відмовостійких систем керування. Для критичних функцій використовують архітектуру резервування обчислювальних модулів, дублювання каналів передачі даних та алгоритми автоматичного відновлення після одиничних помилок. У разі перевищення допустимого рівня опромінення або виявлення проникнення води система може перейти в режим аварійного завершення місії із поверненням апарата до базової точки.

Створення роботів для експлуатації в радіаційно небезпечних та затоплених середовищах потребує інтеграції сучасних матеріалів, спеціалізованої електроніки, відмовостійких алгоритмів керування та інтелектуальних систем моніторингу. Подальший розвиток цих технологій відкриває можливість безпечного виконання складних технічних операцій без безпосередньої участі людини навіть в умовах високого рівня небезпеки.

Список використаних джерел

1. Chang Y., Zou S., Lin G., Tang D., Wei C., Xu S. Research on Radiation Damage and Reinforcement of Control and Sensing Systems in Nuclear Robots // *Electronics*. – 2024. – Vol. 13(7). – Art. 1214. DOI: 10.3390/electronics13071214.
2. Tsitsimpelis I., Taylor C. J., Lennox B., Joyce M. J. A Review of Ground-Based Robotic Systems for the Characterization of Nuclear Environments // *Progress in Nuclear Energy*. – 2019. – Vol. 111. – P. 109–124. DOI: 10.1016/j.pnucene.2018.10.023.

МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ДИСТАНЦІЙНОГО КОНТРОЛЮ ЗУСИЛЛЯ ЗАТИСКУ ЗАХОПЛЮЮЧОГО ПРИСТРОЮ МАНІПУЛЯТОРА

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Україна

Розвиток сучасних робототехнічних систем нерозривно пов'язаний із впровадженням технологій Інтернету речей, хмарних сервісів та бездротового обміну даними. Використання мережевих протоколів дозволяє організувати дистанційний моніторинг і керування роботизованими комплексами, а застосування програмних засобів моделювання забезпечує можливість відпрацювання алгоритмів ще на етапі проєктування. Особливої актуальності набуває створення навчально-дослідницьких платформ, які поєднують цифрове моделювання, мобільні засоби керування та сучасні IoT-технології, забезпечуючи швидке тестування й подальше впровадження розроблених технічних рішень.

Метою роботи є розробка та дослідження системи дистанційного контролю сили затискання захватного пристрою на базі мікроконтролера ESP32 із використанням протоколу MQTT, мобільного застосунку Virtuino та онлайн симулятора Wokwi. Основним завданням є створення програмно-апаратної моделі, що забезпечує безперервний контроль сили захоплення, передачу інформації через мережу інтернет і можливість оперативного налаштування параметрів роботи системи без перепрограмування контролера.

В основі проєкту використано мікроконтролер ESP32, який поєднує високу обчислювальну продуктивність із підтримкою бездротових технологій Wi-Fi. Для визначення сили затискання вибрано датчик FSR-400, що змінює свій електричний опір залежно від прикладеного навантаження. Аналоговий сигнал із датчика надходить на 12-ти бітний аналого-цифровий перетворювач ESP32, після чого виконується цифрова фільтрація виміряних значень для зменшення впливу випадкових шумів і забезпечення стабільності показників. На основі отриманих даних формується логічний стан захватного механізму, який характеризує ступінь контакту із захоплюваним об'єктом.

Особливу увагу в роботі приділено використанню протоколу MQTT як універсального засобу інформаційної взаємодії між пристроями Інтернету речей. Передача даних реалізована за моделлю publish-subscribe, що забезпечує незалежність джерел інформації від кінцевих споживачів даних. У проєкті використано відкритий MQTT-брокер EMQX, який виконує функції централізованого сервера обміну повідомленнями. Контролер ESP32 публікує поточні значення сили затискання, відфільтровані показники датчика, коди станів та службову інформацію, тоді як клієнтський застосунок отримує ці дані практично в режимі реального часу. Для підвищення надійності функціонування реалізовано механізм автоматичного перепідключення до брокера при

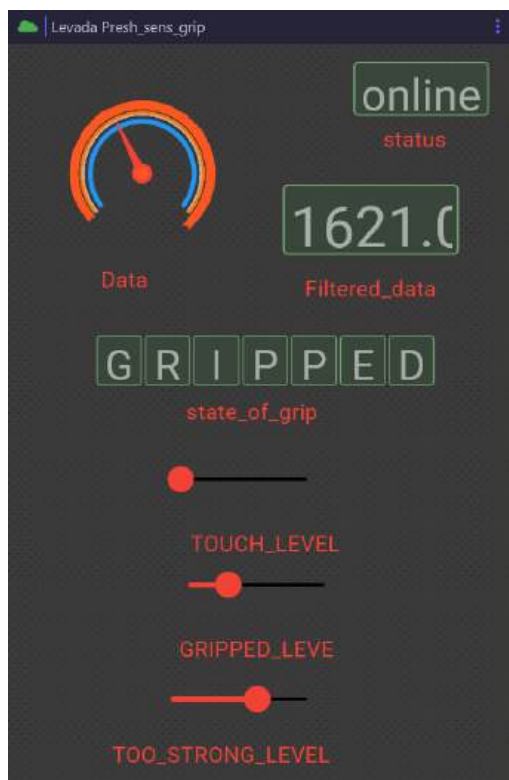


Рис. 1. Застосунок Virtuino з людино-машинним інтерфейсом

втраті мережевого з'єднання, що забезпечує безперервність моніторингу навіть за нестабільної роботи мережі.

Важливою складовою розробленої системи є використання мобільного застосунку Virtuino, який виконує функції людино-машинного інтерфейсу. На інформаційній панелі відображається поточне значення сигналу датчика, текстовий опис стану захопного пристрою та індикатори роботи системи. Крім моніторингу реалізовано можливість дистанційного налаштування параметрів роботи алгоритму. За допомогою слайдерів користувач може змінювати визначення легкого контакту, надійного захоплення та критичного перевищення сили затискання. Нові значення миттєво передаються через MQTT до контролера, що дозволяє адаптувати систему до різних типів об'єктів без внесення змін у програмний код. Такий підхід значно підвищує універсальність розробленої системи та суттєво спрощує процес експлуатації.

Для попередньої перевірки працездатності системи використано онлайн-симулятор Wokwi, який забезпечує моделювання роботи ESP32, електронних компонентів. Та мережевої взаємодії між пристроями. Використання середовища моделювання дозволило перевірити алгоритми обробки аналогових сигналів, функціонування MQTT-зв'язку, взаємодію з панеллю Virtuino, а також роботу світлової та звукової індикації без застосування реального обладнання. Під час моделювання замість фізичного датчика сили використовувався змінний резистор, що забезпечило можливість плавної зміни значення сигналу та дослідження реакції програмного забезпечення на різні режими роботи. Такий підхід значно скорочує тривалість налагодження системи та дозволяє швидко виявляти можливі помилки програмної логіки ще до складання фізичного макета.

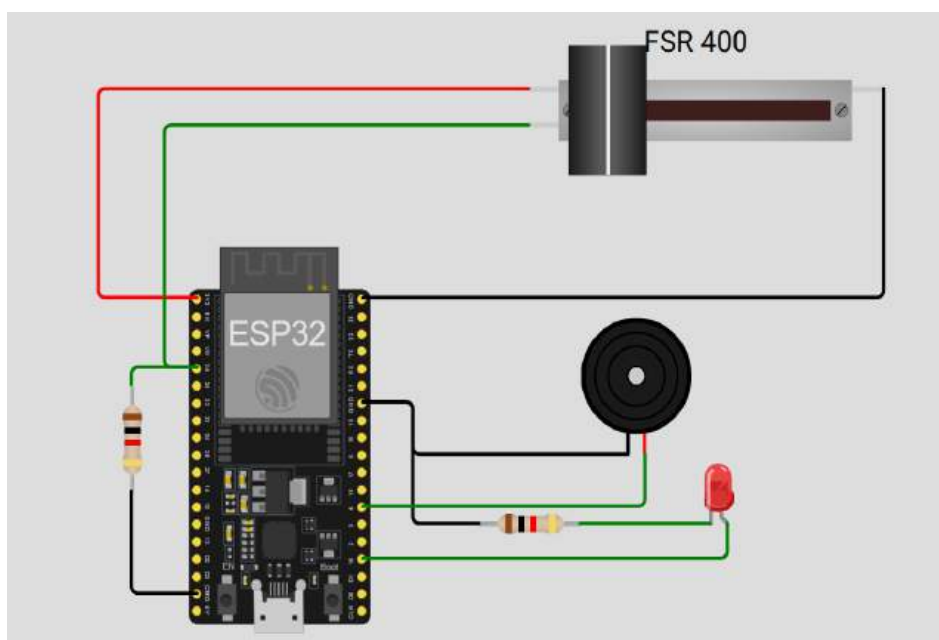


Рис. 2. Модель системи дистанційного контролю зусилля затиску захоплюючого пристрою маніпулятора

Розроблений алгоритм керування забезпечує автоматичне визначення чотирьох функціональних станів захопного пристрою: відсутність контакту з об'єктом (NO_TOUCH), початковий контакт (TOUCH), надійне захоплення (GRIPPED) та перевищення допустимого зусилля (TOO_STRONG). Для кожного режиму реалізовано відповідну світлову та звукову індикацію, а також передачу інформації через MQTT до панелі моніторингу. Завдяки цьому оператор отримує актуальну інформацію про процес захоплення об'єкта та може своєчасно змінити параметри роботи системи.

Практична цінність роботи полягає у створенні програмно-апаратної платформи, яка поєднує цифрове моделювання, дистанційне керування та сучасні засоби мережевої взаємодії.

Використання Wokwi дозволяє виконувати повноцінне тестування алгоритмів без ризику пошкодження обладнання, MQTT забезпечує надійний інформаційний обмін між пристроями, а Virtuino надає зручний інструмент дистанційного моніторингу та налаштування параметрів роботи системи. Отримані результати можуть бути використані під час створення навчальних лабораторних стендів, цифрових двійників робототехнічних комплексів, системи автоматизації виробництва та інших IoT-рішень.

Таким чином, результати проведених досліджень підтвердили ефективність використання комплексного підходу, що поєднує технології MQTT, Virtuino та Wokwi для розроблення робототехнічних систем. Запропонована архітектура забезпечує високу гнучкість, масштабованість і можливість швидкого тестування програмного забезпечення, що відкриває перспективи подальшої інтеграції систем комп'ютерного зору, машинного навчання та хмарної аналітики у сучасні роботизовані комплекси.

Список використаних джерел

1. Онлайн симулятор електричних кіл [Електронний ресурс] // Wokwi : сайт. – Режим доступу: <https://wokwi.com> (15.07.26)
2. Онлайн редактор [Електронний ресурс] // chatgpt : сайт. – Режим доступу: <https://chatgpt.com/> (15.07.26)

ОПТИМІЗАЦІЯ СТРУКТУРИ РОБОТИЗОВАНИХ КОМПЛЕКСІВ ДЛЯ БАГАТОНОМЕНКЛАТУРНОГО ВИРОБНИЦТВА

Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна

Сучасна світова промисловість перебуває на етапі глобальної трансформації, що характеризується переходом від багатосерійного виробництва до дрібносерійного, або навіть одиничного типу виробництва. Споживчий попит вимагає від підприємств постійного оновлення асортименту, високої якості продукції та мінімальних термінів виходу на ринок. За таких умов традиційні жорсткі виробничі системи втрачають свою ефективність через тривалий і вартісний процес переналагодження.

Одним з інструментів вирішення цієї проблеми є впровадження роботизованих технологічних комплексів (РТК). Вони мають потенціал забезпечити необхідну гнучкість, автономність та точність виконання операцій. Проте, ефективність РТК у багатомономенклатурному виробництві критично залежить від їхньої структури – як апаратної (конфігурація маніпуляторів, типи захватів, системи сенсорики), так і компоувальної.

Більшість сучасних методів проектування РТК орієнтовані на циклічне виконання однотипних операцій. За частоті зміни номенклатури виробів виникають «вузькі місця», такі як неоптимальні траєкторії руху, простої обладнання під час переналагодження, надмірність або недостатність функціоналу модулів.

Створення високоефективних РТК потребує обґрунтованого аналізу складу їхньої елементної бази, особливостей будови й функціонування компонентів, а також їхнього компоувального розміщення та взаємозв'язків із виробничим оточенням. Дослідження базових варіантів побудови РТК показує, що комплекс може містити різну кількість технологічного обладнання (ТО), промислових роботів (ПР) та допоміжних пристроїв (ДП), які виконують подавально-приймальні, або окремо подавальні чи приймальні функції.

Залежно від кількості ТО та ДП виділяють такі типові початкові структури будови РТК [1]: одноверстатні структури з одним допоміжним пристроєм (рис. 1, а), це мінімальний базовий модуль для виконання локальних операцій; одноверстатні структури з двома допоміжними пристроями (рис. 1, б), які дозволяють чітко розмежувати зони подачі заготовок та приймання готових деталей; двоверстатні (і більше) структури з кількома допоміжними пристроями, що забезпечують складніші багатоопераційні технологічні цикли (рис. 1, в).

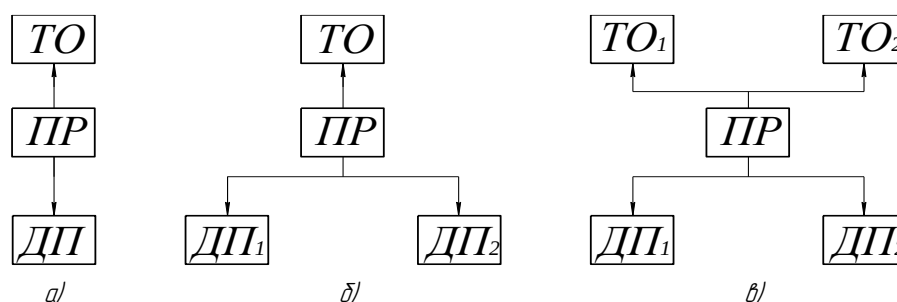


Рис. 1. Структура будови РТК [1]

При проектуванні РТК для умов багатомономенклатурного виробництва виникає значна складність через необхідність адаптації системи до частоті зміни об'єктів обробки. Зміна номенклатури деталей вимагає миттєвої перебудови структури переміщення компонентів всередині комплексу. Також широка номенклатура виробів вимагає від промислового робота

виконання складних рухів як по переміщенню, так і по орієнтуванню. Оскільки варіантів комбінацій компоновального розміщення, типів ТО та допоміжних пристроїв може бути дуже багато, визначення найбільш доцільного виконання перетворюється на важку комбінаторну задачу.

Отже, традиційні підходи до побудови жорстких однономенклатурних РТК є неефективними в сучасних ринкових умовах. Для подолання окреслених проблем та пошуку раціональних варіантів комплексів необхідне впровадження структурного підходу. Розробка та аналіз багатоваріантних структур функціонування є тією фундаментальною основою, яка дозволяє ще на початковому етапі проектування обґрунтовано визначати оптимальні планувальні та логічні параметри РТК для роботи з широкою номенклатурою виробів [2].

Проектування роботизованих комплексів для багатноменклатурного виробництва характеризується необхідністю одночасного врахування великої кількості взаємопов'язаних факторів, серед яких продуктивність, гнучкість, надійність, вартість, можливість модернізації та рівень автоматизації. На відміну від спеціалізованих виробничих систем, у багатноменклатурному виробництві структура комплексу повинна забезпечувати ефективне виконання широкого спектра технологічних операцій за мінімального часу переналагодження. Це обумовлює необхідність застосування системного підходу до структурної оптимізації, який дозволяє оцінювати не окремі елементи комплексу, а їх взаємодію в межах єдиної виробничої системи [3, 4].

Запропонований підхід передбачає послідовне виконання чотирьох взаємопов'язаних етапів: формування критеріїв оптимізації, побудову структурної моделі роботизованого комплексу, багатокритеріальну оптимізацію можливих структур та оцінювання альтернативних варіантів із вибором найбільш ефективного рішення.

Першим етапом є визначення системи критеріїв, які найбільш повно характеризують ефективність роботизованого комплексу. Оскільки жоден окремий показник не може відобразити всі особливості функціонування виробничої системи, оптимізацію доцільно проводити за сукупністю взаємодоповнюючих критеріїв.

До основних критеріїв можуть бути віднесені: продуктивність комплексу; коефіцієнт завантаження роботів та технологічного обладнання; тривалість виробничого циклу; рівень гнучкості щодо зміни номенклатури виробів; капітальні та експлуатаційні витрати; надійність і відмовостійкість структури; можливість масштабування та модернізації комплексу [5].

Оскільки окремі критерії можуть бути суперечливими (наприклад, максимальна продуктивність часто потребує значних капіталовкладень), їх одночасний розгляд дозволяє отримати компромісне рішення, що найбільшою мірою відповідає виробничим умовам.

Після визначення критеріїв формується структурна модель роботизованого комплексу. Вона повинна відображати склад обладнання, взаємозв'язки між окремими елементами та можливі варіанти організації матеріальних і інформаційних потоків.

Структуру комплексу доцільно розглядати як орієнтований граф:

$$G = (V, E), \quad (1)$$

де V – множина структурних елементів комплексу (роботи, технологічні модулі, транспортні системи, накопичувачі, контрольні пристрої тощо);

E – множина зв'язків між ними, що характеризують передачу матеріальних потоків, інформації або керуючих впливів.

Кожній вершині графа можуть бути поставлені у відповідність технічні характеристики обладнання (продуктивність, робоча зона, вантажопідйомність, надійність), а кожному зв'язку – параметри взаємодії між елементами (час транспортування, пропускна здатність, інтенсивність інформаційного обміну).

Такий спосіб представлення дозволяє формалізувати структуру комплексу та забезпечує можливість її математичного аналізу незалежно від конкретного технологічного призначення виробництва.

Враховуючи наявність кількох критеріїв ефективності, задача структурної оптимізації належить до класу багатокритеріальних задач прийняття рішень. Метою оптимізації є

знаходження такої структури комплексу, яка забезпечує найкраще співвідношення між продуктивністю, гнучкістю, вартістю та іншими показниками.

У загальному вигляді задача може бути записана як

$$F(X) = (f_1(X), f_2(X), \dots, f_n(X)) \rightarrow \text{opt}, \quad (2)$$

де X – множина структурних параметрів комплексу;

$f_i(X)$ – окремі критерії ефективності.

Для розв'язання таких задач можуть застосовуватися різні методи багатокритеріальної оптимізації, зокрема метод вагових коефіцієнтів, метод аналізу ієрархій, метод Парето-оптимальних рішень, еволюційні методи оптимізації тощо.

Вибір конкретного методу визначається складністю структури комплексу, кількістю альтернативних варіантів та доступністю вихідної інформації. Для багатоміністерського виробництва перспективним є застосування еволюційних алгоритмів, оскільки вони дозволяють ефективно досліджувати великий простір можливих структур і знаходити близькі до глобального оптимуму рішення.

Завершальним етапом є порівняння сформованих варіантів структури роботизованого комплексу. Для кожного варіанта визначаються значення прийнятих критеріїв ефективності, після чого здійснюється їх нормалізація та інтегральне оцінювання.

При цьому доцільно враховувати не лише номінальні значення показників, але й стійкість структури до зміни виробничих умов, можливість швидкої реконфігурації комплексу при появі нової продукції, а також резерв продуктивності для подальшого розширення виробництва.

За результатами аналізу формується множина структур, а остаточний вибір здійснюється з урахуванням стратегічних цілей підприємства, економічних обмежень та перспектив розвитку виробництва.

Таким чином, запропонований підхід забезпечує комплексне обґрунтування структури роботизованого комплексу ще на етапі його проектування, дозволяє мінімізувати ризик прийняття неоптимальних конструктивних рішень та створює передумови для підвищення ефективності функціонування роботизованих виробничих систем в умовах багатоміністерського виробництва. Він також є універсальним і може бути адаптований до різних типів роботизованих комплексів незалежно від виду технологічних процесів, що виконуються.

Список використаних джерел

1. Mazhara, V., Artiukhov, A., Hodunko, M., Shcherbyna, K., & Tenenka, S. (2025). Structural Design of Robotic Complexes.
2. Павленко І.І., Мажара В.А. Структура продуктивності верстатних роботизованих комплексів // Збірник наукових праць. – Вип. 17 Краматорськ: ДДМА, 2005. – С. 131 – 137.
3. Павленко І.І., Мажара В.А. Дослідження впливу використання двозахватних пристроїв на продуктивність роботи РТК // Машиностроение и техносфера XXI века. Сборник трудов XIII международной научно-технической конференции в г. Севастополе. В 5-ти томах. – Донецьк: ДонНТУ, 2006. Т.5 – С. 282 – 287.
4. Павленко І.І., Мажара В.А. Конструктивно-кінематична структура двозахватних пристроїв промислових роботів. Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем : Збірник наукових праць. Вип. 19. Краматорськ; Київ, 2006. С. 104 – 109.
5. Мажара, В.А., Годунко, М.О. (2018). Основи гнучкого автоматизованого виробництва. Кропивницький : ЦНТУ, 2018. 32 с.

6. ТЕХНОЛОГІЯ АГРЕГАТОБУДУВАННЯ

УДК 621.865.6

Бреус А.О.¹, к.т.н., доцент
Andrii.Breus@kname.edu.ua
Малашта П.П.², аспірант
p.p.malashta@khai.edu
Головко С.Т.², аспірант
s.holovko@khai.edu

РОЗРОБКА БЛОКУ УЗГОДЖЕННЯ СИГНАЛІВ ДЛЯ ВАКУУМНО-ДУГОВОГО ДВИГУНА СУПУТНИКА ФОРМАТУ CUBESAT

Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, Україна
Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Україна

Стрімкий розвиток малих космічних апаратів класу CubeSat зумовлює необхідність створення компактних, енергоефективних та надійних рушійних систем, здатних забезпечувати виконання маневрів, корекцію орбіти та орієнтацію супутників. Одним із перспективних напрямів є використання вакуумно-дугових двигунів, принцип роботи яких базується на ерозії металевого катода під дією дугового розряду з подальшим прискоренням плазмового потоку. У процесі розробки та експериментальних досліджень вакуумно-дугового двигуна для малогабаритних супутників формату CubeSat виникла потреба у створенні спеціалізованих електронних пристроїв, які забезпечували б надійну роботу двигуна та можливість контролю його основних електричних параметрів під час випробувань. З цією метою було спроектовано та виготовлено блок узгодження сигналів (рисунок 1), призначений для підключення до осцилографа та інших систем збору даних.



Рис. 1. Блок узгодження сигналів

Основним завданням блоку є забезпечення коректного та безпечного знімання електричних характеристик двигуна під час його роботи. Оскільки вакуумно-дуговий розряд супроводжується високими імпульсними напругами та струмами, а також виникненням електромагнітних завад, безпосереднє підключення вимірювальної апаратури може призвести до пошкодження обладнання або спотворення отриманих сигналів. Розроблений блок забезпечує гальванічну розв'язку, фільтрацію, зниження амплітуди та масштабування сигналів до рівня, безпечного для вимірювальної техніки.

Другим важливим елементом експериментальної системи є імпульсне джерело живлення, розроблене для забезпечення необхідних режимів роботи вакуумно-дугового двигуна та його системи запалювання. Надійне формування та подавання імпульсу запалювання є важливою умовою стабільного запуску дугового розряду та забезпечення відтворюваності експериментів.

Після виготовлення розроблених пристроїв було проведено їх натурні випробування у складі експериментальної установки. Під час випробувань перевірено працездатність імпульсного джерела живлення та блоку узгодження сигналів, а також можливість реєстрації електричних параметрів вакуумно-дугового двигуна під час його роботи. Отримані результати підтвердили працездатність розроблених пристроїв та їх придатність для подальших експериментальних досліджень.

Під час експериментальних досліджень роботи вакуумно-дугового двигуна додатково проводилася спектральна реєстрація випромінювання плазми за допомогою спектрометра виробництва ASEQ Instruments. Отримані спектральні характеристики дозволяють досліджувати особливості плазмового потоку та процесів, що відбуваються під час формування дугового розряду.

Поєднання спектральних вимірювань із реєстрацією електричних параметрів двигуна забезпечує можливість комплексного аналізу його робочих режимів. Подальшим етапом досліджень передбачається розробка та впровадження експериментальної методики безпосереднього вимірювання тяги вакуумно-дугового двигуна. Це дозволить доповнити результати дослідження електричних і спектральних характеристик кількісною оцінкою тягових властивостей двигуна. Комплексний аналіз отриманих даних створить можливість оцінити ефективність роботи рушійної системи та визначити оптимальні режими її функціонування для подальшого застосування у супутниках формату CubeSat.

Список використаних джерел

1. Бреус, А. О. Джерело живлення для ініціювання та підтримання розряду вакуумно-дугового двигуна супутника формату CubeSat / А. О. Бреус, П. П. Малашта, Є. О. Баранова // Нові технології в машинобудуванні : матеріали XXXV Всеукр. конф., 2–5 верес. 2025 р., Харків / Нац. аерокосм. ун-т «ХАІ» [та ін.]. – Харків, 2025. – 228 с. – URL: https://library.khai.edu/library/fulltexts/metod/Novi_Tekhnologii2025.pdf
2. Бреус, А. О. Розробка дослідного зразка вакуумно-дугового двигуна для супутників типу CubeSat / А. О. Бреус, С. Т. Головкин // Сучасні проблеми двигунобудування, енергетики та інтелектуальної механіки : матеріали Відкритої наук.-практ. конф., 15–16 трав. 2025 р., Харків / Нац. аерокосм. ун-т «ХАІ» [та ін.]. – Харків, 2025. – 150 с. – URL: https://drive.google.com/file/d/1UoM3aLJvxmGuERkqvA_TtN7BJtY8pDp7/view
3. Запалювання вакуумно-дугового розряду в технологічних джерелах плазми потоків / Ю. А. Сисоєв, Ю. В. Широкий // VII Міжнародна конференція «Високочисті матеріали: отримання, застосування, властивості» 15–17 вересня 2025р. м. Харків. – С.61–62.

АНАЛІЗ ОСНОВНИХ КОМПОНЕНТІВ ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ ТА ВИМОГИ ДО НИХ

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут»

Газотурбінний двигун складається з трьох основних компонентів: компресора, камери згорання та турбіни рисунок 1.

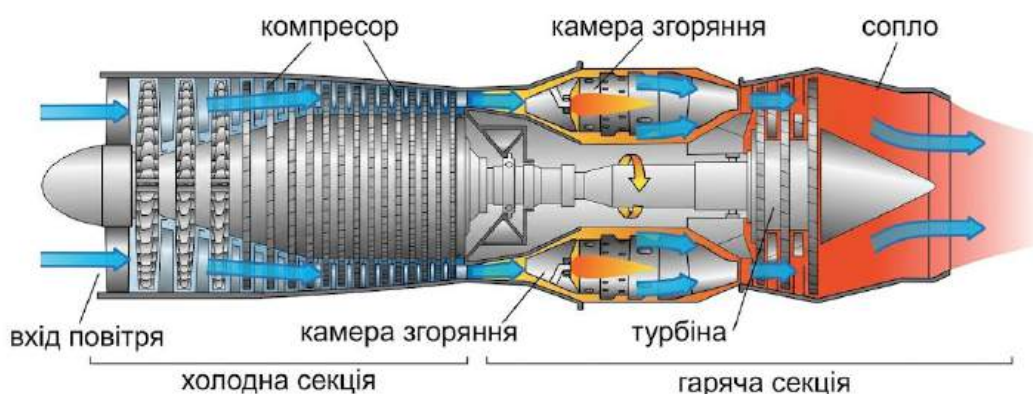


Рис. 1. Схематичне зображення газотурбінного двигуна

Компресор – елемент газотурбінного двигуна, від ступеня аеродинамічної та конструктивної досконалості якого залежать потужність (тяга), економічність, габаритні розміри, маса, надійність та ресурс двигуна.

Основні вимоги до компресорів:

1. забезпечення заданої секундної витрати повітря;
2. забезпечення необхідного ступеня підвищення тиску;
3. забезпечення стійкої роботи у широкому діапазоні частот обертання ротора.

Камера згорання. У газотурбінних двигунах процес підведення теплоти до потоку робочого тіла здійснюється в камері згорання. Теплова енергія утворюється внаслідок перетворення хімічної енергії палива. При цьому температура робочого тіла зростає від температури після компресора до температури на вході в турбіну.

Основні вимоги до камер згорання:

1. мінімальні габаритні розміри;
2. висока повнота згорання палива на всіх режимах роботи двигуна;
3. мінімальні втрати повного тиску;
4. широкий діапазон стійкого горіння;
5. надійне запалювання палива в наземних та висотних умовах;
6. відсутність вібраційного горіння;
7. температурне поле на виході з камери повинно відповідати допустимим напруженням у робочих лопатках турбіни та сопловому апараті;
8. рівень викидів диму, незгорілого палива та газоподібних речовин повинен відповідати чинним авіаційним нормативам та міжнародним екологічним вимогам;
9. відсутність нагароутворення на елементах конструкції камери.

Турбіна. Процес розширення газу відбувається в турбіні – лопатковій машині, що перетворює потенціальну енергію газу (стисненого компресором і нагрітого внаслідок згорання палива в камері згорання) у механічну роботу на валу.

Перетворення енергії здійснюється у нерухомому лопатковому вінці соплового апарата та обертовому вінці робочого колеса. Сопловий апарат складається із соплових лопаток, а робоче колесо – з робочих лопаток. Разом із деталями корпусу вони формують проточну частину турбіни.

Основні вимоги до турбін:

1. максимальний коефіцієнт корисної дії;
2. мінімальна витрата охолоджувального повітря;
3. мінімальна виробнича собівартість;
4. мінімальна вартість технічного обслуговування;
5. забезпечення необхідного ресурсу основних деталей;
6. наявність температурного запасу перед турбіною.

Виходячи з вимог до основних елементів газотурбінного двигуна, визначаються матеріали для виготовлення його компонентів та вимоги до них (таблиця 1).

Таблиця 1 – Вимоги до матеріалів основних компонентів ГТД

Компонент	Робоча температура	Вимоги до матеріалу	Матеріал
Компресор (диски)	400–650 °C	висока міцність; стійкість до відцентрових навантажень; опір втомі	титанові сплави, сплави на основі нікелю
Компресор (лопатки)	400–650 °C	втомна міцність; ерозійна стійкість	титанові сплави, сталі, нікелеві сплави
Камера згоряння	до 1550 °C	стійкість до термічних ударів; опір окисненню та газовій корозії	сплави на основі нікелю
Турбіна (диски)	до 950 °C	міцність при відцентрових і осьових навантаженнях; жароміцність; опір повзучості; жаростійкість	сплави на основі нікелю
Турбіна (лопатки)	до 950 °C	стійкість до термічних ударів	сплави на основі нікелю, інтерметаліди

Проаналізувавши дані таблиці 1, можна зробити висновок, що найбільш навантаженим компонентом газотурбінного двигуна є турбіна, а саме її лопатки.

Для забезпечення необхідних експлуатаційних характеристик матеріал лопаток повинен мати комплекс спеціальних властивостей, якими значною мірою володіють жароміцні нікелеві сплави. Проте через значну кількість легувальних елементів подальше підвищення термостабільності таких сплавів суттєво ускладнюється.

Поряд із високою жароміцністю лопатки повинні мати достатню жаростійкість, що не завжди досягається лише за рахунок легування сучасних сплавів.

Зниження температури металу навіть на 30–60 °C дозволяє суттєво продовжити ресурс експлуатації газотурбінних двигунів. Одним із ефективних способів досягнення цього є застосування теплозахисних покриттів – багатошарових систем, які складаються з внутрішнього металевого жаростійкого шару та зовнішнього керамічного теплоізоляційного шару [1].

Використання таких покриттів сприяє зменшенню витрат охолоджувального повітря, підвищенню ефективності роботи турбіни та збільшенню довговічності лопаток.

Список використаних джерел

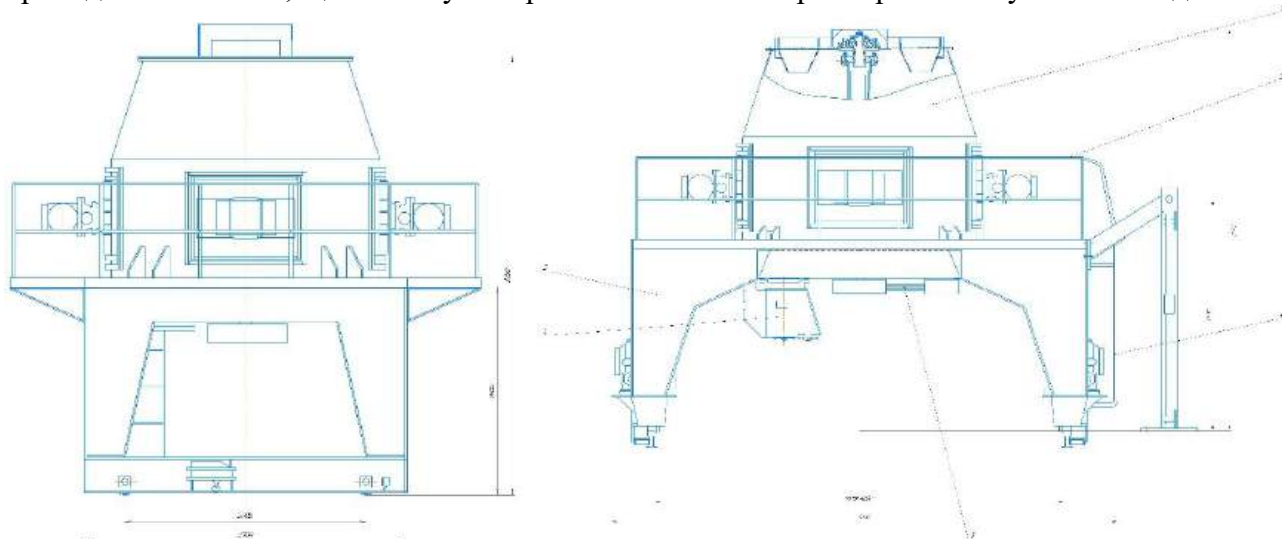
1. Підвищення ефективності деталей машин та різального інструменту комбінованими методами обробки / Ю. В. Широкий, Ю. О. Сисоєв, О. Д. Семененко, О. В. Торосян. // Відкриті інформаційні та комп'ютерні інтегровані технології, 2025, No 106, С 84-107. <https://doi.org/10.32620/oikit.2025.106.06>

УДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ РОБОЧОГО ОРГАНУ ВІБРОГАЗОБЕТОНОЗМІШУВАЧА ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРИГОТУВАННЯ ГАЗОБЕТОННОЇ СУМІШІ

Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова

Виробництво виробів з автоклавного комірчастого бетону характеризується високими вимогами до стабільності технологічного процесу та якості приготування газобетонної суміші. Однорідність розподілу в'язучих компонентів, алюмінієвої суспензії та води безпосередньо визначає рівномірність пороутворення, середню густину, міцність і теплофізичні характеристики готових виробів. Одним із найбільш відповідальних етапів технологічного процесу є змішування компонентів, від ефективності якого залежить якість газобетонного масиву та економічність роботи виробничої лінії.

Аналіз конструкцій віброгазобетонозмішувачів показує, що традиційні робочі органи не забезпечують повного використання енергії привода. Значна частина потужності витрачається на подолання гідродинамічного опору суміші, тоді як інтенсивність її перемішування залишається недостатньою. Суцільні лопаті створюють підвищені динамічні навантаження на приводний механізм, що збільшує енергоспоживання та прискорює зношування обладнання.



1 – змішувач; 2 – портал; 3 – привод змішувача; 4 – розвантажувальний пристрій;
5 – огороження; 6 – сходи.

Рис. 1. Віброгазобетонозмішувач

Перспективним напрямом удосконалення змішувального обладнання є модернізація конструкції робочого органу. Рациональний вибір геометрії лопатей, кута їх встановлення та конструктивного виконання дозволяє інтенсифікувати циркуляцію бетонної суміші, покращити диспергування газоутворювача та забезпечити більш рівномірний розподіл компонентів.

Запропоновано використовувати ротор із похило розташованими перфорованими лопатями. Завдяки перфорації зменшується площа взаємодії лопаті із середовищем, що сприяє зниженню гідродинамічного опору та навантаження на електропривод. Одночасно частина суміші проходить крізь отвори, утворюючи локальні турбулентні потоки, які покращують

процес перемішування. Похиле розташування лопатей забезпечує інтенсивну просторову циркуляцію матеріалу без утворення застійних зон.

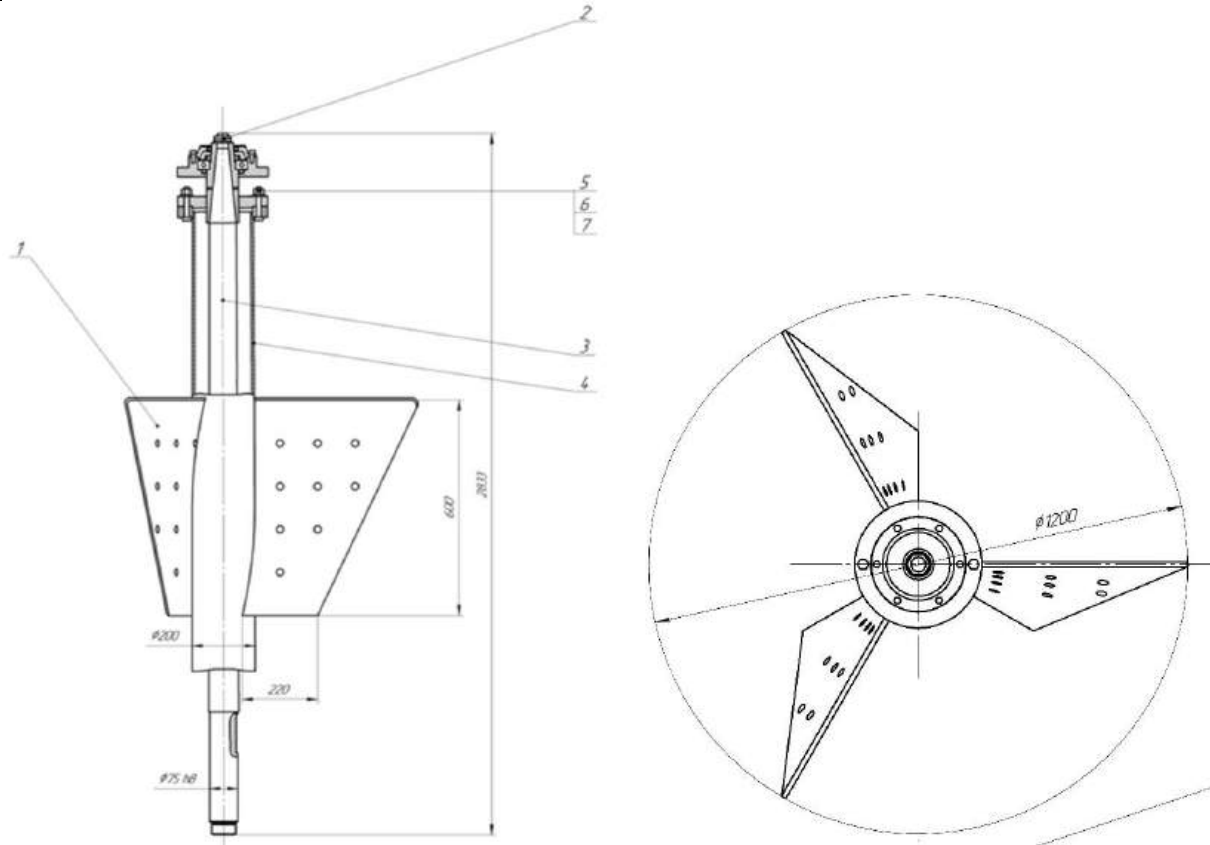


Рис. 2. Робочий орган віброгазобетонозмішувача

Застосування модернізованого ротора дозволяє скоротити тривалість циклу приготування газобетонної суміші, забезпечити більш рівномірне введення алюмінієвої суспензії та підвищити однорідність структури майбутнього газобетону. При цьому зменшуються питомі витрати електроенергії, знижуються динамічні навантаження на приводний механізм і підвищується довговічність вузлів машини.

Практична цінність запропонованого рішення полягає у можливості модернізації існуючих віброгазобетонозмішувачів без суттєвої зміни їх компоновки. Заміна традиційного робочого органу на модернізований ротор не потребує повного переоснащення виробничої лінії, що зменшує капітальні витрати підприємства.

Таким чином, удосконалення конструкції робочого органу віброгазобетонозмішувача є ефективним способом підвищення продуктивності обладнання, покращення якості приготування газобетонної суміші та зниження енергоємності технологічного процесу.

Список використаних джерел

1. Ferraris C. (2001). Concrete Mixing Methods and Concrete Mixers: State of the Art, Journal of Research (NIST JRES). National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD. Режим доступу: https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=860285
2. Нестеренко М. М., Нестеренко Т. М., Пімінов І. Г., Аніщенко А. І. (2026). Дослідження кута встановлення лопаток змішувача примусової дії з вертикальним валом у системі «змішувач-бетононасос». Системні технології, 4(165), 213-224. Режим доступу: <https://journals.nmetau.edu.ua/index.php/st/uk/article/view/2358>

УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВІБРОПРЕСУВАННЯ БЕТОННИХ ГЕОРЕШІТОК ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИРОБНИЦТВА

Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова

Сучасне будівництво потребує впровадження матеріалів, що поєднують високі механічні характеристики, довговічність, економічність та екологічність. Одним із таких виробів є бетонні георешітки (рис. 1), які широко застосовуються для укріплення транспортної інфраструктури, берегових укосів, стоянок автомобілів, промислових майданчиків та територій благоустрою. Завдяки комірчастій структурі вони забезпечують ефективний розподіл навантаження, сприяють природному водовідведенню та дозволяють зберігати рослинний покрив, що відповідає сучасним принципам сталого будівництва.



Рис. 1. Георешітка бетонна

Останніми роками значно збільшилися вимоги до довговічності бетонних виробів та продуктивності підприємств будівельної індустрії. Водночас традиційні технологічні рішення не завжди забезпечують необхідну стабільність геометричних параметрів виробів, високу продуктивність обладнання та мінімальне енергоспоживання. Особливо це стосується виробництва бетонних георешіток, для яких важливо забезпечити однакову щільність бетону по всьому перерізу виробу, оскільки саме від цього залежать їх міцність, морозостійкість та довговічність.

Таким чином, актуальною науково-технічною задачею є вдосконалення технології вібропресування та конструктивних параметрів формувального обладнання для отримання виробів стабільної якості при одночасному підвищенні продуктивності виробничої лінії.

Відомо, що найбільш ефективним способом виготовлення бетонних георешіток є вібропресування жорстких бетонних сумішей. Застосування низького водоцементного відношення дозволяє отримувати вироби з високою міцністю, морозостійкістю та водонепроникністю. Одночасна дія вібрації та статичного пресування забезпечує інтенсивне ущільнення бетонної суміші, видалення повітряних пор, формування щільної структури бетону та скорочення часу формування виробів.

У технологічній лінії виробництва бетонних георешіток методом вібропресування застосовано вібропрес ВІП-6ПБ. Проведений аналіз конструкції обладнання свідчить, що ефективність ущільнення значною мірою визначається частотою коливань, амплітудою, статичним пригрузом, характеристиками віброзбуджувачів та параметрами гідроприводу. Правильне узгодження цих величин забезпечує формування однорідної структури бетону без розшарування суміші та мінімізує ризик утворення внутрішніх дефектів.

Крім конструктивного вдосконалення обладнання (рис. 2), важливим напрямом підвищення ефективності виробництва є оптимізація складу жорсткої бетонної суміші.

Використання сучасних пластифікаторів, мінеральних добавок та оптимального зернового складу заповнювачів забезпечує покращення ущільнюваності суміші без збільшення водоцементного відношення. Це сприяє підвищенню міцності, морозостійкості, зносостійкості та довговічності готових бетонних георешіток.

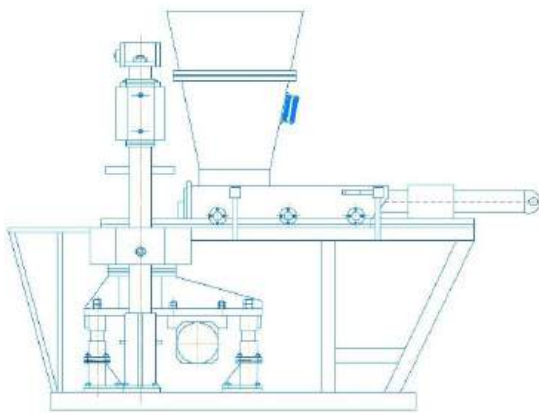


Рис. 2. Вібропрес ВІП-6 ПБ

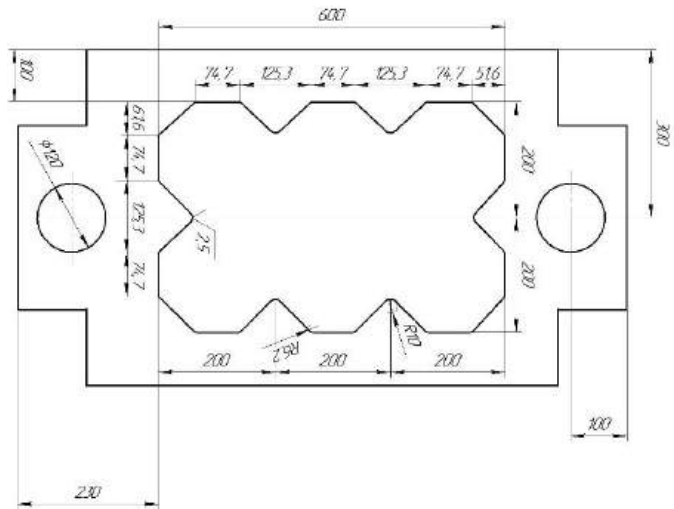


Рис. 3. Матриця вібропресу

Запропонований підхід дозволяє комплексно підвищити техніко-економічну ефективність виробництва бетонних георешіток. Скорочення тривалості циклу формування, підвищення стабільності геометричних параметрів виробів, зниження кількості браку та покращення експлуатаційних характеристик продукції забезпечують конкурентоспроможність виробництва в сучасних умовах розвитку будівельної галузі.

Таким чином, одним з найбільш перспективних напрямів підвищення ефективності виробництва бетонних георешіток є комплексне вдосконалення технології вібропресування та конструкції формувального обладнання. Раціональний вибір параметрів вібрації, пресування та складу жорсткої бетонної суміші забезпечує отримання виробів із високими фізико-механічними характеристиками, зменшує енерговитрати виробництва та підвищує продуктивність технологічної лінії. Отримані результати можуть бути використані під час модернізації підприємств будівельної індустрії.

Список використаних джерел

1. Житковський В., Дворкін Л. (2021). Вплив дисперсного армування на властивості дорожніх бетонів, отриманих шляхом вібропресування наджорстких сумішей. Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету, 2(92), 24-24. DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2021.92.2.24
2. Nesterenko M., Panfilov O., Pyrlyk, M. (2023). Loaders for Concrete Compaction. Academic journal Industrial Machine Building Civil Engineering, 2(61), 80-85. DOI: 10.26906/znp.2023.61.3874
3. Gerasymenko V., Protsenko O., Lus V., Bielykh I. (2024). Calculation of structural parameters of a vibratory machine. Academic journal Industrial Machine Building Civil Engineering, 2(63), 79-84. DOI: 10.26906/znp.2024.63.3887

АВТОМОБІЛЬ З РОЗШИРЕНИМИ ФУНКЦІОНАЛЬНИМИ МОЖЛИВОСТЯМИ

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут»

Автомобіль є одним з найбільш поширених транспортних засобів, які використовує людина. Існує багато моделей автомобілів, що випускаються в різних країнах. Серед автомобілів що виготовляються є моделі, які мають назву «позашляховики». Вони мають підвищену прохідність, на сам перед за рахунок використання більш потужних двигунів, а також за рахунок деяких конструктивних особливостей, на відміну від звичайних автомобілів. Однак ці автомобілі також мають обмеження за своїми можливостями і можуть подолати не всі перешкоди, які виникають на їхніх шляхах. Такими перешкодами можуть бути заболочені ділянки, яри, невеликі височини, водні перешкоди і т. інше. У зв'язку з цим виникла ідея доробити конструкцію автомобіля позашляховика, яка б забезпечувала йому додаткові можливості. Одним з варіантів вирішення цієї проблеми є використання повітряних гвинтів на даху автомобіля, які б забезпечили йому підйом у повітря і короткочасний політ у повітрі. Це була основна ціль даного проекту. Для реалізації поставленої цілі вирішувались наступні завдання:

1. Розроблена конструкція трансмісії приводу гвинтів повинна бути простою, міцною і надійною.
2. Додаткова конструкція приводу гвинтів повинна мати як найменшу вагу, щоб вона незначно збільшила загальну вагу автомобіля.
3. Вартість автомобіля з запропонованими доробками не повинна значно збільшитись, щоб такий автомобіль був доступний широкому колу покупців.
4. Зовнішній вигляд доробленого автомобіля повинен бути таким, щоб він незначно відрізнявся від звичайних існуючих моделей.

Для приводу підйомних гвинтів розглядались два варіанти:

1. Привід гвинтів з використанням двигуна автомобіля.
2. Привід гвинтів з використанням додаткового електродвигуна.

В результаті проведеного аналізу був обраний варіант приводу з використанням двигуна автомобіля, тому що він найбільш відповідає поставленим чотирьом завданням. В запропонованій конструкції автомобіля для приводу гвинтів передбачена додаткова швидкість, при включенні якої на розподільчому валу переміщується конічна шестерня і рух від двигуна передається на гвинти. Одночасно при переміщенні конічної шестерні роз'єднується передача руху на колеса автомобіля.

Для створення підйомної сили на даху автомобіля встановлені два гвинта: передній і задній. Вони розташовані в окремому корпусі і зверху закриті двома розсувними кришками. Для переміщення кришок використовується низько обертовий електродвигун малих розмірів, на валу якого встановлено зубчасте колесо. Електродвигун встановлюється нерухомо на корпусі гвинтів. При його включенні обертове зубчасте колесо, яке встановлено на його валу, входить у зачеплення з зубчастою рейкою, яка виготовлена на розсувних кришках. Привід переднього гвинта здійснюється зубчаторемінною передачею, а заднього гвинта зубчастою циліндричною передачею.

Попередні розрахунки показали, що для створення необхідної сили необхідно, щоб двигун автомобіля мав потужність порядку 400 кінських сил. Тоді підйомна сила гвинтів буде мати величину близько 3000 кг. Розрахунки проводились для діаметрів гвинтів 0,8 м. Розміри даху автомобіля дозволяють збільшити розміри гвинта до 1 метра, тому що поперечні розміри деяких автомобілів досягають розмірів 2 метра.

Розрахунок підйомної сили гвинтів в більш широкому діапазоні геометричних і робочих параметрів дозволить підібрати оптимальні характеристики автомобіля позашляховика.

За базову модель для оціночних розрахунків підйомної сили гвинтів був обраний автомобіль Chevrolet Tahoe 6.2 ATLT; який мав наступні характеристики:

- 1) Потужність двигуна – 426 к.с.(кінських сил)
- 2) Тип двигуна – ДВС (двигун внутрішнього сгорання)
- 3) Виробник США
- 4) Оберти максимальної потужності – 500 об\хв.
- 5) Габарити автомобіля : довжина 5352 мм; ширина – 2057 мм
- 6) Привід – задній
- 7) Вага – 2926 кг

Оціночні розрахунки гвинтів показали, що підсумкова сила двох гвинтів складає 2999 кг.

Розрахунок конічної передачі, яка передає рух від розподільчого валу до гвинтів виконувався для двох матеріалів 40ХН і 12Х2Н4А. Для загартованого матеріалу 40ХН зовнішній ділильний діаметр конічного колеса має величину 186 мм, а використання цементованого матеріалу 12Х2Н4А після наступного загартування дозволив зменшити розмір зовнішнього діаметру конічного колеса до 150 мм.

Для зубчаторемінної передачі був використаний ремінь з напівкруглим профілем зубів, який забезпечує суттєво більш рівномірний розподіл напружень у ремені і має підвищену на 40% навантажувальну здатність у порівнянні з трапецеїдальним профілем зубів. Використаний ремінь також забезпечує більш плавний вхід зубів у зачеплення.

Використання зубчастого ременя з напівкруглим профілем зубів дозволив зменшити ширину ременя на 40% і зменшити її з 120 мм до 75 мм. Остаточна була прийнята ширина ременя 80 мм зі стандартного ряду.

Для передаточного відношення зубчаторемінної передачі 1,85 розміри шківів були такі: ведучого 154 мм і веденого 287 мм. Передаточне відношення зубчатої циліндричної передачі було прийнято 1,817, а для зубчатих коліс прийнятий матеріал 40ХН. При цьому ділильні діаметри шестерні і колеса були, відповідно, 70 мм і 129,5 мм.

Після розрахунку всіх типів передач, які входять до трансмісії привода гвинтів були розраховані підшипники за динамічної вантажопідйомності і вали на втомну міцність. Після виконання міцнісних розрахунків і призначення розмірів корпусу гвинтів за існуючими на даний час рекомендаціями, була виконана наближена оцінка збільшення ваги автомобіля внаслідок використання додаткової трансмісії приводу підйомних повітряних гвинтів. Результати оцінки показали, що збільшення ваги не перевищує 10% для сталевих корпусних деталей і 7% для титанових від ваги автомобіля.

Важливим чинником при проектуванні автомобіля позашляховика є розробка системи управління транспортним засобом у польоті. Це важливо з точки зору безпеки, можливості підтримання постійного числа оборотів та спроможність регулювання числа обертів на всіх режимах польоту. З іншого боку, для того, щоб забезпечити можливість прямолінійного польоту автомобіля, потрібно задати йому початковий кут атаки. Зробити це можливо завдяки різним обертам переднього гвинта та заднього, а саме зменшення оборотів переднього гвинта забезпечується можливість горизонтального руху транспортного засобу.

На сьогоднішній день більшість автомобілів обладнані системами круїз-контролю. Цю систему можливо використати у приводі гвинтів під час установленого режиму польоту, коли важливо не зменшувати оберти для підтримки постійної висоти.

Найпростіша система підтримки крейсерської швидкості включає такі основні елементи. Датчик положення педалі, блок управління двигуном, блок управління дросельною заслінкою. Водій збільшує оберти до досягнення потрібної висоти польоту, вмикає автоматику і відпускає педаль акселератора. Контролер запам'ятовує значення обертів і подає команду приводу, що відкриває дросель на необхідний кут: таким чином зберігає постійну швидкість.

При зниженні картина протилежна – дросель закривається, оскільки автомобіль розганяється під дією сил тяжіння. Але у нашому випадку зниження буде можливо лише при вимкненому круїз – контролю.

Для прискорення або уповільнення транспортного засобу водій натисканням кнопки забезпечує поворот заслінки на невеликий кут. На механічній коробці дія круїз – контролю обмежується діапазоном швидкостей однієї передачі.

З автоматичною коробкою користування круїз – контролю значно зручніше. В залежності від тиску масла в гідротрансформаторі прискорення або уповільнення машини відбувається автоматично. Корпуси приводів оснащені електроприводом, запит на включення наступної передачі отримують від контролера на автомобілях, обладнаних електронною педаллю газу, дроселем спочатку керує вакуумний або електричний привід. Після активації режиму електронного блоку управління він перехоплює управління приводом і підтримує курсову швидкість.

Спільно з регулятором постійного числа обертів гвинт автоматично підтримує задано число обертів на всіх режимах польоту автомобіля. Автоматична робота гвинта заснована на відцентровому принципі за прямою схемою дії з підведенням масла в циліндричну групу гвинта.

Перехід лопатей на малий крок відбувається під дією моменту створюваного тиском масла, що надходить в циліндр гвинта від масло насоса регулятора. Перехід лопатей на великий крок відбувається під дією моменту, створюваного відцентровими силами противаг. При падінні тиску масла, що надходить від регулятора до гвинта, лопаті гвинта під дією відцентрових сил противаги переходять на режим великого кроку, що забезпечує продовження польоту. Автоматичні повітряні гвинти змінного в польоті кроку працюють спільно з регулятором постійних обертів.

Противаги встановлені в корпусі регулятора і створюють при обертанні гвинта момент, який на всіх режимах роботи двигуна прагне повертати лопаті на збільшення кроку. Спільна робота гвинта і регулятора забезпечує автоматичну зміну кроку гвинта, підтримуючи цим задане постійне число обертів гвинта незалежно від режимів польоту і роботи двигуна.

Задана величина постійного числа обертів здійснюється настроюванням регулятора. Налаштування регулятора здійснюється штурвалом управління гвинтами, який знаходиться в салоні автомобіля.

При відхиленні обертів двигуна відбувається автоматична зміна кроку гвинта.

Число обертів, при яких настає рівновага між тиском пружини і зусиллям від вантажів регулятора залежить від натягу пружини. Відцентрові сили, які виникають від вантажів прагнуть підняти золотник вгору, а пружина прагне опустити золотник вниз. У разі сталого режиму роботи сила пружини дорівнює відцентровій силі від вантажів і золотник знаходиться в середньому положенні, перекриваючи канал, що веде до циліндру гвинта. Масло в циліндрі виявляється закритим і крок гвинта не змінюється. В цьому випадку масло з нагнітаючої системи надходить по каналу на вхід в насос через редуційний клапан.

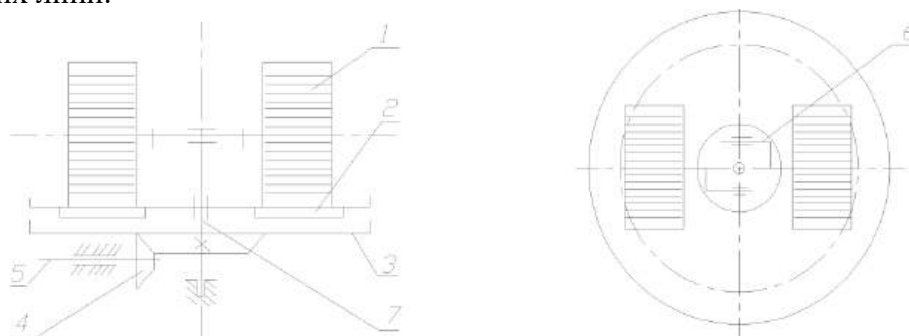
Для реалізації цього проекту треба уточнити підйомну силу гвинтів і розміри передач, які входять до конструкції приводу.

УДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ БАРАБАННО-ВАЛКОВОГО МЛИНА ДЛЯ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ ШЛАКОВИХ СУМІШЕЙ У ВИРОБНИЦТВІ СТІНОВИХ БЛОКІВ

Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова

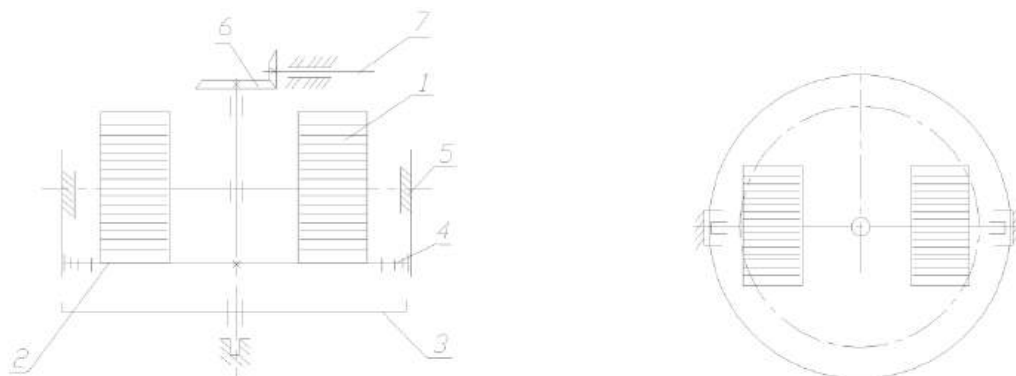
Виробництво стінових бетонних блоків методом пресування є одним із найбільш поширених способів виготовлення дрібноштучних будівельних виробів. Якість готової продукції значною мірою визначається однорідністю бетонної суміші, рівномірністю розподілу компонентів та ступенем їх механічної обробки перед формуванням. Саме тому вдосконалення обладнання для підготовки шлакових сумішей є актуальним напрямом розвитку галузевого машинобудування.

Традиційно для механічної обробки шлакових сумішей використовують бігуни (див. рис. 1 та рис. 2), які забезпечують одночасне подрібнення, розтирання, перемішування та ущільнення матеріалу. Незважаючи на технологічні переваги, таке обладнання характеризується значною масою, великими габаритами, високою енергоємністю та переважно періодичним режимом роботи, що обмежує продуктивність сучасних технологічних ліній.



1 – котки; 2 – нерухома чаша; 3 – прийомна чаша; 4 – конічна передача; 5 – приводний вал;
6 – кривошип; 7 – головний вал.

Рис. 1. Схема бігунів з нерухомою чашею



1 – котки; 2 – обертова чаша; 3 – прийомна чаша; 4 – кільцеве сито; 5 – підшипники вісі котків; 6 – конічна передача; 7 – приводний вал.

Рис. 2. Схема бігунів з рухомою чашею

Перспективною альтернативою є застосування барабанно-валкового млина (рис. 3), конструкція якого дозволяє поєднати інтенсивну механічну обробку суміші із безперервною подачею матеріалу. У процесі роботи між барабаном і валком створюється зона стиску та

зсуву, у якій відбуваються подрібнення агломератів, перемішування компонентів і руйнування поверхневих плівок на зернах матеріалу. Це сприяє покращенню структури бетонної суміші та підвищенню її технологічних властивостей.

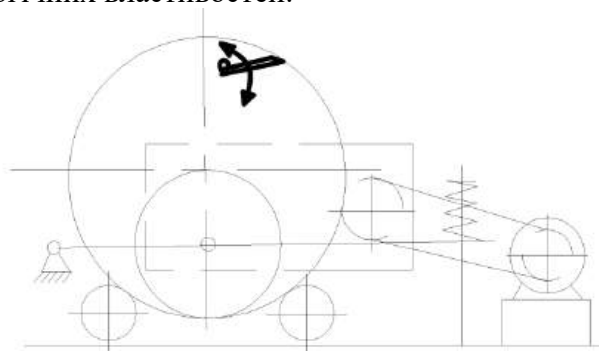


Рис. 3. Принципова схема барабано-валкового млина (подрібнювача)

Запропоноване удосконалення передбачає переведення машини у безперервний режим роботи, застосування фрикційного привода замість традиційної ланцюгової передачі, використання пневматичного механізму притискання валка та встановлення барабана під кутом для забезпечення осьового переміщення суміші. Такі конструктивні рішення спрощують технічне обслуговування, зменшують динамічні навантаження на вузли машини та підвищують надійність її роботи.

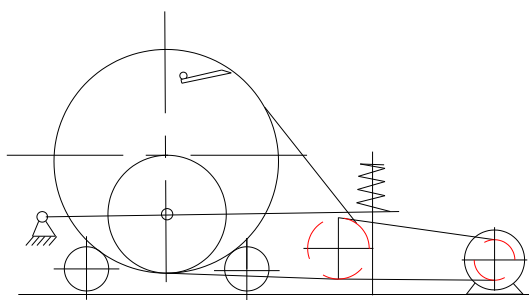


Рис. 4. Схема конструкції барабано-валкового млина безперервної дії

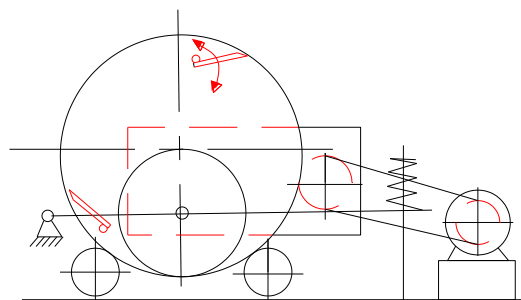


Рис. 5. Схема конструкції барабано-валкового млина періодичної дії

Очікується, що модернізований барабанно-валковий млин забезпечить скорочення тривалості механічної обробки шлакової суміші, підвищення продуктивності технологічної лінії, зниження питомих витрат електроенергії та покращення однорідності бетонної суміші. Це позитивно вплине на фізико-механічні властивості стінових блоків і конкурентоспроможність виробництва.

Таким чином, удосконалення конструкції барабанно-валкового млина є перспективним напрямом розвитку обладнання для виробництва стінових бетонних блоків. Запропоновані конструктивні рішення дозволяють підвищити ефективність механічної обробки шлакових сумішей, забезпечити безперервність технологічного процесу та знизити експлуатаційні витрати.

Список використаних джерел

1. Клименко М., Марач В. (2024). Особливості конструкції вертикальних валкових млинів для ефективного помелу цементу та гранульованих шлаків. Техніка будівництва, (40), 57-62. Режим доступу: https://tehbud.knuba.edu.ua/article/view/313902?utm_source=chatgpt.com
2. Клименко М., Марач В., Губчик М. (2025). Порівняння конструкцій робочих органів вертикальних валкових млинів. Техніка будівництва, (42), 123-130. Режим доступу: <https://tehbud.knuba.edu.ua/article/view/332072/321056>

Сорока А.С., студентка
a.s.soroka@student.khai.edu
Белявський О.В., ст. викладач
o.beliavskiy@khai.edu
Косенко О.В.,
o.kosenko@khai.edu

МОДЕЛЮВАННЯ ОБ'ЄМНИХ ВТРАТ ГІДРАВЛІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут»

Завдання мінімізації об'ємних втрат гідроапаратів стоїть в першій черзі у визначенні коефіцієнта корисної дії (ККД) гідралічного обладнання роботів і верстатів з ЧПК і являється актуальним напрямом вдосконалення гідроапаратури.

Метою моделювання виступає встановлення закономірностей утворення об'ємних втрат з можливістю їх прогнозування та мінімізації.

Завданням даної роботи виступає моделювання об'ємних втрат пластинчатого насоса СВ1-25, що використовується в стендових випробуваннях гідроапаратів на кафедрі теоретичної механіки, машинознавства та роботомеханічних систем НАУ «ХАІ».

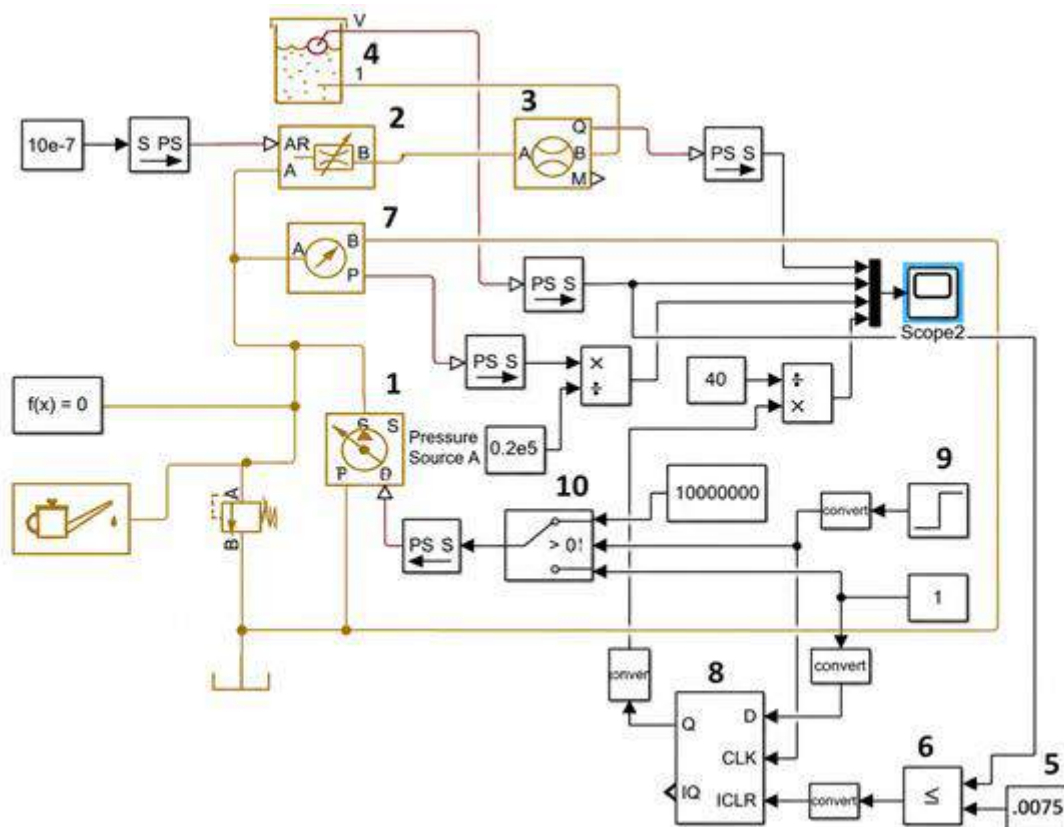


Рис. 1. Структурна схема гідралічного стенду з визначення об'ємного ККД насоса СВ1-25 (САПР MATLAB SIMULINK): 1 – гідронасос пластинчатого типу СВ1-25; 2 – гідродросель регульований типу Г55-21; 3 – датчик потоку рідини; 4 – мірний бак обсягом $7.5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$; 5 – датчик рівня рідини; 6 – компаратор; 7 – датчик тиску в нагнітальній магістралі; 8 – тригер пуску-зупинки гідралічної системи

Об'ємні втрати гідроапаратів зумовлені особливостями їх конструкції та напряду залежать від робочого тиску гідралічної системи (ГС), чистоти робочої рідини, умов експлуатації ГС.

Об'ємний ККД вносить вирішальний вклад в спільний ККД ГС. Поставлене завдання вирішується за допомогою обладнання, структурна схема якого дана на рисунку 1.

Модель обмежена збитковим тиском 30 Атм і має точність 14% у середині діапазону. Точність моделі обмежена можливістю отримання експериментальних даних в кінцевих точках діапазону розкриву дроселя та потужністю ГС. На рис. 2, а приведена симуляційна модель об'ємних втрат насосу СВ1-25 в образах САПР MATLAB SIMULINK, на рис. 2, б – відповідні графічні залежності. Вісь Х відображає зростання тиску в нагнітальній магістралі в Атм, за віссю Y відкладено об'ємний ККД (%), об'ємні втрати Q (10^{-6} м³/С); тиск Р (Атм).

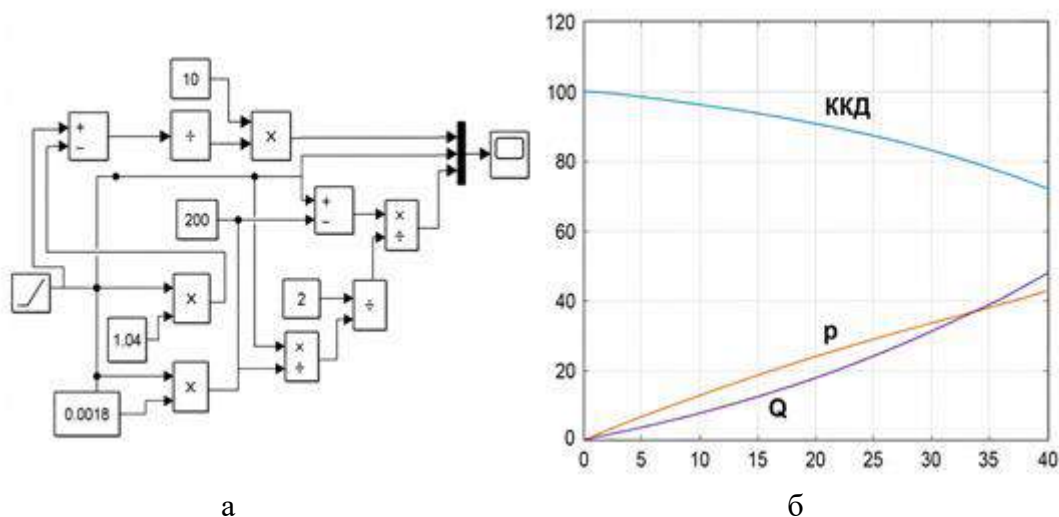


Рис. 2. Симуляційна модель об'ємних втрат насосу СВ1-25 в образах САПР MATLAB SIMULINK: а) Симуляційна модель залежності об'ємних втрат від тиску насосу СВ1-25; б) графічні залежності втрат і ККД від тиску

У роботі розроблено математичну та симуляційну модель з використанням САПР MATLAB Simulink, яка дозволяє з точністю до 14% спрогнозувати об'ємні втрати пластинчатого насосу СВ1-25 у зазначеному діапазоні (0- 3 Мпа) робочого тиску. Отримане квадратичне зростання об'ємних втрат зумовлене конструкційними особливостями агрегату, зокрема відсутністю повної герметизації під час замикання робочих камер і перенесення робочої рідини. Отримані результати є важливими з огляду на подальше поліпшення конструкції пластинчатих насосів з метою підвищення загального ККД гідросистем мобільних роботів і верстатів з ЧПК.

Пластинчаті насоси за об'ємними втратами посідають проміжне місце між лопатевими і поршневыми і характеризуються середнім рівнем об'ємних втрат, але незважаючи на це використовуються у робототехніці і верстатобудуванні, що пояснюється простотою конструкції і невибагливістю до точності обробки робочих поверхонь.

Список використаних джерел

1. Белявський, О. В. Моделювання характеристик гідравлічних пристроїв автоматики/ О. В. Белявський, О. В. Косенко // Відкриті інформаційні та комп'ютерні інтегровані технології. – 2023. – №99 с. 95-100.
2. Гераїмчук, М. Д. Моделювання систем у середовищі MATLAB-SIMULINK: Комп'ютерний практикум / М. Д. Гераїмчук, Ю. Ф. Лазарєв, Т. О. Толочко. – Київ: НТУУ «КПІ», 2006. – 175 с.

ПОРІВНЯННЯ КІНЕМАТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАНЕТАРНИХ І ДИФЕРЕНЦІАЛЬНИХ МЕХАНІЗМІВ АВІАЦІЙНИХ РЕДУКТОРІВ

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут»

Зубчасті передачі авіаційних редукторів літаків і вертольотів в більшості являються важко навантаженими високошвидкісними передачами, у яких колова швидкість досягає 100...130 м/с. Особливістю таких зубчастих передач є їх відносно мала вага та габаритні розміри. Ці показники досягаються завдяки використанню планетарних і диференціальних механізмів, в яких потужність, яку вони передають, розподіляється від вхідного вала редуктора на кілька окремих потоків по сателітах, а потім ці потоки об'єднуються на вихідному валу редуктора.

В авіаційних редукторах використовують як прості планетарні механізми типу AI і $\overline{AI}$ (рис. 1, а, б), це редуктори двигунів НК-4, ТГД-10, так і замкнуті типу $\overline{AI} - (\overline{AI}) - H$ (рис. 1, в), це редуктори двигунів AI-20, AI-24.

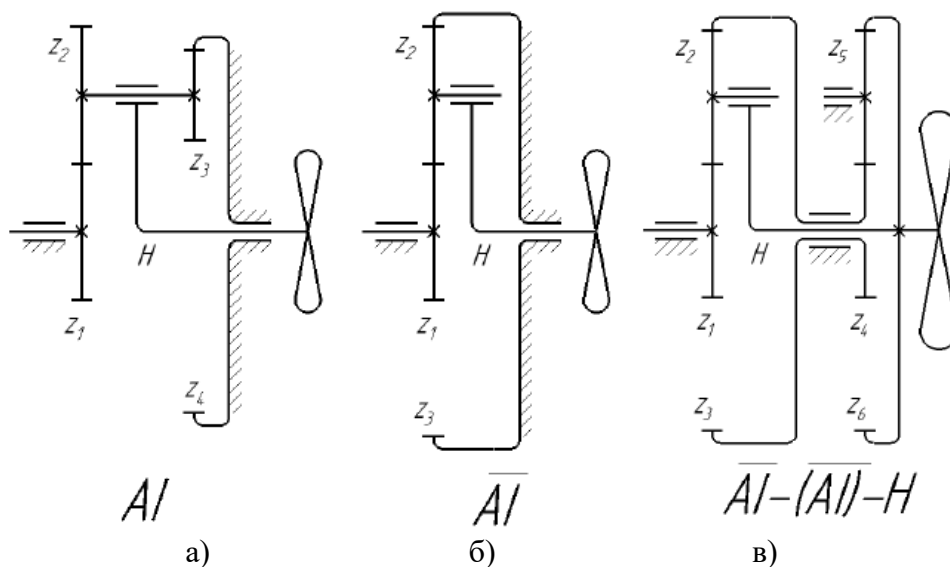


Рис. 1.

Основною кінематичною характеристикою планетарних механізмів є передатне відношення – це відношення частоти обертання вхідного вала до частоти обертання вихідного вала редуктора, на якому встановлений повітряний гвинт

$$i_{ред} = \frac{n_{вх}}{n_{вих}}.$$

Вхідний вал редуктора обертається з частотою ротора турбогвинтового двигуна (ТГД), а вихідний вал редуктора – це вал водила H . Передатне відношення простого планетарного механізму визначають через число зубців за допомогою формули Вілліса (рис. 1, а)

$$i_{ред} = i_{iH}^4 = \frac{\omega_1}{\omega_H} = 1 + \frac{z_2 \cdot z_4}{z_1 \cdot z_3}.$$

Для схеми $\overline{AI}$ (рис. 1. б)

$$i_{ред} = 1 + \frac{z_3}{z_1}.$$

На практиці передатне відношення для схеми $\overline{AI}$ лежить в межах від 4 до 18 і в значній мірі залежить від числа сателітів k ($k = 3 \dots 6$). Для схеми $\overline{AI}$ $i_{1H}^3 = 3,5 \dots 12$.

Використання замкнених планетарних механізмів дозволяє збільшити як передатне відношення редуктора, так і потужність, яку може передавати редуктор (рис. 1, в). Для схеми $\overline{AI} - (\overline{AI}) - H$ передатне відношення записується у вигляді суми:

$$i_{ред} = \frac{n_{вх}}{n_{вих}} = i_{16} = i_{1H} = i_{16}^3 + i_{16}^H = \left(1 + \frac{z_3}{z_1} \right) + \frac{z_3 \cdot z_6}{z_1 \cdot z_4}.$$

Теоретично передатне число i_{16} лежить в межах від 3,5 до 170 при $k = 3$. На практиці використовують число сателітів від 3 до 8, тому передатні числа мають менші значення. Наприклад, у редукторах двигунів AI20 число сателітів $k = 6$ і число переборів $k_n = 6$, передатне відношення $i_{16} = 11,45$.

Тихохідна ступінь вертольотного редуктора Р7 двигуна Д-25В має передатне число $i_{16} = 6,44$ при числі сателітів $k = 8$ та числі переборів $k_n = 10$.

Редуктори вертольотів мають більш складну кінематичну схему, до складу якої входять кілька ступенів зубчастих передач з нерухомими осями, а тихохідна ступінь – замкнутий планетарний редуктор. Наприклад, редуктор двигуна Д-25В має два ступеня зубчастих коліс з нерухомими осями, а тихохідна ступінь – замкнений планетарний редуктор. Передача потужності до редуктора здійснюється від двох газотурбінних двигунів з частотою обертання роторів $n_{вх} = 9000$ об/хв., а на вихідному валу редуктора встановлений повітряний гвинт, який обертається з частотою $n_{вих} = 130$ об/хв. Передатне число редуктора:

$$i_{ред} = \frac{9000}{130} = 69,23.$$

В авіаційних редукторах поряд з планетарними використовують також диференційні механізми, як прості типу $D.AI$ та $D.\overline{AI}$ (рис. 2, а, б), так і замкнені (рис. 3).

Прості диференційні механізми $D.AI$ та $D.\overline{AI}$ використовують переважно в редукторах турбогвинтових двигунів (ТГД) літаків.

Передатні числа цих редукторів при $n_H = n_4$ лежать в межах $i_{ред} = 10 \dots 23$ для схеми $D.AI$ (рис. 1, а) і $i_{ред} = 10 \dots 12$ для схеми $D.\overline{AI}$.

Зв'язок частот обертання центральних ланок – коліс z_1 і z_4 , та водила H диференційного механізму визначається формулою Вілліса (рис. 2, а)

$$n_1 = n_H \cdot i_{1H}^4 + \omega_4 i_{14}^H.$$

При $n_H = -n_4$ передатне число механізму

$$i_{диф} = i_{1H,4} = \pm \left(1 - 2i_{14}^H \right) = \pm \left(1 + 2 \frac{z_2 \cdot z_4}{z_1 \cdot z_3} \right).$$

Якщо порівняти цю формулу з формулою передатного числа аналогічної схеми планетарного механізму, то видно, що можливості, які відкриває диференціальний механізм, практично в два рази ширше ніж у планетарного механізму.

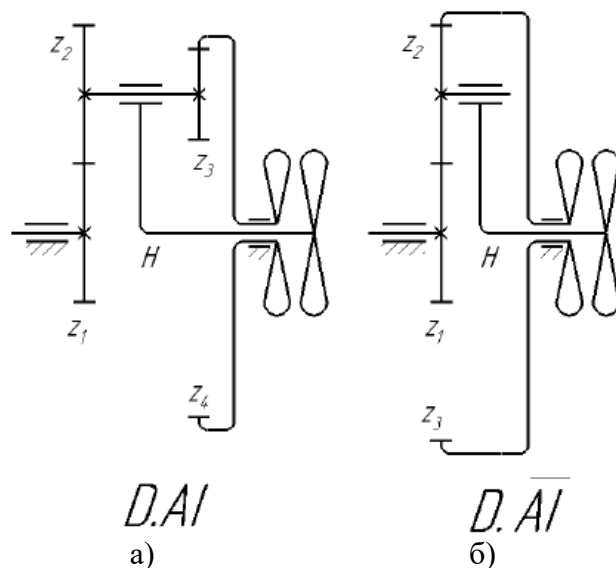


Рис. 2.

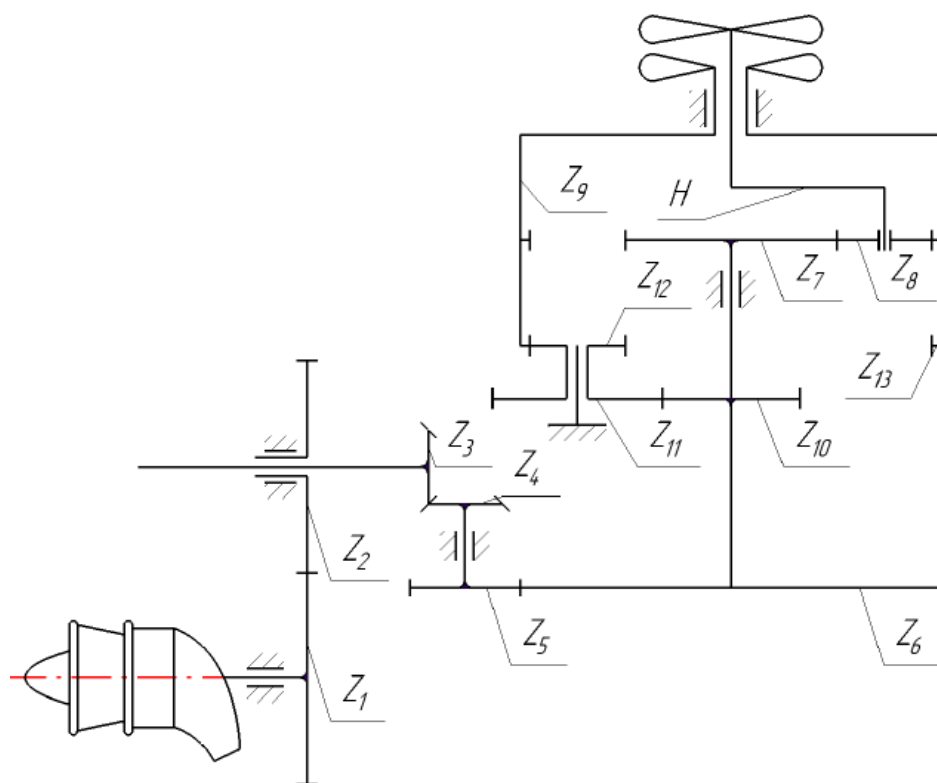


Рис. 3.

Треба зауважити, що диференційний механізм являє собою динамічну систему, у якій частота обертання вихідних валів залежать від співвідношення значень корисного навантаження на них, яке має бути різним, бо крутний момент, який передається на передньому гвинті (T_H) більше ніж на задньому (T_4).

На практиці рівність частот обертання повітряних гвинтів забезпечується регуляторами обертів, шляхом зміни кутів встановлення лопатей передатного та заднього гвинтів, або встановленням різної кількості лопатей на передньому та задньому повітряних гвинтах.

Редуктори вертольотів зі співвісними гвинтами мають також складну кінематичну схему, до складу якої входять зубчасті передачі з нерухомими осями (рис. 3). В таких редукторах потужність підводиться, як правило, від двох ГТД, і далі в редукторі ці потужності об'єднуються на вхідному валу тихохідної ступені диференційного механізму, а потім

розподіляються на два вихідні вали для привода двох співвісних гвинтів. Передатне число так редукторів $i_{ред} = 80 \dots 100$.

В редукторах вертольотів, щоб забезпечити рівність частот обертання $n_H = -n_4$, а також рівність крутних моментів $T_H = T_4$ (за модулем) в простий диференційний механізм вводять додатковий замикаючий зубчастий механізм, який кінематично зв'язує передній та задній повітряні гвинти, або замикаючий механізм, що кінематично зв'язує ведучий вал диференціального механізму з верхнім, або нижнім повітряними гвинтами.

На відміну від планетарного механізму, в якому замикаючий механізм збільшує передатне відношення, в замкненому диференційному механізмі передатне відношення не змінюється, а залишається таким, як у простому.

Використання замикаючого механізму для забезпечення рівності кутових швидкостей ($\omega_H = -\omega_4$) перетворює динамічно зрівноважену систему на жорстку систему з кінематичним замиканням, у якій ступень рухомості $W = 1$.

Наприклад, у редуктора ВР-3Ф (рис. 3) замикальний механізм кінематично зв'язує вхідний вал диференціального механізму (колесо Z_7) з колесом Z_9 , за допомогою зубчастих передач $Z_{10} - Z_{11}$ і $Z_{12} - Z_{13}$. Для такої схеми замикаючого механізму передатне число має дорівнювати передатному числу диференційного механізму, $i_{зам} = i_{диф}$.

Розглянемо детальніше кінематичну схему редуктора ВР-3Ф (рис. 3).

До редуктора потужність подається від двох двигунів ГТД-3Ф, а частота обертання роторів, яких $n_{дв} = 19000$ об/хв. На виході з редуктора встановлено два співвісні повітряні гвинти, які обертаються в протилежних напрямках з однаковою частотою обертання $n_{вих} = \pm 237$ об/хв.

Загальне передатне число редуктора:

$$i_{ред} = \frac{n_{дв}}{n_{вх}} = \frac{19000}{237} = 80,17.$$

Для реалізації цього передатного числа вибрано чотириступеневий редуктор. Перші три ступені створені зубчастими колесами з нерухомими осями, а для тихохідного ступеня – диференціальний замкнений механізм з двома виходами потужності на верхній і нижній повітряні гвинти.

Загальне передатне число редуктора

$$i_{ред} = i_{12} \cdot i_{34} \cdot i_{56} \cdot i_{диф},$$

де $i_{12} = -\frac{Z_2}{Z_1} = -3,42$ – передатне число циліндричної передачі;

$i_{34} = \frac{Z_4}{Z_3} = 1,81$ – передатне число конічної передачі;

$i_{56} = -\frac{Z_6}{Z_5} = -2,3$ – передатне число циліндричної передачі третьої ступені.

Диференційний замкнений механізм складається з простого $D.\overline{AI}$ ($Z_7 = 38, Z_8 = 25, Z_9 = 88$) і замикаючого механізму, створеного зачепленням $Z_{10} - Z_{11}$ і $Z_{12} - Z_{13}$. Число сателітів $k = 6$ і число переборів $k_n = 6$ (колесо $Z_{10} - Z_{11}$).

Передатне число диференціального механізму при $n_H = -n_9$

$$i_{диф} = i_{7H} = 2i_{7H}^9 - 1 = 2\left(1 + \frac{z_9}{z_7}\right) - 1 = 5,63.$$

Передатне число замикаючого механізму від колеса Z_{10} до Z_{13} , яке жорстко зв'язане з колесом Z_9 і передає крутний момент на задній гвинт, є таким

$$i_{зам} = i_{10,13} = i_{10,11} \cdot i_{12,13} = \left(-\frac{z_{11}}{z_{10}}\right) \cdot \frac{z_{13}}{z_{12}} = -\frac{54}{54} \cdot \frac{107}{20} = -5,64.$$

Частина потужності, яка є недостатньою для виконання рівності $T_H = T_9$ передається через замикаючий механізм.

Таким чином, в замкнутому диференційному механізмі забезпечується рівність кутових швидкостей ($\omega_H = -\omega_9$) та крутних моментів ($T_H = T_9$).

Висновки. Використання замкнених планетарних механізмів дозволяє розширити межі передатних чисел механізму.

Використання замикаючого ланцюга в диференціальному механізмі авіаційних редукторів не впливає на межі передатних чисел, але забезпечує рівність частот обертання повітряних гвинтів $\left(n_{передн. гвинта} = -n_{задн. гвинта}\right)$ і рівність потужностей, які підводяться до них.

Список використаних джерел

1. Доценко, В. М. Основи проектування механічних вузлів авіаційно-космічної техніки : учеб. пособ. / В. М. Доценко, В. М. Павленко, Ю. В. Ковеза. – Харків : Нац. аерокосм. ун-т «ХАИ», 2015. – 328 с.

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ АЕРОДИНАМІЧНОГО РОЗДІЛЕННЯ ДРІБНОДИСПЕРСНИХ СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ

Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова

У сучасному виробництві будівельних матеріалів значна увага приділяється підвищенню ефективності процесів підготовки сировини. Однією з найважливіших операцій є розділення сипких матеріалів за гранулометричним складом, оскільки саме зерновий склад безпосередньо впливає на якість готової продукції, енерговитрати технологічного процесу та довговічність технологічного обладнання. Для класифікації високоабразивних матеріалів традиційно застосовують барабанні та вібраційні грохоти, однак їх використання супроводжується інтенсивним зношуванням ситових поверхонь, зниженням продуктивності та необхідністю регулярного технічного обслуговування. Перспективним напрямом удосконалення технологічного процесу є застосування повітряно-гравітаційного способу розділення, у якому класифікація матеріалу здійснюється аеродинамічними силами без контакту частинок із робочими поверхнями. Такий підхід істотно зменшує абразивне зношування обладнання, забезпечує стабільність технологічного процесу та створює умови для підвищення ефективності сепарації дрібнодисперсних матеріалів.

У роботі розглянуто конструкцію установки аеродинамічного розсіювання (рис.1), призначеної для класифікації високоабразивних сипких матеріалів, що використовуються у виробництві керамічних виробів. Принцип роботи установки полягає у взаємодії безперервного потоку сипкого матеріалу з горизонтальним повітряним потоком усередині робочої камери. Частинки різної крупності характеризуються різними аеродинамічними властивостями, тому проходять неоднакові траєкторії руху та осаджуються у відповідних приймальних бункерах. Регулювання положення шиберу дозволяє змінювати межу розділення матеріалу відповідно до технологічних вимог виробництва.

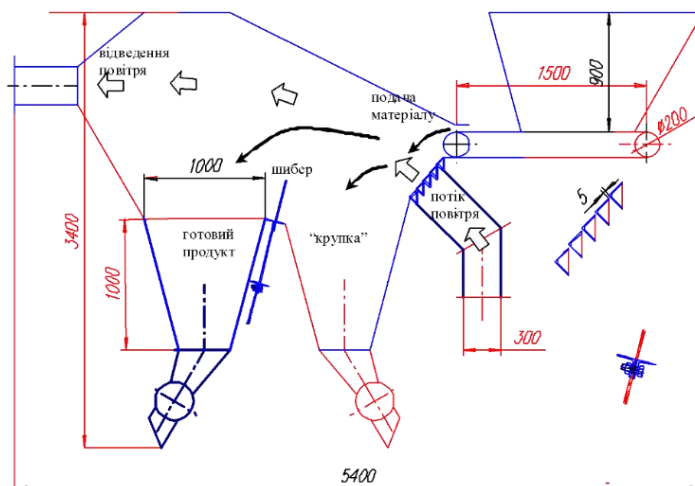


Рис. 1. Загальний вигляд установки аеродинамічного розділення сипких матеріалів

Для дослідження роботи запропонованої конструкції застосовано метод комп'ютерного моделювання. Геометричну модель робочої камери створено із використанням сучасної системи автоматизованого проєктування, після чого її експортовано до програмного комплексу аналізу руху повітряних потоків. Під час моделювання виконано побудову розрахункової сітки та визначено розподіл швидкостей, тиску й турбулентної енергії у внутрішньому об'ємі установки.

Особливу увагу приділено дослідженню впливу конструкції повітророзподільного пристрою на формування рівномірного поля швидкостей. Для забезпечення ламінаризації повітряного потоку запропоновано використання багатолопатевого роздувача зі змінним кутом нахилу напрямних елементів. Така конструкція забезпечує зменшення локальних зон турбулізації, вирівнює швидкість повітря по всій ширині робочої камери та підвищує точність розділення частинок за крупністю. Отримані результати моделювання підтвердили можливість формування практично однорідного швидкісного поля, що позитивно впливає на ефективність процесу сепарації.

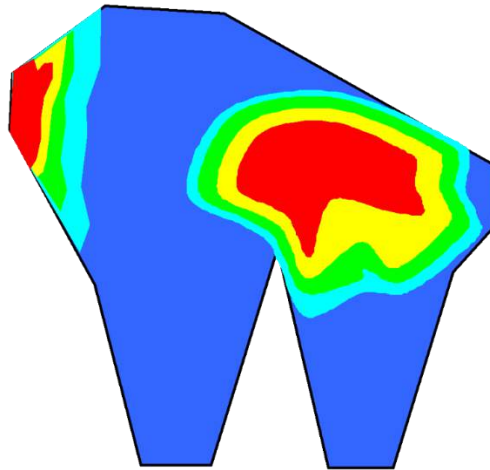


Рис. 2. Картина розподілу турбулентної енергії по перерізу установки (що є критерієм оцінки турбулентності)

За результатами моделювання встановлено, що ефективність роботи установки значною мірою визначається рівномірністю розподілу швидкості повітряного потоку в зоні сепарації. Запропонована конструкція дозволяє зменшити турбулентність потоку, підвищити стабільність траєкторій руху частинок та забезпечити більш чітке розділення матеріалу на фракції. Використання комп'ютерного моделювання дає можливість оптимізувати геометричні параметри установки ще на стадії проектування, що істотно скорочує витрати часу й ресурсів на проведення натурних експериментів.

Отримані результати свідчать про перспективність застосування аеродинамічного способу розділення для класифікації високоабразивних сипких матеріалів у виробництві будівельної кераміки. Подальші дослідження доцільно спрямувати на оптимізацію конструкції повітророзподільного пристрою, експериментальну перевірку результатів комп'ютерного моделювання та розроблення системи автоматичного керування режимами роботи установки.

Список використаних джерел

1. Гарнець В. М. Машини і обладнання для виробництва будівельних матеріалів : підручник. Київ : Вища школа, 2004. 590 с.
2. Свідерський А. Т., Маслюк В. А., Лівінський О. М. Механічне обладнання підприємств будівельної індустрії : навчальний посібник. Київ : КНУБА, 2005. 432 с.
3. Rhodes M. Introduction to Particle Technology. 2nd ed. Chichester : John Wiley & Sons, 2008. 454 p.

АЛГОРИТМ ДІАГНОСТИКИ ЗНОСУ ЦИЛІНДРО-ПОРШНЕВИХ ПАР НАСОСУ ГІДРООБ'ЄМНОЇ ПЕРЕДАЧІ З КУЛЬКОВИМИ ПОРШНЯМИ

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Україна

Вступ. Один із найпередовіших та найефективніших напрямків створення безступінчастих трансмісій мобільних транспортних та спеціальних гусеничних машин пов'язаний із застосуванням гідрооб'ємних передач (ГОП), що дозволяють реалізувати паралельні потоки гідравлічної та механічної потужності. У найбільш сучасних варіантах такої передачі використовуються радіально-поршневі гідромашини (РПГ) з кульковими поршнями. З їхньою допомогою можливе створення досить компактних конструкцій трансмісії. Встановлено, що гідравлічні машини радіального типу здатні витримувати значно більші навантаження, ніж аксіальні гідромашини. Зазначені пристрої забезпечують також значно вищу швидкість обертання. Однак для цих передач характерний високий рівень навантаженості найбільш відповідальних елементів, зокрема циліндро-поршневих пар. Їх надмірний знос веде до зменшення потужності, що передається, зниження надійності пристроїв і навіть до поломок.

Аналіз останніх досягнень та публікацій. Інтерес до застосування РПГ з кульковими поршнями для транспортних та спеціальних гусеничних машин різко зріс після того, як такого типу гідромашини стали випускатися серійно фірмою “Martin-Marietta” (США) [1, 2]. Ці пристрої починають застосовувати і у вітчизняному машинобудуванні [2, 3].

Досить велика кількість робіт присвячена дослідженням, спрямованим на вдосконалення РПГ: вплив зносу циліндропоршневих пар на втрату потужності в гідромашинах; визначення зусиль, що діють у циліндре РПГ. Дослідження різних втрат у гідромашинах, напружено-деформованого стану елементів гідрооб'ємних передач, пульсацій тиску в поршневій камері насоса. Деякі конструктивні особливості РПГ, наприклад, розглядаються у роботах [1, 2]. У статті [3] викладено найпростіші прийоми вибору параметрів пристроїв.

Дослідження, присвячені вивченню динамічних процесів у силових передачах із радіально-поршневими ГОП, створенню алгоритмів діагностики параметрів РПГ із кульковими поршнями ще не знайшли достатнього відображення у науковій літературі.

Мета та постановка задачі. Метою роботи є створення алгоритма діагностики зношування циліндро-поршневих пар насоса РПГ з кульковими поршнями. Для досягнення поставленої мети повинні бути розв'язані наступні задачі: експериментально підтверджено існування зв'язку між закидами тиску в циліндрах та коливаннями статора насоса навколо осі обертання; обрано тип експериментальних даних, необхідних для діагностики, які мають високу інформативність, простоту отримання та обробки; введено параметри, що характеризують знос циліндро-поршневих пар; представлено тиск у циліндрі у вигляді залежності від параметра зношування; запропоновано метод формування матриці системи лінійних алгебраїчних рівнянь для визначення параметрів зносу; запропоновано раціональний алгоритм розв'язання перевизначеної отриманої системи лінійних алгебраїчних рівнянь; здійснено математичні експерименти по визначенню параметрів зносу окремих циліндрів; наведено результати експериментальних досліджень та їх зіставлення з даними розрахунків.

Математична модель насоса РПГ. На кінематичній схемі насоса РПГ (рис. 1) показано: 1 – блок циліндрів (ротор), 2 – кулька-поршень, 3 – цапфовий розподільник, 4 – статорне кільце, 5 – корпус ГОП, 6 – гідроциліндр системи керування, 7 – цапфа керування статорного кільця, 8 – вісь обертання статорного кільця. Вісь обертання ротора проходить через точку O , а через точки O_1 , O_3 проходять відповідно вісь статорного кільця і вісь його обертання.

Алгоритм діагностики закидів тиску циліндропоршневих пар насоса РПГ. У законі зміни тиску в підпоршневому просторі кульки-поршня на інтервалі одного обороту ротора насоса, який формує збурюючий момент $M_{O_{3z}}$ моделі (1), для кривої закидання тиску обґрунтована двопараметрична залежність [4]. У якості параметрів розглядаються інтервал дії імпульсу по куту повороту ротора $\Delta\varphi$ та його максимальне значення Δp (рис. 2). Для конкретного насоса вказаний інтервал визначається його геометрією.

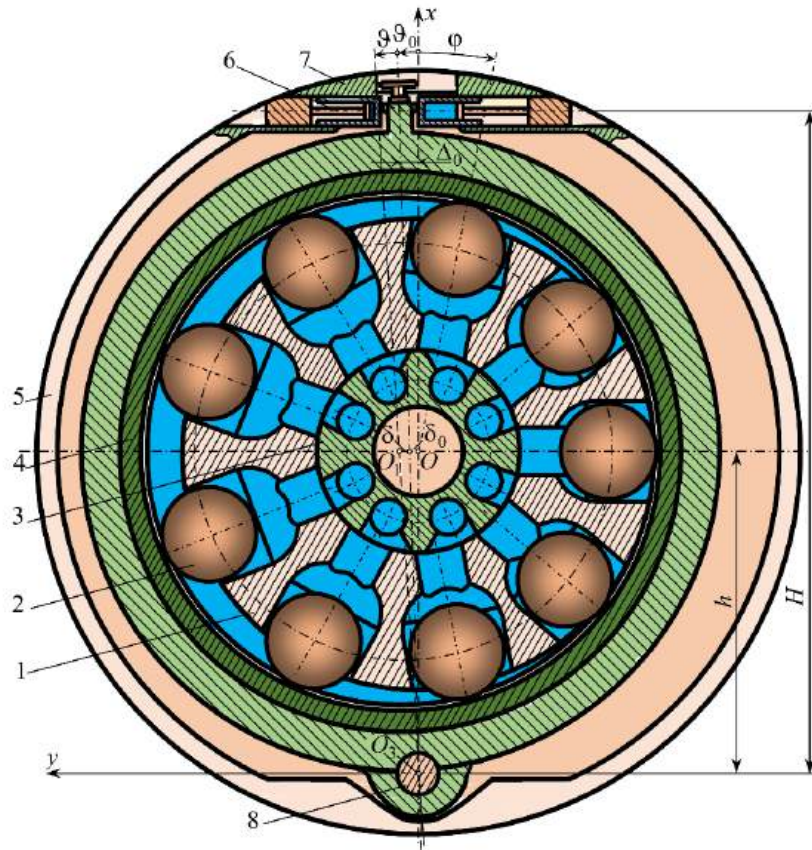


Рис. 1. Кінематична схема радіально-поршневого насоса з кульковими поршнями

На рівень закидів тиску, що залежать від частоти обертання ротора, навантаження на ГОП, істотно можуть впливати витікання, обумовлені надмірним зносом кульок і стінок циліндрів. В основу алгоритму, що розробляється, покладено експериментально підтверджений факт про зв'язок між закидами тиску і коливаннями статора насоса навколо осі обертання.

Представимо тиск $p(\varphi)$ для першого циліндра у вигляді суми

$$p(\varphi) = p_1(\varphi) + \eta p_2(\varphi), \quad (2)$$

де $p_1(\varphi)$ – тиск без урахування закидів; $p_2(\varphi)$ – тиск закиду за відсутності зносу; φ – кут повороту ротора ($0 \leq \varphi \leq 2\pi$); η – параметр, що характеризує рівень закиду тиску $0 \leq \eta \leq 1$; p_h – тиск у порожнині нагнітання; p_d – тиск підживлення; Δp – величина закиду тиску.

Значення $\eta=1$ відповідає відсутності зношування; значення $\eta=0$ – граничному зносу. Для більшої наочності зношування зручно характеризувати параметром $\xi = (1-\eta) \cdot 100\%$.

Тепер, слідуючи [3, 5], збурюючий момент від першого циліндра на одному обороті ротора можна представити у вигляді

$$M_{O_{3z}}^{(\varphi)} = q_1(\varphi) + \eta q_2(\varphi), \quad (3)$$

де $q_1(\varphi) = \frac{\pi r^2}{\cos \psi} (x \sin(\varphi + \psi) - y \cos(\varphi + \psi)) p_1(\varphi)$; $q_2(\varphi) = \frac{\pi r^2}{\cos \psi} (-x \sin(\varphi + \psi) + y \cos(\varphi + \psi)) p_2(\varphi)$;
 $x = h + r \cos(\varphi) + r \cos(\varphi + \psi)$; $y = -(r \sin(\varphi) + r \sin(\varphi + \psi))$; r – радіус кульки; $\rho = R_0 - \delta_1 \sin \varphi$; R_0 – радіус кола, яким рухаються центри кульок; $\delta_1 = \delta_0 + \delta$ (див. рис. 1); $\psi = \frac{\delta_1}{R_0} \cos \varphi$.

Для ρ і ψ тут наведені наближені вирази з точністю до малих перших порядку.

Представимо наближено збурюючий момент від першого циліндра кінцевим тригонометричним рядом, розклавши вираз (3) в ряд Фур'є

$$M_1(\varphi) = M_{O_{3z}}^{(\varphi)} = \sum_{i=1}^v (b_{c_i}^{(1)} \cos i\varphi + b_{s_i}^{(1)} \sin i\varphi) + \eta_1 \sum_{i=1}^v (a_{c_i}^{(1)} \cos i\varphi + a_{s_i}^{(1)} \sin i\varphi),$$

де $b_{c_i}^{(1)}$, $b_{s_i}^{(1)}$ – косинусна і синусна амплітуда i -ої гармоніки в розкладанні в ряд Фур'є $p_1(\varphi)$; $a_{c_i}^{(1)}$, $a_{s_i}^{(1)}$ – косинусна і синусна амплітуда i -ої гармоніки в розкладанні в ряд Фур'є $p_2(\varphi)$; v – число реєстрованих гармонік.

Тоді для моменту від k -го циліндра маємо відповідно

$$M_k(\varphi) = \sum_{i=1}^v (b_{c_i}^{(1)} \cos i\tilde{\varphi}_k + b_{s_i}^{(1)} \sin i\tilde{\varphi}_k) + \eta_k \sum_{i=1}^v (a_{c_i}^{(1)} \cos i\tilde{\varphi}_k + a_{s_i}^{(1)} \sin i\tilde{\varphi}_k),$$

де $\tilde{\varphi}_k = \varphi - \gamma_k$; $\gamma_k = (k-1) \frac{2\pi}{\omega n}$ – зсув по фазі k -го збурюючого моменту ($k = \overline{1, n}$).

З урахуванням виразу для $\tilde{\varphi}_k$ остання формула набуває остаточного вигляду

$$M_k(\varphi) = \sum_{i=1}^v (b_{c_i}^{(k)} \cos i\varphi + b_{s_i}^{(k)} \sin i\varphi) + \eta_k \sum_{i=1}^v (a_{c_i}^{(k)} \cos i\varphi + a_{s_i}^{(k)} \sin i\varphi), \quad (4)$$

де $b_{c_i}^{(k)} = b_{c_i}^{(1)} \cos i\gamma_k - b_{s_i}^{(1)} \sin i\gamma_k$, $b_{s_i}^{(k)} = b_{c_i}^{(1)} \sin i\gamma_k + b_{s_i}^{(1)} \cos i\gamma_k$; $a_{c_i}^{(k)} = a_{c_i}^{(1)} \cos i\gamma_k - a_{s_i}^{(1)} \sin i\gamma_k$, $a_{s_i}^{(k)} = a_{c_i}^{(1)} \sin i\gamma_k + a_{s_i}^{(1)} \cos i\gamma_k$.

Амплітуди косинусних і синусних гармонічних складових у русі статора насоса прийнятої діагностичної моделі, які отримують на основі експериментальних даних, позначимо відповідно через ϑ_{c_i} , ϑ_{s_i} ($i = \overline{1, v}$).

Для побудови системи лінійних алгебраїчних рівнянь по визначенню параметрів η_k ($k = \overline{1, n}$) скористаємося гармонічними коефіцієнтами впливу. Косинусну та синусну амплітуди коливань статора від моменту одиничної амплітуди $\sin i\omega t$ позначимо відповідно через $\alpha_{c_i}^{(s)}$ і $\alpha_{s_i}^{(s)}$, а від моменту одиничної амплітуди $\cos i\omega t$ – відповідно через $\alpha_{c_i}^{(c)}$ і $\alpha_{s_i}^{(c)}$.

Для розглядуваної моделі (1) вирази для них отримують на підставі відомих формул для амплітуди і фази змущених коливань осцилятора з лінійно-в'язким опором [7]

$$\alpha_{c_i}^{(s)} = -\alpha_{s_i}^{(c)} = -\frac{2\beta i\omega}{W}; \quad \alpha_{s_i}^{(s)} = \alpha_{c_i}^{(c)} = \frac{\omega_0^2 - (i\omega)^2}{W}, \quad (5)$$

де $\omega_0^2 = \frac{c_e}{I_{O_{3z}}^{(e)}}$, $\beta = \frac{b_e}{2I_{O_{3z}}^{(e)}}$, $W = I_{O_{3z}}^{(e)} \left[(\omega_0^2 - (i\omega)^2)^2 + 4\beta^2 (i\omega)^2 \right]$.

Скористаймося для побудови діагностичних рівнянь формулами (4), (5). Запишемо вирази для амплітуд косинусних і синусних складових кожної гармоніки реакції статора від

відповідних гармонік збурення і прирівняємо їх відповідним експериментальним значенням гармонік. Після нескладних перетворень маємо

$$\left. \begin{aligned} & \left(\alpha_{c_i}^{(c)} a_{c_i}^{(1)} + \alpha_{c_i}^{(s)} a_{s_i}^{(1)} \right) \eta_1 + \left(\alpha_{c_i}^{(c)} a_{c_i}^{(2)} + \alpha_{c_i}^{(s)} a_{s_i}^{(2)} \right) \eta_2 + \dots + \\ & + \left(\alpha_{c_i}^{(c)} a_{c_i}^{(n)} + \alpha_{c_i}^{(s)} a_{s_i}^{(n)} \right) \eta_n = \vartheta_{c_i} - \alpha_{c_i}^{(c)} \sum_{k=1}^n b_{c_i}^{(k)} - \alpha_{c_i}^{(s)} \sum_{k=1}^n b_{s_i}^{(k)}, \\ & \left(\alpha_{s_i}^{(c)} a_{c_i}^{(1)} + \alpha_{s_i}^{(s)} a_{s_i}^{(1)} \right) \eta_1 + \left(\alpha_{s_i}^{(c)} a_{c_i}^{(2)} + \alpha_{s_i}^{(s)} a_{s_i}^{(2)} \right) \eta_2 + \dots + \\ & + \left(\alpha_{s_i}^{(c)} a_{c_i}^{(n)} + \alpha_{s_i}^{(s)} a_{s_i}^{(n)} \right) \eta_n = \vartheta_{s_i} - \alpha_{s_i}^{(c)} \sum_{k=1}^n b_{c_i}^{(k)} - \alpha_{s_i}^{(s)} \sum_{k=1}^n b_{s_i}^{(k)}, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

де $i = i_1, i_2, \dots, i_v$ – номери гармонік вібраційного сигналу, який реєструються.

Систему лінійних алгебраїчних рівнянь (6) перепишемо в матричній формі

$$\mathbf{A}\boldsymbol{\eta} = \mathbf{b}, \quad (7)$$

де $\mathbf{A}$ – матриця розмірності $2v \times n$ ($v \geq 5$); $\boldsymbol{\eta} = [\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n]^T$ – вектор параметрів, що діагностуються; $\mathbf{b} = [b_1, b_2, \dots, b_{2v}]^T$ – вектор правих частин (т – символ транспонування).

Оскільки експериментальні дані визначаються неточно, систему (7) замінимо системою так званих умовних рівнянь

$$\mathbf{A}\boldsymbol{\eta} = \tilde{\mathbf{b}}, \quad (8)$$

де $\tilde{\mathbf{b}}$ – наближене значення вектор правих частин.

Число рівнянь $2v$ може бути більшим за кількість невідомих, у цьому випадку система (8) є перевизначеною. Найпоширенішим способом розв'язання перевизначених систем лінійних алгебраїчних рівнянь є метод найменших квадратів, в якому в якості розв'язка береться вектор $\tilde{\boldsymbol{\eta}}$, що мінімізує норму нев'язки [6]

$$\|\mathbf{A}\tilde{\boldsymbol{\eta}} - \tilde{\mathbf{b}}\| = \inf \|\mathbf{A}\boldsymbol{\eta} - \tilde{\mathbf{b}}\|$$

по всьому просторі розв'язків системи (8). У якості норми вектора прийнята величина

$$\|\mathbf{b}\| = \left(\sum_{i=1}^{2v} b_i^2 \right)^{1/2}.$$

Вектор розв'язку визначається так:

$$\tilde{\boldsymbol{\eta}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \tilde{\mathbf{b}}.$$

Розрахунково-експериментальні дослідження. Математичні експерименти, коли в якості діагностичних даних використовувалися результати розрахунків з параметром η меншим одиниці для одного з циліндрів, підтвердили перспективність запропонованого алгоритму. Дослідження пристрою проводились з наступними відносними геометричними параметрами: $r=1$; $R_0=4,039$; $h=6,142$; $H=14,803$; $\Delta_0=0,315$; $d=1,26$; $L=0,756$. Для формування пружного і збурюючого моментів прийняті такі параметри $p_h=35$ МПа; $p_d=1,5$ МПа; $k_p=0,75$; $\Delta\varphi=\pi/18$; $E=1,35 \cdot 10^3$ МПа. Остаточні значення для коефіцієнтів диференціального рівняння при використанні постійних переходу $I_0=1$ кгм², $c_0=1 \cdot 10^8$ Нм: $I_{O_{3z}}^{(e)}=3,719$; $c_e=0,3774$; $b_e=0,02$; $M_{O_{3z}}^{(0)}=0,9601 \cdot 10^{-5}$. При цьому в розрахунках момент $M_{O_{3z}}(t)$ варто зменшити в c_0 раз. Безрозмірне значення частоти – $\omega=0,03$.

На рис. 2 представлений графік зміни кута повороту статора для одного повного оберту ротора. Його аналіз показав, що найбільш сильна вісімнадцята гармоніка в законі руху формується зміною тиску в циліндрі за законом прямокутного синуса без урахування закиду тиску (див. рис. 2). Дев'ята ж гармоніка саме обумовлена закидом тиску при переході циліндра з зони високого тиску у зону низького тиску.

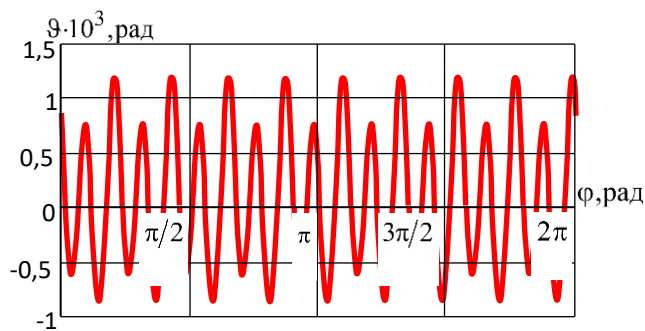


Рис. 2. Залежність кута відхилення статора від кута повороту ротора

Висновки. 1. Створено новий алгоритм діагностики зношування циліндро-поршневих пар насоса РПГ з кульковими поршнями. 2. Експериментально підтверджено існування зв'язку між закидами тиску в циліндрах та коливаннями статора насоса навколо осі обертання. 3. Вибрано тип експериментальних даних, необхідних для діагностики, які мають високу інформативність, простоту отримання та обробки. 4. Представлено тиск у циліндрі у вигляді залежності від параметра

зношування. 5. Введено параметри, що характеризують знос циліндро-поршневих пар. 6. Запропоновано збурюючий момент від одного з циліндрів представляти кінцевим тригонометричним рядом. 7. Показано, що експериментальні дані по коливаннях статора доцільно представляти амплітудами відповідних косинусних та синусних складових. 8. Запропоновано для розв'язання перевизначеної системи лінійних алгебраїчних рівнянь використовувати метод найменших квадратів, у якому мінімізується норма нев'язки. 9. Наведено результати експериментальних досліджень та їх зіставлення з даними розрахунків. 10. Запропонований алгоритм має значні перспективи для вирішення широкого кола проблем діагностики ГОП з кульковими РПГ.

Список використаних джерел

1. HMPT-1250. Compact transmission for AFAS/FARV. Transmission Programs Defense Systems Martin Marietta.– 1993.
2. Bohach G. A study and optimization of a radial ball piston pump for high-speed applications: дис.– University of Minnesota, 2021.
3. Vladimir M. Shatokhin, Boris F. Granko, Vladimir N. Sobol. Vibration diagnostic of wear for cylinder-piston pumps couples of a radial piston hydromachine. Mechatronic Systems I. Applications in Transport, Logistics, Diagnostics and Control, edied by Waldemar Wójcik, Sergii Pavlov, Maksat Kalimoldayev, (2021), Taylor & Francis Group, CRC Press, Balkema book Boca Raton, London, New York, Leiden, PP. 39-52, 306 P. ISBN 978-1-032-10583-3 <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57208771905>.
4. Башта Т.М. Об'ємні насоси та гідравлічні двигуни гідросистем.– М.: Машинобудування, 1982.– 606 с.
5. Двайт Г.Б. Таблиці інтегралів та інші математичні формули.– М.: Наука, 1973.– 228 с.
6. Шатохін В.М. Моделювання вібраційних процесів у кулькових радіально-поршневих насосах гідрооб'ємних передач // Perspectives of contemporary science: theory and practice. Proceedings of the 10th International scientific and practical conference. SPC “Sci-conf.com.ua”. Lviv, Ukraine. 2024. Pp. 445-452. URL: <https://sci-conf.com.ua/x-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-perspectives-of-contemporary-science-theory-and-practice-11-13-11-2024-lviv-ukrayina-arhiv/>
7. Лойцянский Л.Г., Лур'є А.И. Курс теоретичної механіки. У 2-х томах. Т. II. Динаміка.– М.: Наука, 1983.– 640 с.

ДОСЛІДЖЕННЯ КОНСТРУКЦІЙ ЦЕНТРИФУГ ТА РЕЖИМІВ ЇХ РОБОТИ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ БЕЗНАПІРНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ТРУБ

Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова

Виробництво безнапірних залізобетонних труб методом центрифугування є одним із найбільш ефективних способів формування довгомірних трубчастих виробів, що забезпечує високу щільність бетонної структури, рівномірний розподіл матеріалу по перерізу та підвищення експлуатаційних характеристик готової продукції. Якість виробів при цьому визначається не лише складом бетонної суміші, а й конструктивними особливостями центрифуги, характером взаємодії форми з приводною системою та режимами її обертання.

Метою роботи є дослідження конструкцій технологічного обладнання для центрифугування залізобетонних труб, аналіз режимів його роботи та визначення конструктивних рішень, які забезпечують підвищення ефективності процесу формування виробів.

Проведений аналіз показав, що сучасні центрифуги можна поділити на три основні конструктивні групи: пасові, роликові та осьові (шпиндельні). Кожна з них має характерні особливості передачі крутного моменту, схеми опирання форми, умов балансування та діапазону робочих швидкостей. Пасові центрифуги забезпечують автоматичне самобалансування форми та характеризуються невисоким рівнем шуму, однак потребують постійного контролю натягу ремнів. Осьові машини дозволяють реалізувати високі швидкості обертання, але відзначаються складністю конструкції та обмеженнями під час формування довгомірних виробів. Найбільш універсальними для промислового виробництва є роликові центрифуги, що поєднують достатню жорсткість конструкції, простоту експлуатації та можливість використання форм різних типорозмірів.

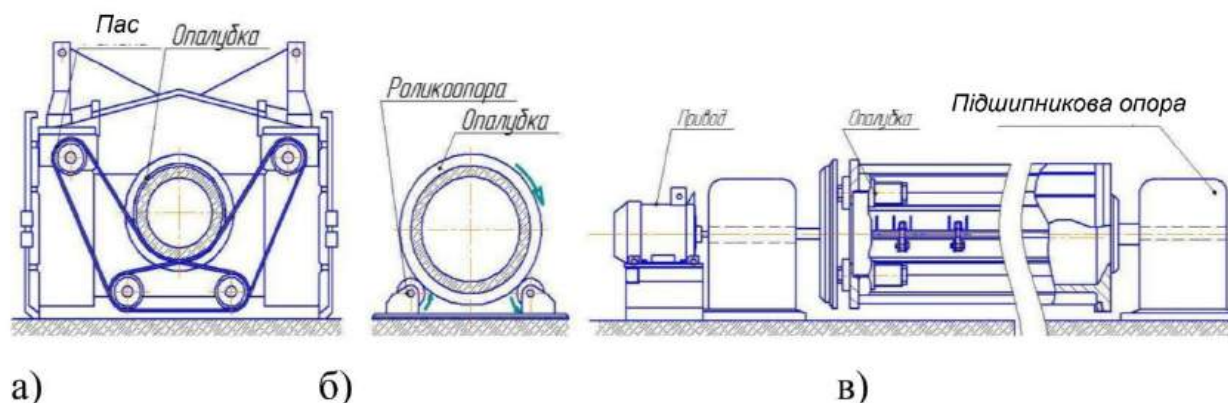


Рис. 1. Конструктивні схеми пасової, роликової та осьової центрифуг

Особливу увагу приділено аналізу конструкцій центрифуг МЦО-2, МР-270, МР-280 та МР-380. Виконане порівняння показало, що розвиток конструкцій здійснювався у напрямку підвищення жорсткості опорної системи, удосконалення приводів, застосування амортизаційних вузлів та зниження рівня динамічних навантажень. Встановлення пружних амортизаторів у роликових опорах забезпечує самовстановлення форми під час обертання, зменшує передачу вібрацій на фундамент та підвищує стабільність роботи обладнання. Використання багатодвигунних приводів дозволяє реалізувати значний пусковий момент,

необхідний для розгону форми, заповненої бетонною сумішшю, без перевантаження окремих елементів трансмісії.

Одним із визначальних факторів ефективності процесу є режим центрифугування. На початковій стадії здійснюється розгін форми до невеликої частоти обертання, що забезпечує рівномірний розподіл бетонної суміші вздовж її довжини. Подальше збільшення швидкості обертання призводить до виникнення відцентрових сил, під дією яких відбувається ущільнення бетонної суміші, видалення надлишкової води та формування щільної структури бетону. Завершальна стадія процесу виконується за максимальної частоти обертання, що забезпечує досягнення необхідних фізико-механічних властивостей готового виробу. Аналіз показав, що порушення швидкісного режиму негативно впливає на рівномірність товщини стінки труби, спричиняє появу локальних зон підвищеної пористості та погіршує експлуатаційні характеристики виробів.

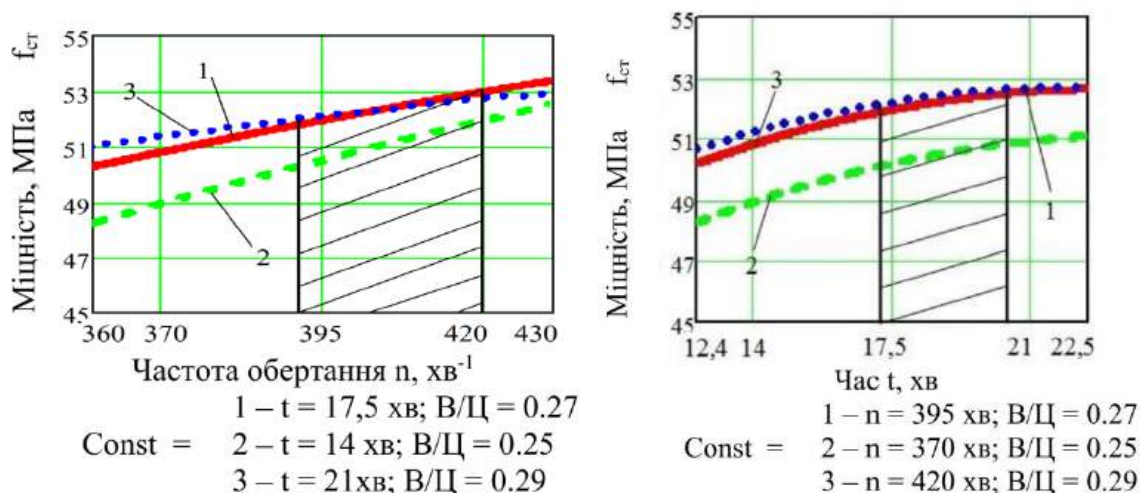


Рис. 2. Залежність технологічного процесу формування труб від режиму центрифугування

Проведене дослідження дозволило встановити, що найбільш перспективним напрямом удосконалення обладнання є поєднання роlikової схеми центрифуги з індивідуальними приводами, амортизованими роlikовими опорами та системою плавного регулювання частоти обертання. Така конструкція забезпечує зменшення динамічних навантажень, стабілізацію процесу центрифугування, підвищення рівномірності ущільнення бетонної суміші та покращення якості безнапірних залізобетонних труб.

Отримані результати підтверджують, що підвищення ефективності виробництва досягається не лише за рахунок удосконалення конструкції центрифуги, а й шляхом оптимізації режимів її роботи, які визначають кінцеві фізико-механічні властивості сформованих виробів.

Список використаних джерел

1. Назаренко І. І. Машины для виробництва будівельних матеріалів : підручник. Київ : КНУБА, 1999. 488 с.
 2. Гарнець В. М. Машины і обладнання для виробництва будівельних матеріалів : підручник. Київ : Вища школа, 2004. 590 с.
 3. Свідерський А. Т., Маслюк В. А., Лівінський О. М. Механічне обладнання підприємств будівельної індустрії : навчальний посібник. Київ : КНУБА, 2005. 432 с.
- Дворкін Л. Й., Дворкін О. Л. Будівельне матеріал

7. ПРОЦЕСИ ФІЗИКО-ТЕХНІЧНОЇ ОБРОБКИ ТА НАНОТЕХНОЛОГІЇ

УДК 621.35:537.525.5:620.3

Баранова Є.О., магістр
Y.O.Baranova@khai.edu
Бреус А.О., к.т.н., доцент
Andrii.Breus@kname.edu.ua

КОНЦЕПЦІЯ ПЛАЗМОВО-АСИСТОВАНОГО ОДЕРЖАННЯ БЕЗЗВ'ЯЗУВАЛЬНИХ Ni–Fe–O-АНОДІВ НА НІКЕЛЕВІЙ СІТЦІ

Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, Україна

Перехід до низьковуглецевої енергетики підвищує потребу в технологіях накопичення надлишкової електроенергії від відновлюваних джерел. Одним із перспективних рішень є її перетворення на енергію хімічних зв'язків водню шляхом електролізу води. Ефективність цього процесу значною мірою обмежує анодна реакція виділення кисню (oxygen evolution reaction, OER), яка відбувається через декілька стадій перенесення заряду та потребує значного перенапруження [1]. Тому актуальним завданням є створення доступних і стабільних анодних матеріалів, здатних прискорювати OER у лужному середовищі.

Матеріали системи Ni–Fe–O належать до найбільш активних неблагородних електрокаталізаторів OER. Під час анодної поляризації їх поверхня може реконструюватися з утворенням Ni(Fe)OOH-подібного стану, а взаємодія центрів Ni і Fe через кисневі містки сприяє стабілізації реакційних інтермедіатів [2]. Водночас функціональні характеристики визначаються не лише середнім співвідношенням Ni/Fe, а й морфологією, дефектністю, міжфазними межами, електричним контактом із підкладкою та характером електрохімічної реконструкції. Для порошкових каталізаторів додатковим обмеженням є застосування полімерного зв'язувального, яке може частково блокувати активну поверхню й ускладнювати перенесення заряду та газовиділення.

Перспективною є безпосередня побудова відкритої мережі Ni–Fe–O-нанолистів на струмопровідній нікелевій сітці. Така архітектура має поєднувати велику доступну поверхню, короткі шляхи перенесення електронів та йонів, механічно міцний контакт із підкладкою і полегшене відведення бульбашок кисню. Плазмові методи вже продемонстрували придатність до формування беззв'язувальних Ni–Fe-вмісних електродів і керування їх наноморфологією [3, 4]. Проте для тліючого розряду ще не встановлено цілісного зв'язку між електричними та геометричними параметрами процесу, потоками компонентів, зародженням і ростом наноструктур, їх початковим станом та подальшою OER-активністю.

Метою роботи є обґрунтування експериментального підходу до керованого плазмово-асистованого одержання беззв'язувальних Ni–Fe–O-анодів на нікелевій сітці та визначення системи параметрів, необхідної для побудови залежності «процес – структура – активний стан – електрокаталітичні властивості». Принципову схему запропонованого реактора наведено на рис. 1. У вакуумній камері, що виконує функцію заземленого анода, розміщено порожнистий Fe-катод і негативно зміщену Ni-сітку. Два незалежні джерела постійної напруги забезпечують роздільне керування режимом розряду катода та енергетичним впливом на підкладку.

У кисневмісному середовищі розпилення Fe-катода формує потік Fe-вмісних частинок, а джерелом Ni є поверхня сітки. Дія активного кисню, йонів і нагрівання має забезпечити окиснення та анізотропний ріст. Керованими чинниками є тиск $p(\text{O}_2)$, відстань d і кут α , електричні параметри обох контурів, температури катода та сітки, а також тривалість оброблення. Передбачається, що їх узгоджене поєднання забезпечить формування відкритої мережі вертикальних Ni–Fe–O-нанолистів.

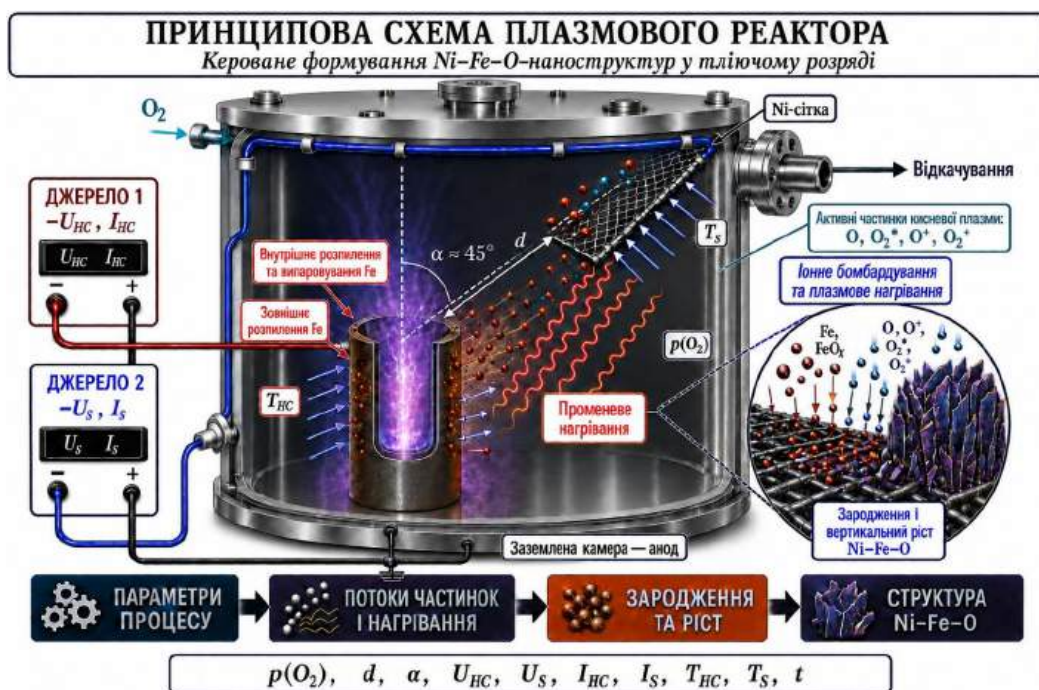


Рис. 1. Схема формування Ni-Fe-O-наноструктур у тліючому розряді

Гіпотезу планується перевіряти варіюванням $p(\text{O}_2)$, d , α , електричних параметрів і температури. Контролем слугуватимуть Ni-сітка та однокомпонентні Ni-O- і Fe-O-зразки. Морфологію, склад, фазовий і хімічний стан передбачається досліджувати методами SEM/EDS, XRD, Raman і XPS. Зіставлення результатів із параметрами розряду дозволить побудувати карту керування складом, дефектністю, пористістю та геометрією нанолістів.

OER-характеристики визначатимуться в 1 М КОН у триелектродній системі. Після циклічного кондиціонування оцінюватимуться перенапруження, тафелівський нахил, опір перенесення заряду та електрохімічно активна площа поверхні. Тривалі випробування разом із післятестовими SEM/EDS, Raman і XPS мають відокремити оборотне утворення активного Ni(Fe)OOH-подібного шару від розчинення Fe та руйнування наноструктури.

Запропонований підхід має встановити причинно-наслідковий зв'язок між параметрами тліючого розряду, структурою Ni-Fe-O, її електрохімічною реконструкцією та балансом OER-активності і стабільності. Практичним результатом має стати відтворюваний беззв'язувальний анод на Ni-сітці для лужного або аніонообмінного електролізу води.

Список використаних джерел

1. Water electrolysis / A. J. Shih et al. // Nature Reviews Methods Primers. – 2022. – Vol. 2. – Article 84. – doi: 10.1038/s43586-022-00164-0.
2. In-situ structure and catalytic mechanism of NiFe and CoFe layered double hydroxides during oxygen evolution / F. Dionigi et al. // Nature Communications. – 2020. – Vol. 11. – Article 2522. – doi: 10.1038/s41467-020-16237-1.
3. Nanostructured NiFe (oxy)hydroxide fabricated on nickel foams by laser-induced water plasma for enhanced alkaline oxygen evolution reaction / B. Feng et al. // Applied Surface Science. – 2023. – Vol. 622. – Article 156934. – doi: 10.1016/j.apsusc.2023.156934.
4. Ionomer-Free NiFe/NiFeO Bilayer Oxygen Evolution Reaction Electrocatalyst Prepared by a Magnetron Sputtering at Oblique Angle Bottom-Up Deposition Method / J. M. Luque-Centeno et al. // ACS Catalysis. – 2025. – Vol. 15. – P. 18123–18137. – doi: 10.1021/acscatal.5c04915.

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ОСТРІВКОВОЇ ФАЗИ РОЗПОДІЛУ ЗЕРЕН НА ФОРМУВАННЯ ЯКІСНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОКРИТТЯ

¹ Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова

² Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Україна

Процес формування плазмово-іонних покриттів суттєво відрізняється від традиційних методів осадження тонких плівок, механізми яких достатньо повно досліджені та описані в сучасній науковій літературі. Визначальною особливістю плазмово-іонного осадження є використання від'ємного потенціалу зміщення, прикладеного до підкладки, який забезпечує інтенсивне іонне бомбардування поверхні. За рахунок цього активізуються процеси очищення та активації поверхні, зростає рухливість атомів і створюються сприятливі умови для формування щільної структури покриття навіть за порівняно низьких температур синтезу.

Застосування від'ємного потенціалу зміщення дозволяє ефективно формувати покриття на основі TiN, TaC, Al₂O₃, TiC, VB, ZrC, ZrN та Zr_{0,8}Hf_{0,2}N, забезпечуючи їх високу структурну однорідність, механічну міцність і термічну стабільність. Зниження температури осадження є особливо важливим під час нанесення покриттів на конструкційні та інструментальні сталі, оскільки мінімізує структурні зміни в матеріалі підкладки, зберігає її механічні властивості та розширює можливості застосування технології для деталей складної конфігурації.

Важливою перевагою використання високовольтного від'ємного потенціалу зміщення є суттєве зменшення вмісту крапельної фази, яка є характерним недоліком вакуумно-дугового осадження. Крапельні включення погіршують морфологію поверхні, збільшують шорсткість покриття, створюють локальні концентратори напружень та можуть бути осередками зародження тріщин і передчасного руйнування. Інтенсивне іонне бомбардування забезпечує повторне розпилення слабкозакріплених частинок, запобігає їх накопиченню на поверхні та сприяє формуванню більш рівномірної мікроструктури покриття.

Крім того, енергія іонів, що надходять до поверхні підкладки, визначає кінетику зародження та росту кристалічних зерен. Контроль величини потенціалу зміщення дозволяє регулювати процеси рекристалізації, дисперсність структури, залишкові напруження та текстуру покриття. У результаті формуються дрібнозернисті або наноструктурні покриття з підвищеною твердістю, зносостійкістю, корозійною стійкістю та високою адгезійною міцністю.

Таким чином, застосування від'ємного потенціалу зміщення є одним із ключових технологічних чинників керування процесом плазмово-іонного осадження. Оптимізація його величини та режиму подачі дозволяє цілеспрямовано впливати на фазовий склад, мікроструктуру, дефектність і комплекс експлуатаційних властивостей покриттів, що відкриває широкі можливості для створення високоефективних захисних покриттів нового покоління.

Зі збільшенням амплітуди від'ємного потенціалу зміщення, що подається на підкладку в імпульсному режимі (до 2000 В), спостерігається істотне зменшення кількості та розмірів крапельної фази у формованому покритті. Це пов'язано з посиленням іонного бомбардування поверхні, яке сприяє пригніченню утворення крапельних включень і покращенню однорідності структури покриття. Для формування якісних наноструктурних покриттів доцільним є застосування комбінованого режиму зміщення, за якого імпульсний високовольтний від'ємний потенціал накладається на постійний (плаваючий) потенціал підкладки. Це забезпечує можливість формування надтвердих покриттів на різних типах інструментальних та конструкційних сталей. Вважається, що прикладання від'ємного

потенціалу зміщення до підкладки суттєво впливає на енергію активації поверхневих процесів. У класичних моделях осадження тонких плівок адгезійна взаємодія між покриттям і підкладкою зазвичай описується механізмом фізичної сорбції, зумовленої силами Ван дер Ваальса. Такий підхід є коректним у випадках, коли матеріали підкладки та покриття істотно відрізняються за своїми фізичними властивостями. Водночас у процесах іонно-плазмової обробки, особливо для металевих підкладок, характер взаємодії на межі розділу фаз суттєво змінюється внаслідок розвитку процесів балістичного та каскадного перемішування атомів у приповерхневому шарі. Перед нанесенням покриття поверхню підкладки, як правило, піддають обробці потоками плазми від вакуумно-дугового джерела з енергією іонів порядку 1000 еВ, що є достатнім для їх впровадження на глибину декількох атомних шарів (близько десяти). Додатково в процесі осадження використовують реакційні гази, які інтенсивно іонізуються в плазмовому середовищі та сприяють перебігу плазмохімічних реакцій на поверхні підкладки. У сукупності ці процеси свідчать, що при оцінюванні адгезійної міцності необхідно враховувати можливість формування міцних хімічних зв'язків між покриттям і підкладкою, а не обмежуватися лише моделлю слабкої взаємодії Ван дер Ваальса.

Даценко В. А., PhD, ст. викладач
v.a.datsenko@khai.edu

Шорінов О. В., к.т.н, доцент
o.shorinov@khai.edu

Бондаренко О. В., PhD, ст. викладач
o.v.bondarenko@khai.edu

ГАЗОДИНАМІЧНЕ НАПИЛЮВАННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ПОКРИТТІВ НА ДЕТАЛІ, ВИГОТОВЛЕНІ АДИТИВНИМИ МЕТОДАМИ

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Україна

Аддитивне виробництво забезпечує виготовлення деталей складної геометрії з високим коефіцієнтом використання матеріалу, що особливо актуально для авіаційної та ракетно-космічної техніки. Водночас практика експлуатації показує, що отримані деталі не можуть використовуватися без додаткової післяобробки через підвищену шорсткість поверхні, пористість, дефекти несплавлення, залишкові напруження та геометричні відхилення. Саме ці дефекти суттєво обмежують ресурс і надійність відповідальних конструкцій.

Традиційно ці недоліки усувають механічною обробкою, шліфуванням, поліруванням або термічними процесами. Однак такі методи не дозволяють цілеспрямовано формувати функціональні властивості поверхні, а видалення значного припуску знижує переваги адитивного виробництва щодо економії матеріалу та собівартості виготовлення.

Перспективним напрямом розвитку технологій є використання холодного газодинамічного напилення не як окремого способу нанесення покриттів, а як завершального етапу гібридного технологічного процесу адитивного виготовлення деталей. У такому підході адитивне виробництво забезпечує формування складної геометрії виробу, тоді як холодне газодинамічне напилення виконує функції локального відновлення поверхні, усунення поверхневих дефектів та формування необхідних експлуатаційних властивостей.

На відміну від традиційних процесів наплавлення, холодне газодинамічне напилення відбувається у твердій фазі без плавлення матеріалу, що практично виключає термічний вплив на основу, утворення нових крихких фаз і деградацію структури матеріалу. Високошвидкісне осадження порошкових частинок забезпечує ущільнення поверхневого шару, часткове заповнення відкритої пористості, відновлення локальних дефектів і формування покриттів з високою адгезією. Завдяки цьому технологія може виконувати одночасно відновлювальну та функціональну роль.

Особливу цінність запропонований підхід має для деталей авіаційної техніки, де до матеріалу основи та поверхні висуваються різні вимоги. Несучу здатність виробу забезпечує матеріал, сформований адитивним методом, тоді як поверхневий шар може бути оптимізований під конкретні умови експлуатації шляхом нанесення зносостійких, корозійностійких, жаростійких або високоелектропровідних покриттів. Таким чином реалізується принцип функціонального розподілу властивостей, який практично неможливо забезпечити лише традиційними методами післяоброблення.

Отже, перспективним напрямом розвитку сучасних технологій виготовлення деталей є створення гібридних технологічних процесів, що поєднують адитивне виробництво та холодне газодинамічне напилення. Такий підхід дозволяє перейти від концепції післяоброблення поверхні до концепції керованого формування експлуатаційних властивостей виробу, забезпечуючи не лише усунення дефектів адитивного виробництва, а й локальне створення функціональних зон із заданими фізико-механічними характеристиками. Це відкриває перспективи підвищення ресурсу, ремонтпридатності та ефективності використання деталей авіаційної й ракетно-космічної техніки та визначає доцільність подальших досліджень параметрів ХГН у складі гібридних технологічних процесів.

Довженко О.В., аспірант
o.dovzhenko@student.khai.edu
Безпалов Д.І., аспірант,
bezpalov@khai.edu.

ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕПЛОЗАХИСНІ ПОКРИТТЯ НА ОСНОВІ ОКСИДУ ГАФНІЮ ДЛЯ АВІАЦІЙНИХ ГТД

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Україна

Сучасний етап розвитку авіаційного двигунобудування характеризується постійним прагненням підвищити паливну ефективність та питому потужність газотурбінних двигунів (ГТД). Ключовим фактором досягнення цих показників є підвищення температури газу на вході в турбіну. Для підвищення паливної ефективності та питомої потужності сучасних газотурбінних двигунів (ГТД) температуру газу на вході в турбіну підвищують до 1900-2200К. Це значно перевищує межу термостійкості жароміцних нікелевих сплавів та класичних двошарових теплозахисних покриттів (ТЗП) на основі ітрій-стабілізованого діоксиду цирконію ($ZrO_2-Y_2O_3$, або YSZ), яка становить близько 1500К. Перевищення цього бар'єра викликає деградацію YSZ: високотемпературне спікання, небажані фазові перетворення ($t \rightarrow m$) при охолодженні, об'ємне розширення на 3-7% та, як наслідок, відшарування кераміки..

Оксид гафнію як рішення для ТЗП 6-го покоління. Інтеграція оксиду гафнію (HfO_2) дозволяє обійти фізичні обмеження цирконієвих систем. Завдяки близькості кристалічних структур, у системі ZrO_2-HfO_2 утворюються суцільні тверді розчини заміщення. Основні фізико-хімічні переваги:

- висока фазова стабільність: допущення гафнієм послаблює внутрішні напруження та переносить фазові переходи на вищі температурні рівні (до 2573К).

- блокування кисню: зниження іонної провідності ($9,2 \cdot 10^{-4} \text{ S} \cdot \text{cm}^{-1}$ проти $0,1 \text{ S} \cdot \text{cm}^{-1}$ для YSZ) суттєво уповільнює дифузію кисню до металу та ріст термічно вирощеного оксидного шару (TGO).

- краща адгезія: значне зменшення внутрішніх термічних напруг та рекордна термоциклічна стійкість (до 3238 циклів для системи $La_2Ce_{2.09}O_{7.18}$).

Для оцінки стану лопатки було застосовано математичну модель теплопровідності багатшарової структури (на базі рівнянь Ньютона-Ріхмана та Фур'є). Розрахунки довели, що використання кераміки з HfO_2 :

- знижує коефіцієнт теплопровідності шару на 20-30% (до показників 0,5-1,1 (Вт/(м*К))).

- знижує рівень нагріву базового металу лопатки на 10-13% порівняно зі стандартним YSZ.

- Демонструє максимальний ефект при товщині керамічного шару 400-500 мкм (потенціал зниження температури на 6,5-19,5% для системи 7,5YSH) (таблиця 1).

На ряду з тим дослідження виявили чутливість таких ТЗП до хімічного складу. Домішки легуючих елементів (Mo, Ta, Re) у кількості понад 0,5 ат.% негативно впливають на кінетику високотемпературного окислення.

Застосування HfO_2 відкриває можливість створення ТЗП шостого покоління, що здатні надійно працювати за температур понад 2000К без зміни конструкції системи охолодження. Це дозволить підвищити загальну ефективність авіаційних ГТД на 10-15%. Подальші дослідження доцільно спрямувати на проектування багатшарових та градієнтних систем (наприклад, YSZ/YSH), а також експериментальне отримання та тестування наноструктурованих покриттів системи $ZrO_2-Y_2O_3-HfO_2$

Таблиця 1

Порівняння властивостей традиційного та модифікованого ТЗП

Параметр	YSZ	HfO ₂ -модифіковане ТЗП
Робоча температура, К	до 1500	1900 - 2000
Теплопровідність, Вт/(м*К)	0,8 - 2,0	0,5 - 1,1
Фазова стабільність	середня	висока
Стійкість до спікання	середня	підвищена
Проникність кисню висока	висока	знижена
Зниження температури металу	-	10–13 %

Список використаних джерел

1. Ющенко К. А., Малащенко І. С., Яровицин А. В., Кушнар'ова Т. М., Гусєв Ю. В., Петрик І. А. Аналіз руйнування та довговічності лопаток турбін з захисним покриттям. // Вібрації в техніці та технологіях. – Вінниця : ВНАУ, 2015. 1 № 1. - С. 117-124.
2. Балущок К. Б., Селіверстов О. Г., Прокопенко О. М., Сахно С. С. Оцінка можливості виявлення тріщин під час контролю ЛЮМ1-ОВ на лопатках турбін після нанесення комплексних жаростійких покриттів. // Авіаційна та космічна техніка і технологія. - Харків : ХАІ, 2024. - № 5. - С. 46-55.
3. Mechanical and thermo-physical properties of plasma-sprayed thermal barrier coatings: a literature survey [Text] / P. Planques, V. Vidal, P. Lours, V. Proton, F. Crabos, & et al. // Oxidation of Metals. - 2017. No. 88. - P. 133-143. DOI: 10.1007/s11085-016-9693-1.
4. Визначення технологічних параметрів лазерного випромінювання для отримання субмікро- та наноструктур у зміцнювальних покриттях на сталях / Ю. В. Широкий, Ю. О. Сисоєв, Т. О. Постельник // Відкриті інформаційні та комп'ютерні інтегровані технології. - 2023. - № 98. - С.77-90.
5. Movchan, B. A. Advanced graded protective coatings, deposited by EBPVD [Text] / B. A. Movchan, & K. Yu. Yakovchuk // Materials Science Forum. - 2007. - Vols. 546-549. - P. 1681-1688.
6. Яровицин А. В. Расчетная оценка эффективности применения теплозащитных покрытий на охлаждаемых рабочих лопатках турбин высокого давления. // Вісник двигунобудування. – Запоріжжя : ЗНТУ, 2014. - № 1. - С. 88-96.
7. Clarke D. R., Ochsner M., Padture N. P. Thermal-barrier coating for more efficient gas-turbine engines // Materials research society. 2012. Vol. 37. P. 891-898.
8. Єфанов В. С. Вплив технології виготовлення випаровуваних катодів на якість іонно-плазмового покриття на лопатки турбін. // Авіаційна та космічна техніка і технологія. - Харків : ХАІ, 2021. - № 6. - С. 34-42.

ПЛАЗМОВЕ ФОРМУВАННЯ БЕЗЗВ'ЯЗУВАЛЬНИХ Cu–Ni–O-АНОДІВ ДЛЯ КАРБАМІД-АСИСТОВАНОГО ОДЕРЖАННЯ ВОДНЮ

Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, Україна

Електрохімічне окиснення карбаміду (urea oxidation reaction, UOR) розглядають як перспективну анодну реакцію для одночасного зниження енерговитрат на одержання водню та очищення карбамідовмісних вод. Її теоретичний рівноважний потенціал становить близько 0,37 В відносно RHE, тоді як для реакції виділення кисню він дорівнює 1,23 В [1]. Практичну реалізацію UOR, однак, ускладнюють багатостадійне перенесення шести електронів, повільна кінетика та можливість утворення побічних азотовмісних продуктів. Тому потрібні активні й селективні аноди, придатні до тривалої роботи в концентрованому лужному електроліті.

Нікелеві оксиди та гідроксиди є доступною основою UOR-каталізаторів. Під час анодної поляризації їх поверхня реконструюється з утворенням високовалентного NiOOH-подібного стану, який бере участь в окисненні карбаміду [2]. Введення Cu може змінювати електронне та координаційне оточення центрів Ni, покращувати перенесення заряду й адсорбцію реакційних інтермедіатів. Позитивний синергетичний ефект Cu і Ni показано для Cu-допованого NiO та CuO–Ni(OH)₂-нанолистів [3, 4]. Водночас активність і селективність визначаються не лише складом, а й морфологією, дефектністю, доступністю поверхні та характером електрохімічної реконструкції.

Доцільною архітектурою є беззв'язувальна мережа Cu–Ni–O-нанолистів, безпосередньо сформована на мідній сітці. Відмова від полімерного зв'язувального має зберігати відкриті активні ділянки, зменшувати контактний опір і полегшувати масоперенесення. Мідна сітка одночасно виконує функції підкладки, струмопровідної основи та джерела Cu, а плазмове введення Ni дає змогу незалежно змінювати співвідношення компонентів і енергетичний вплив на поверхню. Невстановленим залишається взаємозв'язок між параметрами тліючого розряду, ростом Cu–Ni–O, формуванням активного стану та UOR-характеристиками.

Метою роботи є обґрунтування підходу до керованого плазмового одержання беззв'язувальних Cu–Ni–O-анодів та визначення параметрів, необхідних для побудови залежності «процес – структура – активний стан – активність і селективність UOR». У запропонованому реакторі (рис. 1) заземлена вакуумна камера є анодом, порожнистий Ni-катод формує потік Ni-вмісних частинок, а Cu-сітка закріплена на графітовому столику-катоді. Два незалежні джерела постійної напруги забезпечують окреме керування розрядом порожнистого катода та зміщенням підкладки.

У середовищі O₂ розпилення Ni-катода поєднується з участю Cu-сітки, активного кисню, іонного бомбардування й плазмового нагрівання. Керованими чинниками є $p(\text{O}_2)$, відстань d і кут α , електричні параметри обох контурів, температури катода й сітки та тривалість оброблення. Їх узгодження має забезпечити окиснення, дифузію та анізотропний ріст Cu–Ni–O-нанолистів.

Гіпотезу перевірятимуть серіями зі зміною $p(\text{O}_2)$, d , α , електричних параметрів і температури; контролем слугуватимуть Cu-сітка, CuO_x без Ni та Ni-вмісний зразок. Морфологію, склад і хімічний стан досліджуватимуть методами SEM/EDS, XRD, Raman і XPS до активації та після тривалого UOR-тесту.

Властивості оцінюватимуть у двокамерній комірці з аніонообмінною мембраною: аноліт – 1 М КОН і близько 0,33 М карбаміду, католіт – 1 М КОН. Після активації визначатимуть потенціали за заданих густин струму, тафелівський нахил, опір перенесення заряду, активну площу та стабільність. Порівняння КОН з карбамідом і без нього відокремить UOR від OER,

а аналіз N_2 , $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$, NO_2^- , NO_3^- , ціанату й карбонату дасть змогу оцінити селективність і фарадєйські виходи.

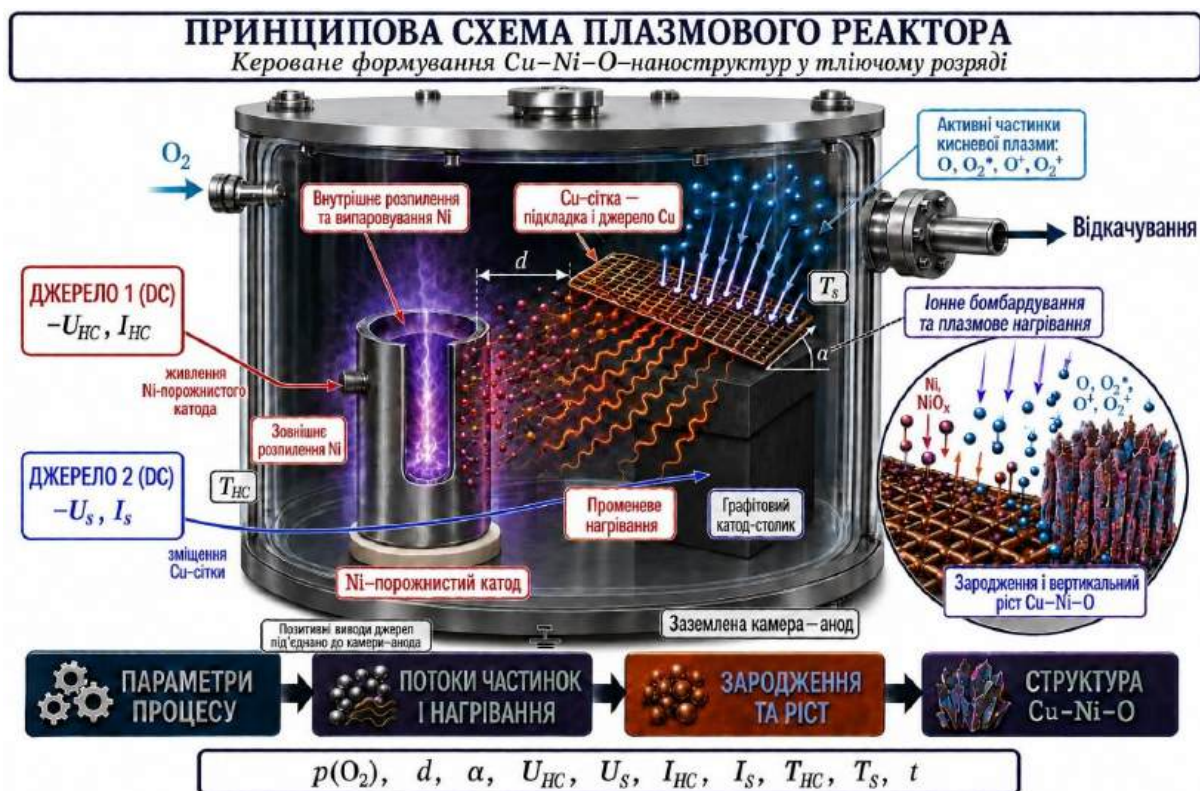


Рис. 1. Схема формування Cu–Ni–O–наноструктур у тліючому розряді

Підхід має встановити зв'язок між режимом плазмового синтезу, структурою Cu–Ni–O, утворенням NiOOH-подібного шару та активністю, селективністю й стабільністю UOR. Очікуваним практичним результатом є беззв'язувальний анод на Cu-сітці для карбамід-асистованого одержання водню та очищення карбамідовмісних вод.

Список використаних джерел

1. Urea catalytic oxidation for energy and environmental applications / X. Gao, S. Zhang, P. Wang et al. // Chemical Society Reviews. – 2024. – Vol. 53. – P. 1552–1591. – doi: 10.1039/D3CS00963G.
2. Reconstruction of Ni-based catalyst for electrocatalytic urea oxidation reaction / X. Gao, J. Dong, H. Yang et al. // Journal of Alloys and Compounds. – 2025. – Vol. 1012. – Article 178477. – doi: 10.1016/j.jallcom.2025.178477.
3. Synergistic effect of Cu-doped NiO for enhancing urea electrooxidation: Comparative electrochemical and DFT studies / M. A. Hefnawy, S. A. Fadlallah, R. M. El-Sherif, S. S. Medany // Journal of Alloys and Compounds. – 2022. – Vol. 896. – Article 162857. – doi: 10.1016/j.jallcom.2021.162857.
4. CuO–Ni(OH)₂ nanosheets as effective electro-catalysts for urea oxidation / J.-H. Yang, M. Chen, X. Xu et al. // Applied Surface Science. – 2021. – Vol. 560. – Article 150009. – doi: 10.1016/j.apsusc.2021.150009.

АНАЛІЗ ЧИННИКІВ СТАБІЛЬНОСТІ МІЖЕЛЕКТРОДНОГО ЗАЗОРУ ПІД ЧАС ПРЕЦИЗІЙНОГО ЕЛЕКТРОХІМІЧНОГО ОБРОБЛЕННЯ

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Україна

Електрохімічне оброблення ґрунтується на керованому анодному розчиненні матеріалу заготовки в електроліті. Катод-інструмент не контактує із заготовкою, тому процес не супроводжується силами різання та механічним зношуванням робочої поверхні інструмента. Точність формоутворення визначається станом міжелектродного проміжку, у якому одночасно відбуваються перенесення електричного заряду, рух електроліту, виділення теплоти, утворення газової фази та видалення продуктів електрохімічних реакцій.

Міжелектродний зазор не можна розглядати лише як початково встановлену геометричну відстань між катодом і заготовкою. Його фактичне значення змінюється внаслідок переміщення інструмента, анодного розчинення матеріалу, похибок базування, нерівномірності припуску, пружних деформацій технологічної системи та зміни властивостей робочого середовища. На криволінійних поверхнях зазор розподілений нерівномірно навіть за точного позиціонування електрода, оскільки локальна геометрія впливає на конфігурацію електричного поля та напрямок руху електроліту.

Зменшення проміжку знижує його електричний опір і підвищує густину струму. Швидкість анодного розчинення при цьому зростає, але одночасно збільшується ризик електричного пробоя, короткого замикання та порушення циркуляції електроліту. Надмірне збільшення зазору знижує продуктивність, погіршує локалізацію процесу та сприяє небажаному розчиненню матеріалу за межами заданої поверхні. Робочий проміжок повинен зберігатися в діапазоні, у якому забезпечуються необхідна інтенсивність розчинення, безперервне оновлення електроліту та відсутність контакту між електродами.

Класичне уявлення про квазірівноважний міжелектродний зазор передбачає відповідність швидкості подачі катода швидкості анодного розчинення. Такий підхід придатний для усталеного режиму, однак на початку оброблення, під час зміни швидкості подачі, коливань напруги або властивостей електроліту процес не є стаціонарним. У кінематично складних схемах фактичний зазор додатково залежить від взаємного руху електродів. Моделювання й експериментальна перевірка таких процесів підтверджують, що допустиме значення зазору визначається спільною дією напруги, електропровідності, швидкості подачі та кінематичних параметрів [1].

Метою роботи є систематизація чинників, які визначають стабільність міжелектродного зазору під час прецизійного електрохімічного оброблення, а також визначення параметрів, придатних для оцінювання стану процесу та коригування режиму роботи обладнання.

Під стабільним станом міжелектродного проміжку доцільно розуміти режим, за якого анодне розчинення відбувається без контакту електродів, різких струмових імпульсів, неконтрольованого розширення активної зони та порушення відведення теплоти, газу й продуктів реакції. Стабільність не означає незмінності геометричного зазору. Його локальні значення можуть змінюватися відповідно до форми поверхні та заданого закону подачі, однак ці зміни не повинні призводити до втрати керованості процесу.

Початковий стан проміжку значною мірою визначається фактичною геометрією заготовки. Нерівномірність припуску, шорсткість, хвилястість, локальні виступи та похибки базування створюють ділянки зближення електродів. У цих місцях підвищується густина струму й прискорюється розчинення матеріалу. За використання заготовок, попередньо отриманих литтям, штампуванням або адитивним виробництвом, реальна поверхня може

помітно відрізнятися від номінальної CAD-моделі. Задання одного значення початкового зазору без урахування локальних відхилень поверхні не дає повного уявлення про умови початку оброблення.

Вплив геометричних відхилень посилюється на крайових, увігнутих і опуклих ділянках. Катод не є точним еквідистантним негативом готової деталі, оскільки швидкість анодного розчинення залежить від локального розподілу електричного поля. Поблизу країв і переходів густина струму може збільшуватися, що потребує коригування форми інструмента або режимів подачі. Похибка взаємного нахилу електродів призводить до систематичного зменшення проміжку з одного боку робочої зони та збільшення з іншого.

Електричний стан проміжку характеризується напругою, силою струму, локальною густиною струму та часовими параметрами імпульсів. Різке зростання струму часто свідчить про зменшення електричного опору, однак воно не завжди пов'язане лише зі зближенням електродів. Аналогічну зміну можуть спричинити нагрівання електроліту, зменшення газової частки або зміна його концентрації. Струмовий сигнал є інформативним показником стану процесу, але його необхідно аналізувати разом із положенням катода та параметрами подачі електроліту.

Коливання напруги безпосередньо змінюють інтенсивність анодного розчинення. Якщо напруга тимчасово зменшується за незмінної швидкості подачі, катод продовжує наближатися до поверхні швидше, ніж видаляється матеріал. Після відновлення напруги струм може різко зрости через уже зменшений проміжок. В імпульсному процесі важливими є не лише амплітуда й тривалість імпульсу, а й тривалість паузи, протягом якої відбуваються оновлення електроліту, видалення газу та часткове вирівнювання концентраційних неоднорідностей.

Швидкість розчинення залежить від струмової ефективності, поляризації, пасивації та стану поверхні матеріалу. Ці характеристики змінюються зі складом сплаву, температурою, концентрацією електроліту та режимом живлення. Розрахунок, у якому швидкість видалення матеріалу вважається пропорційною струму з постійним коефіцієнтом, може давати помітну похибку за зміни електрохімічних умов.

Стабільність зазору неможливо забезпечити без інтенсивного оновлення робочого середовища. Електроліт проводить струм, відводить теплоту, виносить продукти анодного розчинення та газові бульбашки. Недостатня витрата спричиняє накопичення продуктів реакції й локальну зміну провідності. Застійні зони можуть виникати біля глухих порожнин, різких розширень, на ділянках зіткнення потоків і в зонах складної геометрії.

Загальна витрата електроліту не завжди характеризує стан усієї робочої області. Часткове блокування одного каналу або нерівномірний розподіл потоку можуть незначно змінити показання загального витратоміра, але створити локальну нестабільність. Для комбінованих і багатоканальних електродів потрібно враховувати витрату через окремі вихідні отвори, втрати тиску в каналах та можливість утворення зон рециркуляції.

Надмірне підвищення тиску також не гарантує стабільності. Воно збільшує навантаження на електрод, ущільнення й елементи кріплення, а в тонкостінних конструкціях може спричинити деформацію робочої поверхні. Зміна зазору впливає на гідравлічний опір: на вузьких ділянках швидкість потоку може підвищуватися, але одночасно зростають втрати тиску. Уздовж протяжної робочої поверхні це створює різні умови на вході та виході.

Тепловий стан проміжку формується джоулевим нагріванням електроліту й теплотою електродних реакцій. Зі зростанням температури змінюються електропровідність, в'язкість та інтенсивність електрохімічних реакцій. Локальне нагрівання може підвищити струм, який, своєю чергою, посилює тепловиділення. Такий взаємний вплив створює ризик розвитку локальної нестабільності, особливо у вузьких проміжках і напівзамкнених порожнинах [2].

На катоді виділяється водень, тому електроліт у робочій зоні фактично є газорідним середовищем. Газові бульбашки зменшують ефективну провідність і змінюють структуру потоку. Їхня концентрація зростає вздовж напрямку руху електроліту, у верхніх частинах порожнин та зонах із малою швидкістю. Накопичення газу може зменшити струм без збільшення геометричної відстані між електродами. Система, яка оцінює зазор лише за силою

струму, у такій ситуації може помилково збільшити подачу катода. Після видалення газової пробки провідність різко відновлюється, що створює струмовий пік.

Швидкість подачі інструмента повинна відповідати фактичній швидкості розчинення матеріалу. Якщо подача перевищує її, зазор зменшується; якщо є недостатньою — проміжок розширюється, продуктивність знижується, а зона електрохімічного впливу стає менш локалізованою. Під час розгону та гальмування фактична швидкість привода відрізняється від програмно заданої, тому початкова й кінцева ділянки циклу потребують окремого контролю.

Положення електрода змінюється не лише внаслідок роботи привода. На нього впливають жорсткість механічної системи, люфти, биття, похибки напрямних і деформації під дією тиску електроліту. Для довгих, тонкостінних або трубчастих електродів навіть незначна пружна деформація може бути співмірною з допустимим відхиленням міжелектродного зазору.

Розглянуті чинники взаємопов'язані й можуть одночасно впливати на стан робочого проміжку. Узагальнення чинників стабільності міжелектродного зазору, параметрів, що їх характеризують, та можливих проявів нестабільності наведено в табл. 1.

Таблиця 1. Чинники стабільності міжелектродного зазору

Чинник	Параметри, що його характеризують	Можливий прояв нестабільності
Початкова геометрія	Зазор, припуск, шорсткість, похибки базування	Локальне зближення електродів
Електричний режим	Напруга, струм, параметри імпульсів	Струмові піки, пробій, зниження продуктивності
Електрохімічний стан	Струмова ефективність, поляризація, пасивація	Відхилення швидкості розчинення
Подача електроліту	Витрата, тиск, швидкість потоку	Накопичення продуктів реакції
Тепловий стан	Температура, інтенсивність тепловідведення	Локальна зміна провідності
Газовиділення	Газова частка, розподіл бульбашок	Коливання струму, газові пробки
Кінематика	Швидкість, прискорення та похибка подачі	Зменшення або розширення проміжку
Механічна система	Жорсткість, люфт, биття, деформація	Зміщення фактичного положення катода
Система керування	Затримка вимірювань, швидкодія регулятора	Запізнїла або надмірна корекція

Як видно з табл. 1, порушення стабільності може бути спричинене не лише зміною електричного режиму або швидкості подачі, а й геометричними похибками, недостатнім оновленням електроліту, нагріванням, газовиділенням і деформаціями механічної системи. Зменшення витрати електроліту погіршує відведення теплоти й газу, підвищення температури змінює провідність, а зміна струму впливає на швидкість розчинення. За незмінної подачі катода така послідовність може призвести до зміни зазору навіть без порушень у роботі привода.

Стан процесу можна умовно оцінювати як стабільний, граничний або нестабільний. Стабільному стану відповідають відтворювані струмові сигнали, стійка подача електроліту й відсутність значних похибок положення. Граничний стан проявляється збільшенням амплітуди коливань струму, нестабільністю потоку або короточасним відставанням привода. Повторювані струмові піки, пробіи, газові пробки та контакт електродів свідчать про втрату стабільності.

Пряме вимірювання проміжку під час оброблення ускладнене його малим розміром, наявністю електроліту та обмеженим доступом до робочої зони. Стан зазору доцільно оцінювати за сукупністю непрямих сигналів: силою струму, напругою, положенням катода, тиском, витратою та температурою електроліту. В імпульсному режимі додаткову інформацію дають форма окремого струмового імпульсу, час його наростання, максимальне значення та характер спаду.

Струмовий сигнал залишається найбільш доступним показником, але не дозволяє однозначно встановити причину відхилення. Однакове зменшення струму може бути пов'язане зі збільшенням зазору, зростанням газової частки або зниженням провідності електроліту. Поєднання струму з даними про положення катода та тиск дає змогу відокремити кінематичну причину від гідродинамічної.

Для оцінювання поточного стану міжелектродного проміжку необхідно контролювати не один, а декілька взаємопов'язаних параметрів. Основні контрольовані параметри, інформацію, яку вони надають про стан процесу, та можливі керувальні дії наведено в табл. 2.

Таблиця 2. Контрольовані параметри та можливі дії системи керування

Контрольований параметр	Інформація про стан процесу	Можлива керувальна дія
Сила струму	Зміна електричного опору проміжку, наближення до пробойу, порушення стабільності розчинення	Зменшення швидкості подачі, відведення електрода, коригування напруги
Форма струмового імпульсу	Короточасні пробойи, газонаповнення, нестійкий стан проміжку	Зміна тривалості імпульсу або паузи
Напруга	Стан джерела живлення та електричні умови в проміжку	Стабілізація або обмеження напруги
Положення катода	Фактична величина подачі та похибка виконавчого привода	Коригування положення або швидкості переміщення
Тиск електроліту	Зміна гідравлічного опору, можливе блокування каналів	Регулювання продуктивності насоса або положення клапана
Витрата електроліту	Інтенсивність оновлення робочого середовища	Збільшення або зменшення подачі електроліту
Температура електроліту	Тепловий стан проміжку та зміна електропровідності	Зниження струму, посилення охолодження
Акустичний сигнал	Електричний пробій, кавітація або механічний контакт	Аварійне відведення електрода та припинення живлення

Дані табл. 2 показують, що жоден із контрольованих параметрів окремо не дозволяє однозначно визначити причину відхилення процесу. Зростання струму одночасно з переміщенням катода в напрямку заготовки може свідчити про скорочення міжелектродного зазору. Зменшення струму за незмінного положення електрода та падіння тиску може бути пов'язане з порушенням подачі електроліту або накопиченням газової фази. Спільний аналіз електричних, кінематичних і гідродинамічних сигналів створює основу для коригування режиму оброблення в реальному часі.

Для локалізованого електрохімічного оброблення контроль зазору визначає не лише безпеку, а й ширину активної зони. Збільшення відстані між інструментом і поверхнею розширює область розтікання струму, а зменшення підвищує локалізацію, але наближає процес до нестійкого стану. Дослідження локалізованого електрохімічного мікрооброблення показують, що керування зазором є необхідною умовою збереження заданої області видалення матеріалу [3].

Система керування повинна реагувати на небезпечне відхилення раніше, ніж воно призведе до контакту або пробою. За різкого зростання струму доцільними діями є зменшення швидкості подачі, короткочасне відведення електрода або зниження напруги. За поступового зменшення струму потрібно перевірити положення катода, тиск і температуру, оскільки причина може бути пов'язана не з геометричним збільшенням зазору, а з погіршенням стану електроліту.

Перспективна система контролю повинна поєднувати датчики електричних і технологічних параметрів, оцінювання поточного стану процесу та регулятор, який змінює подачу, напругу, параметри імпульсів або тиск електроліту. Така структура відрізняється від традиційного розімкненого керування, у якому режим устанавлюється до початку оброблення й не коригується за фактичним станом робочого проміжку.

Перед початком оброблення необхідно оцінювати фактичну геометрію заготовки, устанавлювати початковий зазор, визначати допустимий діапазон подачі, електричний режим і параметри циркуляції електроліту. Їх потрібно перевіряти не тільки на усталеній ділянці, а й під час початку руху, зміни режиму та завершення циклу.

Числове моделювання може виконуватися з поступовим ускладненням. На першому етапі достатньо електропольової моделі для виявлення ділянок із підвищеною густиною струму. Для вузьких проміжків, високих значень струму, складних порожнин і нерівномірного підведення електроліту необхідно додатково враховувати течію, температуру та газову фазу.

Експериментальне дослідження доцільно проводити із синхронною реєстрацією струму, напруги, положення катода й параметрів потоку. Порівняння записаних сигналів із геометрією обробленої поверхні дозволить устанавити ознаки, які передують втраті стабільності, та визначити граничні значення для алгоритму коригування подачі.

Проведений аналіз показав, що стабільність міжелектродного зазору визначається спільною дією початкової геометрії, електричного режиму, електрохімічних властивостей матеріалу, течії електроліту, температури, газовиділення, кінематики та жорсткості технологічної системи. Контроль одного параметра не забезпечує однозначної оцінки стану процесу. Доцільним є багатопараметричний підхід, який поєднує аналіз струмового сигналу, положення катода, тиску або витрати електроліту та температури.

Подальші дослідження мають бути спрямовані на експериментальне визначення меж стабільного, граничного й нестабільного режимів, вибір інформативних ознак струмового сигналу та розроблення алгоритму коригування швидкості подачі комбінованого електрода.

Список використаних джерел

1. Cao, W. Modeling and experimental validation of interelectrode gap in counter-rotating electrochemical machining / W. Cao, D. Wang, D. Zhu // *International Journal of Mechanical Sciences*. – 2020. – Vol. 187. – Art. 105920. – DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2020.105920.
2. Chang, C. S. Tool design in electrochemical machining considering the effect of thermal-fluid properties / C. S. Chang, L. W. Hourng, C. T. Chung // *Journal of Applied Electrochemistry*. – 1999. – Vol. 29. – P. 321–330. – DOI: 10.1023/A:1003425016532.
3. Li, Y. Localized electrochemical micromachining with gap control / Y. Li, Y. Zhang, G. Yang, L. Peng // *Sensors and Actuators A: Physical*. – 2003. – Vol. 108, No. 1–3. – P. 144–148. – DOI: 10.1016/S0924-4247(03)00371-6.

ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВЕ РАФІНУВАННЯ ЦИРКОНІЮ ВІД КИСНЮ ЧЕРЕЗ СУБОКСИД Al_2O_3

¹Національний науковий центр “Харківський фізико-технічний інститут”, м. Харків

²Інститут Титану, м. Запоріжжя

Цирконій та його сплави є стратегічними конструкційними матеріалами атомної енергетики завдяки унікально низькому ефективному перерізу поглинання теплових нейтронів ($\sigma = 0,18$ барн) та високій корозійній стійкості в середовищі гарячого водяного теплоносія. Саме ці властивості зумовлюють переважне використання сплавів Zircaloy-2, Zircaloy-4, M5 та E110 як матеріалу оболонки тепловиділяючих елементів реакторів на теплових нейтронах [1, 2].

Контроль вмісту кисню є однією з ключових технологічних задач виробництва цирконію ядерної якості. Кисень є ефективним інтерстиційним зміцнювачем, і його концентрація безпосередньо визначає баланс між міцністю та пластичністю сплаву. Водночас висока термодинамічна стабільність оксидних фаз у системі Zr–O суттєво ускладнює видалення кисню на стадії рафінування [4, 5].

Вміст кисню в цирконії на стадії первинного металу істотно залежить від застосованого відновного процесу та умов його проведення. Кальцієртермічний цирконій містить кисень у концентрації 2000–6000 ppm залежно від ступеня оптимізації процесу. Губчастий цирконій, отриманий магнієтермічним відновленням (процес Кролля), характеризується вмістом кисню в діапазоні 600–1200 ppm, що зумовлено нижчим окиснювальним потенціалом процесу порівняно з кальцієртермічним методом. Йодидний цирконій (метод Ван Аркеля – де Бура), який застосовується для отримання еталонних зразків і дослідних партій, має вміст кисню ≤ 100 ppm, проте його виробництво є надзвичайно дорогим і немасштабованим.

Стандарт ASTM B349 на цирконій ядерної якості (марка R60001) встановлює максимально допустимий вміст кисню на рівні 1400 ppm (0,14 мас.%). Однак практичні вимоги сучасних реакторних конструкцій є жорсткішими: для сплавів типу ZIRLO (Zr–Nb–Sn–Fe) та вітчизняного E110 (Zr–1%Nb) оптимальний цільовий діапазон вмісту кисню становить 800–1200 ppm [4]. Саме в цьому діапазоні досягається найкращий баланс між границею текучості (~ 500 –600 МПа), пластичністю ($\delta = 15$ –25 %) та корозійною стійкістю в умовах експлуатації ядерних реакторів.

Електронно-променевий переплав (ЕПП), який є заключним етапом отримання цирконію, характеризується такими особливостями: як встановлено в [6], газоподібні домішки, зокрема водень, видаляються шляхом дегазації з рідкої ванни, тоді як кисень і азот практично не видаляються. Незначне зниження їх концентрації компенсується одночасним випаровуванням цирконію з розплаву, унаслідок чого рівноважний вміст кисню залишається практично незмінним. Це робить традиційний вакуумний ЕПП неефективним як метод розкиснення.

Запропоновано механізм рафінування, що базується на утворенні леткого субоксиду Al_2O_3 під час електронно-променевого переплаву, який є перспективним підходом до вирішення цієї проблеми [6]. Проведено термодинамічне обґрунтування механізму рафінування цирконію від кисню при ЕПП через утворення та видалення $\text{Al}_2\text{O}_3(\text{г})$ за умов $T > 2000$ °C та тиску $\leq 10^{-3}$ Па. Розраховано оптимальну стехіометрію введення Al з умови повного зв'язування надлишкового кисню.

Стандартний метод введення алюмінію у вигляді металу до витратного електрода є неефективним через значну різницю температур плавлення алюмінію та цирконію, що призводить до значних втрат алюмінію під час вакуумного плавлення. Для вирішення цієї проблеми було розроблено технологію легування цирконію алюмінієм у процесі магністермічного відновлення. За допомогою цієї технології отримано зразки цирконію з різним вмістом алюмінію [7].

Дослідження мікроструктури показали, що розроблена технологія забезпечує рівномірне розподілення алюмінію в цирконієвій матриці за рахунок утворення інтерметалідних сполук. Рентгенофазовим аналізом підтверджено формування фаз Zr_2Al , Zr_3Al та Zr_4Al_3 у губчастому цирконії, що свідчить про ефективне легування.

На основі хімічного аналізу встановлено, що отриманий вміст алюмінію відповідає вимогам до лігатури цирконій–алюміній за ТУ 48-4-453-84.

Дослідження ЕПП губчастого цирконію показали, що певне зниження вмісту кисню спостерігається вже після одного циклу ЕПП без введення алюмінію (з 2600 до 2100 ppm), однак воно є незначним і зумовлене переважно видаленням вологи та сорбованого кисню. Суттєве розкислення досягається лише за умови введення алюмінію (табл. 1): після двократного ЕПП сплаву Zr–Al вміст кисню зменшується з 2300 до 740 ppm, що відповідає цільовому діапазону 800–1200 ppm для цирконію ядерної якості за ASTM B350. Вміст Al після рафінування становить 0,18 мас. %, за іншими металевими домішками отриманий метал відповідає вимогам ASTM B350.

Таблиця 1 – Склад досліджуваних зразків цирконію

Матеріал		Вміст домішок та легувальних елементів, ppm				
		(Al – мас. %)				
		Cl	N	C	Al	O
Цирконій губчастий	вихідний	210	200	230	-	2600
	після ЕПП	3,1	0,006	120	-	2100
Цирконій губчастий з додатками алюмінію	вихідний	280	340	220	2,78	2300
	після 2 × ЕПП	3,6	0,006	130	0,18	740

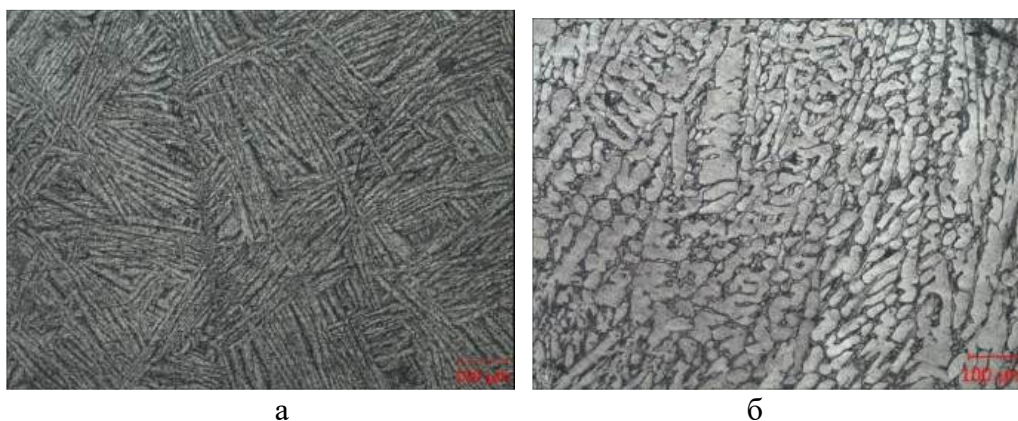


Рис. 1. Структура плавлених цирконію та сплаву цирконій алюміній

Як видно з рисунка 1, плавлений цирконій має пластинчасту структуру типу «кошикового плетіння». Пластини згруповані в пакети та орієнтовані під певними кутами. Чітко ідентифікується структура α -фази у вигляді окремих світлих зерен. По межах зерен спостерігаються затемнені ділянки, зумовлені наявністю домішкових включень.

На відміну від чистого цирконію, сплав цирконій–алюміній характеризується чітко вираженою двофазною структурою. Спостерігається дендритна будова α -фази, у якій виділяються дендрити першого та другого порядків, а також у незначній кількості — третього порядку. У міждендритному просторі формується друга, темніша фаза евтектоїдного походження.

Таким чином, структура експериментальних сплавів цирконію, легованого алюмінієм, є однорідною та характеризується рівномірним розподілом легувального елемента в цирконієвій матриці.

Промислове впровадження технології легування цирконію алюмінієм дозволить суттєво спростити процес його рафінування за допомогою електронно-променевого переплаву.

Висновки

Розроблено технологію легування цирконію алюмінієм у процесі магнієтермічного відновлення. Рентгенофазовим аналізом підтверджено формування інтерметалідних фаз Zr_2Al , Zr_3Al та Zr_4Al_3 у губчастому цирконії, що свідчить про рівномірний розподіл легувального елемента.

Термодинамічно обґрунтовано механізм рафінування цирконію від кисню при електронно-променевому переплаві через утворення та видалення Al_2O_3 за умов $T > 2000$ °C та $p \leq 10^{-3}$ Па. Встановлено, що традиційний ЕПП без введення алюмінію практично не забезпечує видалення кисню.

Експериментально підтверджено, що двократний ЕПП цирконію, легованого алюмінієм, забезпечує зниження вмісту кисню з 2300 до 740 ppm (табл. 1), що відповідає вимогам до цирконію ядерної якості.

Встановлено, що кількість введенного алюмінію потребує прецизійного розрахунку, оскільки його надлишок (ступінь видалення кисню ~55 %) призводить до утворення фази Al_3Zr , що є небажаною для матеріалів ядерного призначення.

Список використаних джерел

1. B.O. Okonkwo, Z. Li, L. Li, et al. Research progress on zirconium alloys: applications, development trend, and degradation mechanism in nuclear environment // *Corrosion Reviews*. 2024, № 6, p. 609-628. <https://doi.org/10.1515/corrrev-2024-0075>
2. G. Sukhomlin, T. Dergach. Features of formation of structure and properties of Zr-1Nb alloy when manufacturing fuel element shell tubes // *ScienceRise*. 2019, № 12(65), p. 10-15. <https://doi.org/10.15587/2313-8416.2019.189283>
3. L.V. Shpylovyi, V.S. Biletskyi. Ukrainskyi tsyrkonii [Ukrainian zirconium] // *Zbahachennia Korysnykh Kopalyn*. 2019, № 73(114), p. 41-55. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.23748.78728>
4. K. Vutova, V. Stefanova, E. Manoilov, et al. The Impact of Electron Beam Melting on the Purification of Recycled Zirconium // *Metals*. 2025, № 15(11): 1273. <https://doi.org/10.3390/met15111273>
5. S.V. Ladokhin, V.S. Vakhrusheva. Application of electron beam melting for producing zirconium alloys in Ukraine // *Electrometallurgy Today*. 2018, № 4, p.36-41. <https://doi.org/10.15407/sem2018.04.02>
6. V.M. Azhazha, P.N. Vyugov, S.D. Lavrinenko, M.M. Pylypenko, et al. Electron beam melting of titanium, zirconium and hafnium. In: *Proceedings of the XV International Conference on Physics of Radiation Phenomena and Radiation Materials Science*, 2002, p. 10-15.
7. T.B. Yanko. *Development of technology for complex alloying of titanium and zirconium during magnesium-thermal reduction*: Abstract of dissertation Ph.D. (Technology) Special 05.16.02 / T.B. Yanko. – Dnipro: NMetAU, 2016. – 20 p.

ТЕРМОДИНАМІЧНЕ ПРОГНОЗУВАННЯ ФАЗОУТВОРЕННЯ В КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛАХ СИСТЕМИ Ni–Al–Ti ОТРИМАНИХ МЕТОДОМ ХОЛОДНОГО ГАЗОДИНАМІЧНОГО НАПИЛЕННЯ

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Україна

Сучасний розвиток авіаційної техніки потребує створення композиційних покриттів, здатних забезпечувати високу зносостійкість, жароміцність і довговічність деталей, що працюють в умовах інтенсивних механічних та термічних навантажень [1, 2]. Одним із найбільш перспективних способів отримання таких покриттів є холодне газодинамічне напилення (ХГН), яке забезпечує осадження порошкових частинок у твердому стані без їх плавлення [1, 3]. Це дозволяє мінімізувати окиснення матеріалу, зберегти вихідний фазовий склад порошків та сформувати щільні покриття з високою адгезією до основи. Разом із тим структура покриттів після ХГН є нерівноважною. Вона характеризується високою густиною дислокацій, залишковими стискальними напруженнями та недостатньо сформованими металургійними зв'язками між частинками [2, 3]. Для завершення структуроутворення застосовується реакційний відпал, під час якого відбуваються дифузійні процеси, формуються інтерметалідна матриця та вторинні зміцнювальні фази. Ефективність такого підходу значною мірою визначається правильністю вибору складу композиційного матеріалу ще на етапі його проєктування. Аналіз сучасних досліджень показує, що більшість робіт присвячена отриманню інтерметалідів NiAl або NiTi після ХГН [3, 5]. Значно менше уваги приділено багатокомпонентним системам Ni–Al–Ti, у яких одночасно відбуваються процеси формування інтерметалідної матриці та взаємодії з керамічними армувальними частинками. У таких системах використання лише експериментального підходу є недостатньо ефективним через значну кількість можливих комбінацій складів і режимів термічної обробки. Перспективним напрямом є застосування методів CALPHAD-моделювання, які дозволяють прогнозувати фазові рівноваги та оцінювати термодинамічну доцільність реакцій ще до проведення експериментальних досліджень [6, 7].

Метою роботи є обґрунтування термодинамічних критеріїв вибору складу композитів системи Ni–Al–Ti для ХГН шляхом комплексного аналізу фазової стабільності, реакційної активності та можливості локального реакційного синтезу. Термодинамічне моделювання виконано методом CALPHAD із використанням програмного комплексу PyCalphad та термодинамічної бази даних SGTE [6 – 8]. Досліджено п'ять складів системи Ni–Al–Ti зі сталим вмістом нікелю 50 ат. %. Для кожного складу визначено області існування рівноважних фаз, температурні межі стабільності впорядкованої B2-фази, а також виконано оцінку реакцій між титановмісною матрицею та керамічними компонентами B₄C і SiC.

На основі проведених розрахунків запропоновано послідовність термодинамічного проєктування композиційних матеріалів (Рис. 1), яка включає визначення експлуатаційних вимог до покриття, CALPHAD-моделювання фазового складу, оцінку рушійної сили міжфазних реакцій, аналіз локального енерговиділення під час реакційного відпалу та подальшу експериментальну валідацію. Такий підхід дозволяє здійснювати попередній відбір перспективних складів до проведення трудомістких експериментальних досліджень. Результати моделювання показали, що всі досліджені композиції перебувають у межах області стабільності B2-фази, проте характеризуються різною термічною стійкістю. Найбільш сприятливе поєднання температурного інтервалу існування B2-фази та мінімальної схильності до її деградації при нагріванні забезпечує склад Ni₅₀Al₁₈Ti₃₂, який рекомендовано як основу інтерметалідної матриці композиційних покриттів.



Рис. 1. Алгоритм термодинамічного проєктування композитів Ni–Al–Ti для ХГН

Оцінка термодинамічної рушійної сили міжфазних реакцій показала, що взаємодія титану з карбідом бору є найбільш енергетично вигідною та супроводжується утворенням зміцнювальних фаз TiB_2 і TiC . Для систем із карбідом кремнію прогнозується формування фаз Ti_5Si_3 і TiC . Від'ємні значення зміни енергії Гіббса в широкому температурному інтервалі свідчать про високу ймовірність перебігу цих реакцій під час реакційного відпалу. Додатково виконано оцінку локального енерговиділення, яка показала, що реакції взаємодії титану з B_4C можуть характеризуватися високими адіабатичними температурами. Це створює передумови для локальних SHS-подібних процесів у приконтактних областях між матрицею та армувальними частинками. Такі процеси можуть інтенсифікувати дифузію, прискорювати формування вторинних фаз і покращувати металургійний контакт між компонентами композиційного матеріалу. Таким чином, під час вибору складу композиту доцільно враховувати не лише область стабільності інтерметалідної матриці, а й термодинамічну вигідність реакцій з армувальними компонентами та потенціал локального енерговиділення. Комплексний аналіз цих факторів дозволяє перейти від емпіричного підбору складів до їх науково обґрунтованого проєктування.

Запропоновано підхід до термодинамічного проєктування композиційних матеріалів системи Ni–Al–Ti для ХГН, що поєднує CALPHAD-моделювання, оцінку реакційної активності та аналіз локального енерговиділення. Встановлено, що серед досліджених композицій найбільш перспективним є склад $\text{Ni}_{50}\text{Al}_{18}\text{Ti}_{32}$, який характеризується високою стабільністю B2-фази. Показано, що взаємодія з частинками B_4C і SiC є термодинамічно вигідною та супроводжується утворенням зміцнювальних фаз TiB_2 , TiC і Ti_5Si_3 . Запропонований підхід може бути використаний для скорочення обсягу експериментальних досліджень і оптимізації розроблення нових композиційних покриттів для деталей авіаційної техніки.

Список використаних джерел

1. Sudigdo P., Bhattiprolu V.S., Hussain T. Cold spray of Ni-based superalloys: A review on processing and residual stress. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2025. Vol. 34. P. 37–74.
2. Assadi H., Gärtner F., Stoltenhoff T., Kreye H. Bonding mechanism in cold gas spraying. *Acta Materialia*. 2003. Vol. 51. P. 4379–4394.
3. Champagne V.K. The Cold Spray Materials Deposition Process. Fundamentals and Applications. Woodhead Publishing, 2007.
4. Zhang Q., Li C.J., Wang X.R. et al. Formation of NiAl intermetallic compound by cold spraying through post-annealing treatment. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2008. Vol. 17. P. 515–521.
5. Nikbakht R., Seyedein S.H., Kheirandish S. et al. Intermetallic phase evolution of cold-sprayed Ni–Ti composite. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2021. Vol. 30. P. 119–130.
6. Lukas H.L., Fries S.G., Sundman B. Computational Thermodynamics: The CALPHAD Method. Cambridge University Press, 2007.
7. Otis R., Liu Z.K. PyCalphad: Open-source computational thermodynamics in Python. *Journal of Open Research Software*. 2017. Vol. 5.
8. Salifu S., Olubambi P.A. CALPHAD predictions and microstructural evolution of advanced alloy systems. *Materials Today Communications*. 2026. Vol. 50. Art. 114374.

Семененко О.Д., асистент
o.semenenko@khai.edu

Широкий Ю.В., к.т.н., доцент
i.shyrokyi@khai.edu

Фесенко Є.І., аспірант,
y.fesenko@khai.edu

ПЕРСПЕКТИВНІ НАПРЯМИ ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТЕЙ ОТРИМАННЯ НАНОСТРУКТУР

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Україна

Формування наноструктурованих матеріалів є одним із перспективних напрямів сучасного матеріалознавства та інженерії поверхні, оскільки дозволяє суттєво покращити механічні, трибологічні, теплові та експлуатаційні характеристики виробів. Досягнення необхідних структурних змін у поверхневих шарах матеріалу значною мірою визначається умовами підведення енергії, швидкістю розвитку температурних процесів та характером розподілу напружень у зоні обробки. Результати проведених досліджень показують можливість створення температурних полів із керованими середніми температурами та високими швидкостями нагрівання в межах (10^7 – 10^{10} К/с). Такі режими забезпечують виникнення значних температурних напружень порядку (10^8 – 10^{10} Па), що створює сприятливі умови для структурної перебудови матеріалу та формування нанорозмірних елементів у поверхневих шарах. Встановлено, що ефективність утворення наноструктур залежить не лише від абсолютного значення температури, а й від просторово-часового розподілу теплової енергії та глибини проникнення температурного поля [1]. Важливим фактором є забезпечення достатнього заповнення товщини поверхневого шару температурними та напруженими станами, що дозволяє реалізувати процеси фазових перетворень у необхідному об'ємі матеріалу.

Для інтенсифікації процесів структуроутворення доцільно використовувати потоки іонів металів та високоенергетичних нейтралей, які виступають каталізаторами формування наноструктур. Однак у багатьох випадках енергії лише іонного впливу недостатньо для досягнення необхідних умов модифікування матеріалу. У таких випадках ефективним є застосування додаткових джерел енергії – світлопроменевих, плазмових та електронних потоків, а також використання енергії екзотермічних хімічних реакцій. На основі аналізу умов формування наноструктур визначено комплекс основних критеріїв реалізації процесу [1].

Першою необхідною умовою є забезпечення температурного діапазону в межах 500–1500 К, достатнього для активації механізмів структурної перебудови. Формування такого температурного режиму можливе за рахунок комбінованої дії потоків іонів та зовнішніх джерел енергії. Другим важливим фактором є швидкість нагрівання, яка повинна становити не менше 10^7 К/с і в окремих випадках може досягати 10^{15} К/с. Надвисокі швидкості зміни температур дозволяють реалізувати нерівноважні умови та стимулювати утворення ультрадисперсних структур. Третьою умовою є створення високих внутрішніх напружень і тисків у зоні впливу. Температурні напруження порядку 10^9 Па забезпечують активацію процесів дислокаційного переміщення, локального ущільнення структури та зміни фазового складу. Наступним важливим аспектом є забезпечення необхідного просторово-часового розподілу потоків частинок і підведеної енергії. Такий підхід дозволяє досягти максимально можливого коефіцієнта заповнення поверхневого шару температурними та механічними впливами, що безпосередньо визначає товщину сформованого наноструктурного шару [2].

Особливе значення має оптимізація параметрів іонного впливу. Вибір енергії, типу та зарядового стану іонів повинен здійснюватися з урахуванням критеріїв рівності або близькості температурних полів і температурних напружень на заданих глибинах проникнення частинок. Такий підхід дозволяє забезпечити рівномірність структурних перетворень і підвищити стабільність отриманих властивостей.



Рис. 1. Схематичне зображення чинників і процесів, що виникають під час отримання наноструктурних матеріалів

Також встановлено співвідношення між енергією іонів, їх видом і зарядністю, які дозволяють забезпечити формування необхідних температурних режимів для різних типів базових поверхонь [3]. Отримані залежності можуть використовуватися для прогнозування режимів технологічної обробки та вибору оптимальних параметрів процесу.

Керування температурними полями, швидкістю нагрівання та параметрами іонного впливу відкриває перспективи створення наноструктурованих матеріалів із заданими експлуатаційними властивостями. Запропонований підхід може бути використаний для вдосконалення технологій зміцнення поверхні та підвищення ресурсу деталей машин і інструменту.

Список використаних джерел

1. Підвищення ефективності деталей машин та різального інструменту комбінованими методами обробки / Ю. В. Широкий, Ю. О. Сисоєв, О. Д. Семененко, О. В. Торосян. // Відкриті інформаційні та комп'ютерні інтегровані технології, 2025, № 106, С 84-107. <https://doi.org/10.32620/oikit.2025.106.06>
2. Моделювання теплофізичних властивостей і впливу імпульсного лазерного випромінювання на систему «зносостійке покриття – різальний інструмент» /Ю. В. Широкий, О. Д. Семененко // Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. – 2026. – № 215. – С. 45-59. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.215.2026.358685>
3. Вплив поверхневої енергії на формування наноструктурованого стану іонно-плазмових покриттів системи HFN–ZRN на твердосплавних ріжучих інструментах /Ю. В. Широкий, О. Д. Семененко // Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. – 2026. – № 216. – С. 7-22. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.216.2026.362423>

ОБҐРУНТУВАННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ВПЛИВУ КОНЦЕНТРАЦІЇ ХРОМУ ТА ВАНАДІЮ В ВАКУУМНО-ДУГОВИХ ПОКРИТТЯХ НА ЇХ ЗНОСОСТІЙКІСТЬ

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Україна

Довговічність деталей авіаційної техніки значною мірою визначається зносостійкістю захисних вакуумно-дугових покриттів, які формуються методом іонно-плазмового осадження [1]. Серед легувальних елементів, що підвищують опір покриттів зношуванню, важливу роль відіграють хром і ванадій. Питання керування складом покриття на етапі його формування, зокрема через параметри вакуумно-дугового джерела плазми, розглянуто в роботі [2]. Проте у переважній більшості досліджень вплив окремих легувальних елементів на зносостійкість оцінюється якісно, а кількісний зв'язок між концентрацією елементів і рівнем зносостійкості залишається невстановленим. Це ускладнює цілеспрямований добір складу покриття і змушує визначати оптимальні концентрації шляхом значної кількості випробувань.

Мета роботи — обґрунтувати методику побудови математичної моделі, що кількісно описує залежність зносостійкості вакуумно-дугового покриття від сумарної концентрації хрому та ванадію і дозволяє прогнозувати рівень зносостійкості за відомим складом.

Фізичною основою впливу хрому та ванадію на зносостійкість є їх здатність утворювати тверді карбідні фази та подрібнювати структуру покриття. Хром сприяє формуванню карбідів хрому (Cr_7C_3 , Cr_{23}C_6), які підвищують твердість і опір абразивному зношуванню, а також покращують опір окисненню за підвищених температур. Ванадій утворює дисперсні карбіди (VC), що гальмують ріст зерна та забезпечують зміцнення покриття внаслідок здрібнення структури. За спільного легування ці механізми поєднуються, проте співвідношення внесків хрому й ванадію залежить від їх концентрацій і кількісно не визначене, що й обумовлює доцільність побудови математичної моделі.

Як модель залежності зносостійкості від складу запропоновано рівняння лінійної регресії. Для зносостійкості W залежність від концентрацій хрому C_{Cr} та ванадію C_V подається у вигляді:

$$W = a_0 + a_1 C_{Cr} + a_2 C_V, \quad (1)$$

де a_0 — вільний член; a_1 , a_2 — коефіцієнти регресії, що кількісно відображають внесок хрому й ванадію у зносостійкість покриття. Додатне значення коефіцієнта відповідає зростанню зносостійкості зі збільшенням концентрації відповідного елемента, а його модуль характеризує силу впливу. Саме визначення коефіцієнтів a_1 і a_2 є метою обробки експериментальних даних.

Коефіцієнти моделі визначаються методом найменших квадратів за результатами випробувань серії зразків з різним вмістом хрому та ванадію. Обчислення передбачено виконувати мовою Python із застосуванням бібліотеки Scikit-learn, що забезпечує відтворюваність результатів та стандартизовану оцінку якості моделі. Адекватність побудованої моделі оцінюється за коефіцієнтом детермінації R^2 та середньою абсолютною похибкою (MAE) на контрольній вибірці зразків, які не використовувалися під час визначення коефіцієнтів.

Загальну схему очікуваної залежності зносостійкості від сумарної концентрації хрому та ванадію наведено на рис. 1: експериментальні точки апроксимуються лінією регресії, кутовий коефіцієнт якої кількісно характеризує приріст зносостійкості на одиницю концентрації легувальних елементів.

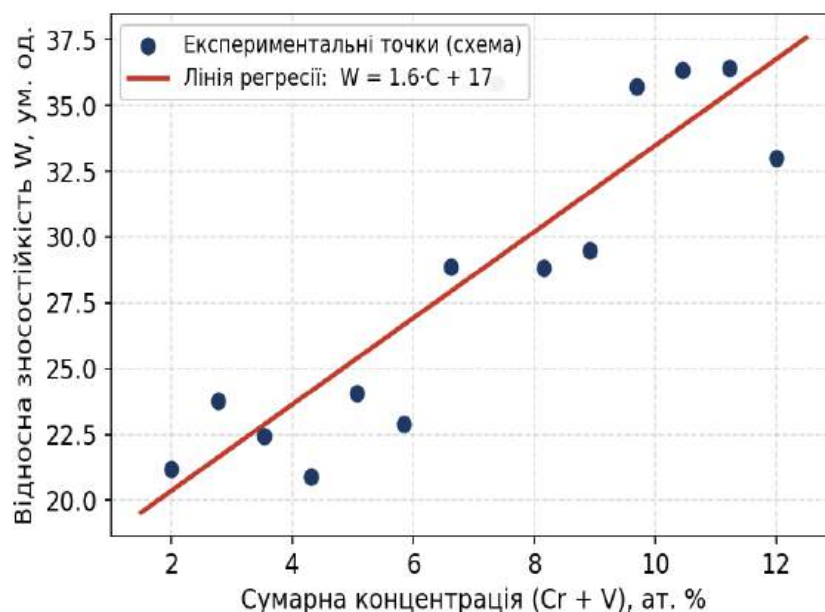


Рис. 1. Схема залежності зносостійкості покриття від сумарної концентрації хрому та ванадію

Запропонована методика дозволяє перейти від якісних уявлень про вплив легувальних елементів до кількісного прогнозування зносостійкості за складом покриття та обґрунтованого вибору раціональних концентрацій хрому й ванадію. На відміну від моделей, що описують вплив складу на властивості узагальнено, запропонований підхід зосереджено на одній парі елементів та одній властивості, що забезпечує його прозорість і придатність до безпосередньої перевірки на експериментальних даних. Подальші дослідження передбачають побудову моделі за результатами трибологічних випробувань серії покриттів та поширення підходу на інші легувальні елементи й експлуатаційні характеристики.

Список використаних джерел

1. Сердюк І. В., Столбовий В. О., Андрєєв А. О., Горбань В. Ф., Кривошапка Р. В. Структурний стан та фізико-механічні властивості багатошарових вакуумно-дугових Ti/TiN покриттів // Вісник ХНАДУ. – 2024. – № 106. – С. 37–45.
2. Сисоєв Ю. О. Управління складом плазмового потоку вакуумно-дугових джерел // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2020. – № 2(162). – С. 11–17.
3. Кравченко О. В. Вплив легування хромом, молібденом та ванадієм на зносостійкість інструментальних сталей // Металознавство та термічна обробка металів. – 2019. – № 1. – С. 45–50.
4. Pedregosa F., Varoquaux G., Gramfort A. et al. Scikit-learn: Machine Learning in Python // Journal of Machine Learning Research. – 2011. – Vol. 12. – P. 2825–2830.

Степаненко Д.Р.^{1,2}, ст. викладач
D.Stepanenko@khai.edu
Баранова Є.О.¹, магістр
Y.O.Baranova@khai.edu
Баранов О.О.¹, д.т.н., професор
Oleg.Baranov@kname.edu.ua

ФІЗИЧНІ ЗАСАДИ ТИСКОЗАЛЕЖНОГО ОПИСУ ВОЛЬТ-АМПЕРНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАНАРНОГО МАГНЕТРОННОГО РОЗРЯДУ

¹ Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, Україна

² Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Україна

Планарні магнетронні системи широко застосовують для нанесення металевих, оксидних, нітридних та інших функціональних покриттів. Стабільність процесу, інтенсивність розпилення мішені й відтворюваність властивостей плівок значною мірою визначаються вольт-амперною характеристикою (ВАХ) розряду. Вона інтегрально відображає баланс іонізації, втрат заряджених частинок, вторинної електронної емісії та перенесення енергії у прикатодній області [1, 2]. Тому фізично обґрунтований опис зміни ВАХ із тиском робочого газу є важливим для вибору режимів осадження.

Емпіричні апроксимації зручні для відтворення окремої експериментальної кривої, однак не пояснюють спільний вплив тиску, магнітного поля та електронного транспорту. Детальні кінетичні й багатовимірні моделі дають глибший опис, але потребують значних обчислювальних ресурсів і великої кількості вхідних даних [3, 4]. Практичний інтерес тому становить компактна модель, яка зберігає фізичну прозорість і придатна для інженерного аналізу стаціонарних режимів планарного магнетрона.

У попередньому параметричному описі початковий масштаб ВАХ задавався сталою опорною точкою нормального режиму. Таке припущення спрощує перехід до аномальної ділянки, проте не враховує зміщення напруги підтримання при зміні тиску. Фізично це зміщення пов'язане з рухом вторинних електронів уздовж аркових силових ліній магнітного поля. Частина електронів може повернутися на катод, а частина після зіткнення з нейтральними атомами залишається в області магнітного утримання та бере участь у подальшій іонізації. Імовірність такого зіткнення безпосередньо залежить від тиску.

Метою роботи є формування фізичної концепції тискозалежного опису стаціонарної ВАХ без ускладнення базової структури моделі. Пропонується визначати опорні параметри нормального режиму для конкретних тиску та конфігурації магнітного поля, а потім використовувати їх для опису аномальної ділянки. Додатково передбачається врахувати локальне нагрівання і розрідження газу поблизу катода та пов'язати інтегральну ВАХ із просторовим розподілом іонного потоку.

Запропонована схема розділяє розрядний проміжок на прикатодну зону іонізації та провідну область плазми. Іони прискорюються до катода, підтримуючи розпилення і вторинну емісію, тоді як електрони утримуються магнітним полем, дрейфують поперек нього та багаторазово проходять область іонізаційних зіткнень (рис. 1).

Побудову моделі планується здійснювати послідовно. Для заданих тиску та геометрії магнітної системи спочатку визначатимуться умови самопідтримання електронно-іонної лавини. На їх основі формуватиметься тискозалежна опорна точка нормального режиму, після чого опис поширюватиметься на аномальну ділянку ВАХ. Завершальним етапом стане оцінювання розподілу іонного струму вздовж поверхні катода.

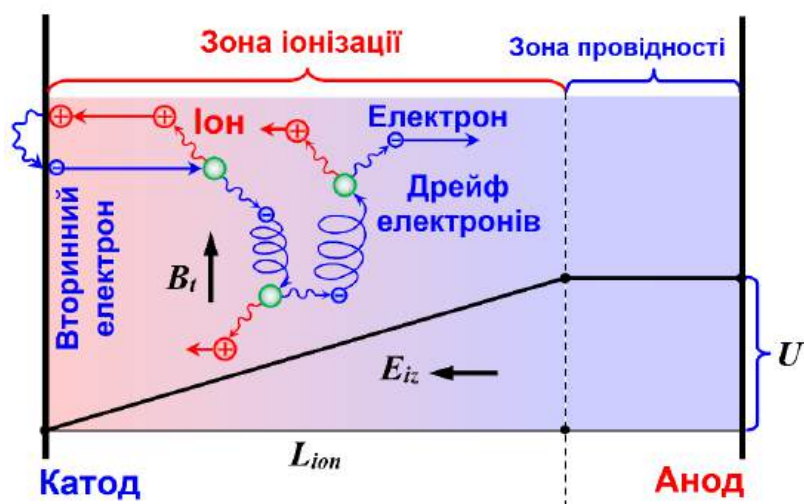


Рис. 1. Іонізація та перенесення заряджених частинок у планарному магнетронному розряді

Для режимів зі значним енерговиділенням передбачається окремо врахувати передачу енергії від розпиленних атомів робочому газу. Нагрівання зменшує локальну концентрацію нейтральних частинок, змінює частоту зіткнень та може впливати на форму ВАХ. Модель планується перевіряти зіставленням із експериментальними характеристиками, одержаними за різних тисків і конфігурацій магнітного поля.

Очікується, що тискозалежне масштабування дозволить описувати зміщення початкової частини стаціонарної ВАХ і водночас збереже можливість аналізу аномального режиму та іонного навантаження на катод. Такий підхід може стати основою для прогнозування робочих режимів і підвищення відтворюваності магнетронного осадження покриттів.

У перспективі результати такого моделювання можуть бути використані для побудови режимних карт планарних магнетронних систем, порівняння різних конфігурацій магнітного поля та визначення меж стійкого горіння розряду. Поєднання розрахункової ВАХ з оцінюванням просторового розподілу іонного потоку дасть змогу пов'язати електричні параметри установки з інтенсивністю розпилення мішені та рівномірністю осадження покриття. Це створює передумови для подальшого застосування моделі під час проєктування магнетронних джерел і розроблення алгоритмів автоматизованого керування технологічним процесом.

Список використаних джерел

1. Low-pressure planar magnetron discharge for surface deposition and nanofabrication / O. Baranov, M. Romanov, M. Wolter et al. // *Physics of Plasmas*. – 2010. – Vol. 17. – Article 053509. – doi: 10.1063/1.3431098.
2. Magnetic control of breakdown: Toward energy-efficient hollow-cathode magnetron discharges / O. Baranov, M. Romanov, S. Kumar et al. // *Journal of Applied Physics*. – 2011. – Vol. 109. – Article 063304. – doi: 10.1063/1.3553853.
3. Two-dimensional analytical description of the plasma potential in a magnetron discharge / C. Costin, T. M. Minea // *Scientific Reports*. – 2023. – Vol. 13. – Article 15883. – doi: 10.1038/s41598-023-42949-7.
4. Pressure dependence of magnetron sputtering: 2D-RZ particle-in-cell and 1D fluid modeling / J. G. Theis, G. R. Werner, T. G. Jenkins et al. // *Physics of Plasmas*. – 2026. – Vol. 33. – Article 053504. – doi: 10.1063/5.0300678.

ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ДЕТАЛЕЙ АВІАЦІЙНОЇ ТЕХНІКИ ШЛЯХОМ НАНЕСЕННЯ МЕТАЛОКЕРАМІЧНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ ПОКРИТТІВ МЕТОДОМ ХОЛОДНОГО ГАЗОДИНАМІЧНОГО НАПИЛЕННЯ

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут»

Забезпечення безвідмовної роботи та надійності деталей авіаційної техніки є пріоритетним науково-технічним завданням, що безпосередньо впливає на підтримання боєздатності та безпеки держави. Зазначається, що понад 80% випадків передчасного виходу з ладу деталей авіаційної техніки пов'язані зі зносом поверхневих шарів. Це зумовлює стрімке зростання витрат на проведення відновлювального ремонту (зокрема, імпортованих компонентів) та супроводжується значними збитками через вимушене простоювання техніки. Серед перспективних способів інженерії поверхонь особливий науково-практичний інтерес становить метод холодного газодинамічного напилювання (ХГН). Головною особливістю і перевагою ХГН над іншими методами газотермічного напилювання є можливість формування функціональних шарів із порошків, частинки яких перебувають у твердому стані, без надмірного термічного впливу на підкладку і, як наслідок, структурно-фазових перетворень в матеріалах покриття і підкладки. Водночас ресурс гомогенних металевих покриттів є обмеженим, що зумовлює необхідність переходу до гетерогенних металоматричних композитів, армованих твердими фазами.

Аналіз літератури свідчить, що застосування ХГН для осадження однокомпонентних пластичних металів часто не задовольняє сучасних вимог щодо опору зношуванню. Ефективним шляхом подолання цього обмеження є введення до складу порошкових сумішей тугоплавких оксидних (наприклад, Al_2O_3) або карбідних (SiC , WC , B_4C тощо) мікрочастинок [1]. Відомо, що наявність твердої фази кардинально змінює фізику процесу формування металокерамічного покриття порівняно з монодисперсними системами [2]. Дослідження підтверджують, що тверді включення виконують подвійну функцію: механічно активують поверхню підкладки та забезпечують додаткове інтенсивне пластичне деформування металевої матриці, сприяючи ущільненню напилюваного шару, підвищенню адгезійної міцності та коефіцієнту використання порошку [3].

Незважаючи на наявні напрацювання у сфері гетерогенного ХГН, механізми структуроутворення та зношування композиційних покриттів з карбідами залишаються малодослідженими. Зокрема, бракує систематизованих даних щодо кількісного впливу концентрації твердих частинок на параметри пористості, когезійну та адгезійну міцність і триботехнічну поведінку сформованих зносостійких покриттів. Вирішення цієї наукової задачі дозволить здійснювати прогнозоване керування властивостями робочих поверхонь відновлюваних деталей авіаційних двигунів.

Метою даної роботи є підвищення експлуатаційного ресурсу робочих поверхонь деталей авіаційної техніки шляхом розроблення та наукового обґрунтування параметрів формування метал-керамічних композиційних покриттів методом ХГН.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися такі завдання:

1. Встановити закономірності структуроутворення та визначити фізико-механічні характеристики (пористість, адгезійну міцність) ХГН-покриттів на основі нікелю та алюмінію, армованих карбідами кремнію, бору та вольфраму.

2. Дослідити зносостійкість розроблених композитів в умовах дії вільного абразиву.

У межах проведених експериментальних досліджень було отримано покриття на основі нікелю та алюмінію методом ХГН. Оцінка мікроструктури отриманих зразків на поперечних

шліфах продемонструвала бездефектну структуру: у зоні контакту та в об'ємі покриттів відсутні внутрішні тріщини, мікропори та ознаки відшарування на межі розділу «покриття-підкладка». Висока щільність структури забезпечується ефектом мікропресування твердими частинками карбідів, які передають свою кінетичну енергію пластичній металевій матриці. Як наслідок, залишкова пористість зразків не перевищувала 2%. Визначена клейовим методом адгезійна міцність зчеплення покриття з основою становила від 25,5 до 31 МПа, що підтверджує ефективну активацію підкладки твердими включеннями під час високошвидкісного зіткнення. За результатами трибологічних випробувань доведено, що в процесі тертя виступаючі карбідні мікрочастинки виконують роль опорних точок, які сприймають контактний тиск, мінімізуючи безпосередній контакт металевих поверхонь і запобігаючи розвитку адгезійного схоплювання.

Науковою новизною роботи є встановлення закономірностей зношування нікелевих і алюмінієвих ХГН-композитів за умов дії вільного абразиву. Експериментально доведено, що додавання 30% карбідів до порошків нікелю та алюмінію призводить до зниження інтенсивності зношування та підвищення зносостійкості покриттів в середньому на 20% порівняно з базовим безкарбідним складом.

За результатами проведених досліджень зроблено такі висновки.

1. Нанесення металоматричних композиційних покриттів методом ХГН є перспективним способом відновлення та захисту критичних деталей авіаційної техніки, який виключає несприятливий термічний вплив на структуру основного матеріалу.

2. Формування бездефектної гетерогенної структури з пористістю менше 2% та високою адгезією (близько 29 МПа) обумовлене дією процесів активації поверхні та інтенсивного локального пластичного деформування металеві матриці твердими карбідними частинками.

3. Додавання до базового порошкового матеріалу 30% карбідної фази забезпечує приріст зносостійкості в умовах дії вільного абразиву на 20%, що дозволяє рекомендувати розроблені композиції для впровадження у практику ремонту з метою підвищення експлуатаційного ресурсу деталей авіаційної техніки.

Наукові дослідження за проєктом «Холодне газодинамічне напилювання захисних і відновлювальних покриттів з підвищеним рівнем зносостійкості для деталей авіаційної техніки» (реєстраційний номер 2025.05/0025) виконані за рахунок коштів гранту Президента України, наданого Національним фондом досліджень України.

Список використаних джерел

1. Burlachenko, O. Cermet powders based on TiAl intermetallic for thermal spraying [Text] / O. Burlachenko, N. Vigilianska, C. Senderowski // Materials Science Forum. – 2024. – Vol. 1113. – P. 77–85. DOI: 10.4028/p-7ris3b.
2. A comparative study on wear resistance of cold-sprayed aluminum/quasicrystal composite coatings [Text] / R. Jafari, J. Cizek, F. Lukac [et al.] // Journal of Thermal Spray Technology. – 2024. – Vol. 33. – P. 705–718. DOI: 10.1007/s11666-024-01758-8.
3. Msolli, S. Shear instability and localization in high-speed cold spray processes: impact on particle fragmentation and bonding mechanisms [Text] / S. Msolli // Materials. – 2025. – Vol. 18, no. 3. – article 490. DOI: 10.3390/ma18030490

8. СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ ВИРОБНИЦТВОМ

UDC 519.651; 621.01

Sorokin M., PhD student
magpie_1980@ukr.net
Moiseev A., PhD student
Andrii.Moisieiev@kname.edu.ua

HYBRID METHOD FOR SMOOTHING NOISY EXPERIMENTAL DATA WITH B-SPLINES

O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv

The problem of smoothing noisy experimental data arises in many fields of science and engineering and, from a theoretical point of view, constitutes an ill-posed inverse problem of identifying the true (useful) signal $y(t)$ from noisy observations f_i with error ε_i .

$$f_i = y(t) + \varepsilon_i \quad i = \overline{1, m}; \quad a \leq t \leq b \quad (1)$$

In this case the smoothing problem with regularization is solved as the problem of minimizing the functional

$$F_\lambda(y) = \sum_{i=1}^m [y(t_i) - f_i]^2 + \lambda \cdot \int_a^b [y''(t)]^2 dt, \quad \lambda \in \mathbb{R}, \quad \lambda > 0 \quad (2)$$

over the class of twice-differentiable functions $y(t)$.

Modern research shows that B-splines are an effective tool that combines filtering and variational approaches in smoothing problems. Therefore, we seek the desired function $y(t)$ in the form of a B-spline of degree greater than two [1].

A standard problem in smoothing experimental data is the choice of the regularization parameter λ , which determines the trade-off between the approximation error and the smoothness of the solution. Methods for determining a suitable regularization parameter are divided into two main classes: methods based on knowledge of the error norm (variance) and methods that do not require this knowledge [2].

The best-known methods of the first class are: the Morozov discrepancy principle, the maximum likelihood method (ML), restricted maximum likelihood (REML), Stein's unbiased risk estimate (SURE), the Bayesian approach, and others.

Knowledge of the variance sharply reduces the uncertainty in choosing λ and turns the problem from a heuristic one into a statistically grounded one. However, if the noise variance is underestimated, the measurement noise passes into the regularized solution and causes a significant random error (characteristic oscillations appear in the solution). If the variance is overestimated, the regularized solution has a large systematic error (the "fine" components of the useful signal are smoothed out). In either case, the solution has a significant error [3].

In practice, the variance is often unknown, so methods of the second class are used, which include: generalized cross-validation, the L-curve method, and others. Other automated, empirical, and mixed procedures for determining the regularization parameter in smoothing problems are also known.

We propose a method for determining the regularization parameter based on knowledge of the error norm corresponding to the Mean Squared Error (MSE) of a polyline smoothed by a simple moving average.

Moving average methods are perhaps the simplest yet effective data smoothing procedure. A moving average is a discrete series constructed by taking averages of several sequential values of

another discrete series. The number of neighboring points contributing to the average value is set by the user and may vary depending on the type and quality of the data being processed.

The idea of using moving averages to solve the smoothing problem is that observations that are close in time are likely to be close in value as well. Therefore, averaging the points close to an observation gives a reasonable estimate of the trend at that observation. The average removes some of the randomness in the data, leaving a smooth trend component [4].

There are several types of moving averages: the simple moving average (SMA), the weighted moving average (WMA), the exponential moving average (EMA), and others.

Moving average methods have obvious advantages: simplicity, speed, clarity, and adaptability. However, a significant limitation of these methods is the discreteness (non-differentiability) of the result obtained. Moving averages also do not allow observations near the ends of a time series to be estimated. This can cause difficulties when using them for forecasting or for analyzing boundary data.

The simple two-sided moving average of series (1) is defined by the formula:

$$z_i = \frac{1}{k} \cdot \sum_{j=(1-k)/2}^{(k-1)/2} f_{i+j}, \quad i = (k-1)/2 + 1, (k-1)/2 + 2, \dots, m - (k-1)/2; \quad k \in \mathbb{N} \quad (3)$$

This paper presents a hybrid method for smoothing noisy experimental data that combines the advantages of smoothing with B-splines and with the simple moving average.

The generalized algorithm for smoothing data by the hybrid method is as follows:

1. Using the simple moving average method, by varying the averaging window, select a discrete series $\{z_i\}$ corresponding to the user's idea of the smoothed result.
2. Compute the mean-squared deviation of the discrete series smoothed by the simple moving average $\{z_i\}$ from the original noisy series of experimental data $\{f_i\}$ $i = \overline{1, m}$.
3. By solving problem (2), determine the smoothing B-spline. The value of the regularization parameter λ is chosen so that the mean-squared deviation of the B-spline from the original series of noisy experimental data $\{f_i\}$ matches the value computed in step 2 of this algorithm.
4. Check the correlation of the smooth B-spline with the simple moving average discrete series $\{z_i\}$, selected in step 1, and if the correlation is strong, the resulting spline is considered the desired result.

We have no rigorous proof that a strong correlation of the B-spline with the simple moving average discrete series is necessarily obtained. However, in the course of numerous numerical experiments, a weak correlation was never observed.

To illustrate the operation of the hybrid method, we filter and smooth a time series obtained by measuring the acceleration of the axial displacement of a CNC machine drive during high-speed machining of a part at time instants 0–0.8 s with an interval of 0.001 s (light-blue line in Fig. 1).

We arbitrarily choose the simple moving average smoothing window size $k=9$ and construct the polyline corresponding to this smoothing window (blue line in Fig. 1). The mean-squared deviation of the series smoothed by the simple moving average from the original noisy time series is $MSE \approx 0.00277$.

Solving problem (2), we construct a fifth-degree B-spline (red line in Fig. 1), selecting the regularization coefficient ($\lambda=0.02$) so that the mean-squared deviation of the spline from the original noisy time series equals $MSE \approx 0.00277$.

Visual analysis of the blue and red curves suggests a strong correlation between the smoothing results obtained by the two different methods. Nevertheless, we compute the correlation coefficient ($r = 0.994$), the coefficient of determination ($R^2 = 0.988$) and the Symmetric Mean Absolute Percentage Error ($PE = 4.98\%$). Thus, the numerical indicators also show a very strong relationship between the smoothing results of the two methods considered.

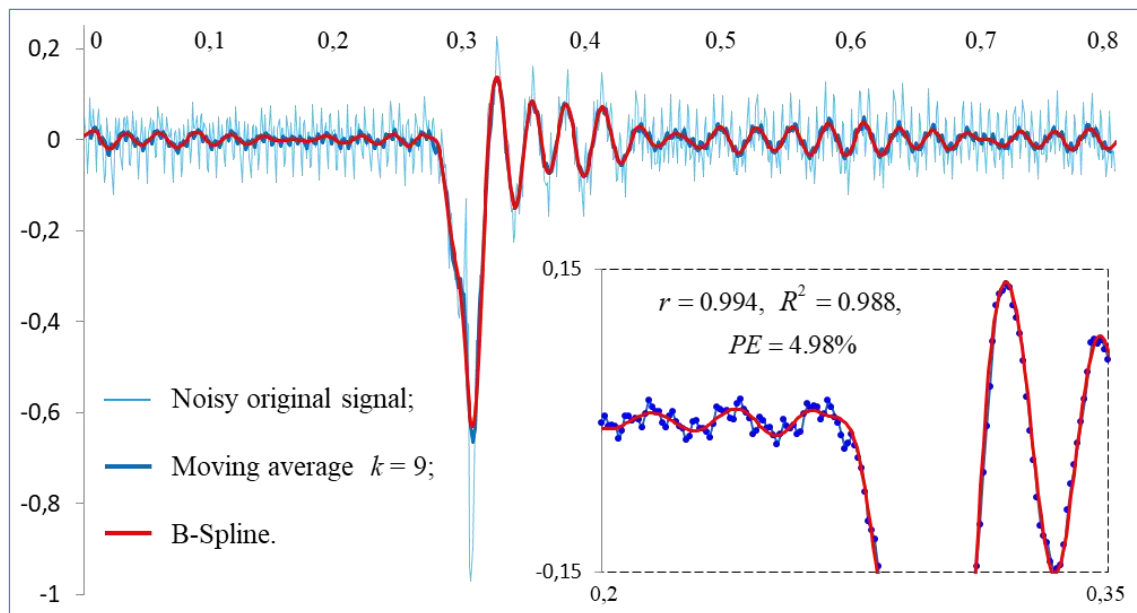


Fig. 1. Comparison of smoothing by splines and by the simple moving average.

Conclusions

This paper presents a method for smoothing noisy experimental data with spline functions of a given degree. What distinguishes this method from other similar ones is that it yields an approximating function that is smooth over the entire domain of the original noisy data set and, at the same time, strongly correlated with the discrete smoothing series obtained by the simple moving average method. Further research will focus on the software implementation of this method for any spline degree up to and including the ninth.

Scientific supervisor: PhD, Associate Professor, Aksyonov Y.

References

1. Silverman, B. W. *Some Aspects of the Spline Smoothing Approach to Non-Parametric Regression Curve Fitting*, Journal of the Royal Statistical Society: Series B, Volume 47, Issue 1, September 1985, Pages 1–21, <https://doi.org/10.1111/j.2517-6161.1985.tb01327.x>
2. Green, P. J. & Silverman, B. W. *Nonparametric Regression and Generalized Linear Models*, volume 58 of Monographs on Statistics and Applied Probability. Chapman & Hall, 1994, [http://refhub.elsevier.com/S0167-9473\(16\)30249-3/sbref9](http://refhub.elsevier.com/S0167-9473(16)30249-3/sbref9)
3. Wang, T., Karel, J., Bonizzi, P., & Peeters, R. L. M. *Influence of the Tikhonov Regularization Parameter on the Accuracy of the Inverse Problem in Electrocardiography*. Sensors, 23(4), 1841, 2023, <https://doi.org/10.3390/s23041841>
4. Hyndman, R. J. *Moving Averages*. In: Lovric, M. (eds) *International Encyclopedia of Statistical Science*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2025, https://doi.org/10.1007/978-3-662-69359-9_383

МОДЕЛЮВАННЯ УЗГОДЖЕНОГО ПОСТУПАЛЬНОГО ТА ОБЕРТАЛЬНОГО РУХУ ВИКОНАВЧИХ ОРГАНІВ ВЕРСТАТА З ЧПК

Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, Україна

Сучасні технологічні верстати часто мають кілька керованих координат, рух яких повинен виконуватися за єдиним часовим і кінематичним законом. Для обладнання, що поєднує поступальне переміщення робочої каретки та обертання іншого виконавчого органу, точність технологічної операції визначається не лише похибками позиціонування окремих осей. Необхідною умовою є збереження заданого співвідношення між лінійною та кутовою координатами на всіх ділянках робочого циклу.

Порушення узгодженості рухів призводить до відхилення фактичної траєкторії від програмно заданої. Найбільші відхилення виникають під час розгону, гальмування, зміни швидкості та реверсування приводів. Навіть за достатньо високої точності позиціонування кожної координати різниця динамічних характеристик виконавчих механізмів може спричинити помітну похибку їх спільного руху.

У системах числового програмного керування ця проблема пов'язана з поняттям контурної похибки. Вона характеризує відхилення фактичного положення робочих органів від заданої багатокоординатної траєкторії. Зменшення похибок стеження окремих приводів не завжди забезпечує відповідне підвищення контурної точності, оскільки відставання різних координат може мати неоднакову величину та часовий характер [1]. Для зменшення таких відхилень застосовують перехресні зв'язки між каналами керування, спільне формування профілів швидкості та методи компенсації контурної похибки [2].

Метою роботи є побудова моделі узгодженого поступального та обертального руху виконавчих органів двокоординатного верстата з ЧПК та оцінювання впливу динамічної неузгодженості приводів на точність відтворення заданої траєкторії.

Розглядається технологічний верстат, у якому перший виконавчий орган здійснює обертальний рух, а другий переміщується вздовж лінійної напрямної. Кутове положення обертального органу позначено через φ , а положення рухомої каретки – через x . Задана траєкторія формується за умови постійного співвідношення між приростом лінійної координати та кутом повороту:

$$x = x_0 + K(\varphi - \varphi_0), \quad (1)$$

де x_0 і φ_0 – початкові координати; K – коефіцієнт кінематичного узгодження, мм/рад.

Коефіцієнт K визначає величину поступального переміщення, що відповідає одиничному куту повороту. Для повного оберту виконавчого органу лінійне переміщення каретки становить $2\pi K$. Зміна цього коефіцієнта дозволяє задавати різні траєкторії без перебудови механічної структури верстата.

Залежність між швидкостями обох координат має вигляд

$$v = K\omega, \quad (2)$$

де v – швидкість поступального руху каретки; ω – кутова швидкість обертального органу.

Ця залежність повинна виконуватися не лише на ділянці усталеного руху, а й під час розгону та гальмування. Якщо кожен привод формує власний профіль швидкості незалежно від іншого, одна координата може швидше вийти на заданий режим або раніше почати

гальмування. Кінцеві положення виконавчих органів при цьому можуть бути правильними, однак проміжна траєкторія не відповідатиме заданій.

Для усунення часової неузгодженості координати доцільно задавати через спільний параметр руху, який змінюється від нуля на початку робочого циклу до одиниці після його завершення. Обидва канали керування отримують завдання в межах одного інтерполяційного циклу. Моменти початку розгону, переходу до усталеної швидкості та початку гальмування стають однаковими для поступальної та обертальної координат.

Профіль руху може формуватися за трапецеїдальним або S-подібним законом зміни швидкості. Трапецеїдальний профіль простіший для реалізації, але містить стрибкоподібні зміни прискорення. S-подібний профіль передбачає обмеження ривка та забезпечує плавніше навантаження механічних передач, опор і напрямних [3]. Для конструкцій із відносно невисокою жорсткістю або значною масою рухомих елементів плавне формування прискорення зменшує збудження механічних коливань.

Параметри спільного руху необхідно визначати за можливостями координати, яка має менші допустимі швидкість і прискорення. Якщо привод обертального органу може швидко змінювати частоту обертання, а поступальна каретка має значну приведену масу, тривалість розгону обмежуватиметься характеристиками лінійного привода. Програмне завдання, сформоване без урахування такого обмеження, спричинить відставання каретки та порушення заданого кінематичного співвідношення.

На узгодженість рухів впливають не лише параметри приводів, а й механічні властивості виконавчих систем. Для поступальної координати суттєве значення мають маса рухомого вузла, тертя в напрямних, жорсткість передачі та зовнішнє навантаження. Для обертальної координати основними параметрами є момент інерції, крутильна жорсткість, опір в опорах і навантаження на робочий орган.

Різниця динамічних властивостей координат проявляється у неоднаковому запізненні їх реакцій на керуючі сигнали. За однакової структури регуляторів важча механічна система зазвичай має більшу тривалість перехідного процесу. Під час розгону вона відстає від координати з меншою інерційністю, а під час гальмування довше зберігає швидкість.

Для оцінювання якості спільного руху введено похибку синхронізації:

$$e_s = (x_c - x_a) - K(\varphi_c - \varphi_a), \quad (3)$$

де x_c і φ_c – задані координати; x_a і φ_a – фактичні координати виконавчих органів.

Похибка e_s показує, наскільки фактичне положення каретки відповідає фактичному куту повороту. Нульове значення цієї похибки означає збереження заданого кінематичного співвідношення. Окремі координати при цьому можуть відставати від програмного завдання, але їх відставання є узгодженим.

Такий критерій точніше характеризує спільний рух, ніж незалежний контроль похибок кожного привода. Наприклад, одночасне відставання обох координат на пропорційні величини не порушує траєкторію, хоча індивідуальні похибки позиціонування будуть ненульовими. Значно гіршою є ситуація, коли одна координата майже точно відтворює завдання, а друга відстає. Саме різниця приведених відхилень утворює похибку траєкторії.

Для наближеного аналізу обидві координати можна подати аперіодичними моделями першого порядку з різними постійними часу. На ділянці рівномірного руху похибка синхронізації оцінюється залежністю

$$e_s \approx K\omega(T_x - T_\varphi) \quad (4)$$

де T_x і T_φ – постійні часу поступальної та обертальної координат.

Залежність показує, що похибка зростає зі збільшенням швидкості та різниці часових характеристик приводів. За однакових постійних часу приведені динамічне відставання координат є близьким, тому похибка синхронізації зменшується. Повної ідентичності

приводів досягти складно через різні маси, моменти інерції, передатні відношення та умови навантаження. Під час налаштування системи керування важливо не тільки забезпечити швидку реакцію кожної координати, а й наблизити їх динамічні характеристики.

Для оцінювання впливу параметрів руху виконано модельний розрахунок. Прийнято, що за один повний оберт поступальне переміщення каретки становить 40 мм. Коефіцієнт кінематичного узгодження дорівнює 6,37 мм/рад. Розрахункові значення похибки для різних швидкостей і різниці постійних часу наведено в таблиці 1.

Таблиця 1. Розрахункова похибка синхронізації виконавчих органів

Кутова швидкість, рад/с	Різниця постійних часу 0,005 с	Різниця постійних часу 0,010 с	Різниця постійних часу 0,020 с
3	0,10 мм	0,19 мм	0,38 мм
6	0,19 мм	0,38 мм	0,76 мм
9	0,29 мм	0,57 мм	1,15 мм

Результати розрахунку свідчать про лінійне зростання похибки зі збільшенням швидкості. За кутової швидкості 3 рад/с і різниці постійних часу 0,005 с розрахункове відхилення становить близько 0,10 мм. Збільшення швидкості до 9 рад/с підвищує його до 0,29 мм.

Більш помітний вплив має різниця динамічних характеристик приводів. За швидкості 9 рад/с збільшення різниці постійних часу від 0,005 до 0,020 с підвищує похибку від 0,29 до 1,15 мм. Часова неузгодженість у декілька десятків мілісекунд може суттєво впливати на точність траєкторії, особливо за високих швидкостей.

Одержані значення мають розрахунковий характер і використовуються для оцінювання чутливості моделі. Для конкретного верстата постійні часу повинні визначатися за результатами моделювання приводів або експериментального запису перехідних процесів. Такий запис може виконуватися під час одночасного подання ступінчастих або програмно сформованих завдань на обидві координати.

Доцільно реєструвати задані та фактичні положення виконавчих органів, швидкості, тривалість розгону й гальмування. За отриманими даними розраховується похибка синхронізації протягом усього циклу. Найбільше її значення очікується на початку прискорення, під час переходу до усталеного руху та на ділянці гальмування.

Механічні деформації утворюють додаткову складову похибки. Під дією сил інерції та зовнішнього навантаження каретка зміщується відносно програмного положення, а обертальний орган може мати кутову деформацію. Якщо жорсткість двох підсистем істотно відрізняється, пропорційність фактичних координат порушується навіть за точного формування команд системою ЧПК.

Геометричні похибки напрямних, люфти, неточність установлення осей і дискретність датчиків положення також впливають на кінцевий результат. Стандарт ISO 10791-6 передбачає перевірку точності швидкостей та інтерполяційних рухів верстатів з ЧПК, зокрема за одночасної роботи кількох координат [4]. Для двокоординатного верстата важливо перевіряти не лише кінцеві положення, а й характер зміни фактичної траєкторії між початковою та кінцевою точками.

Побудована модель може бути основою алгоритму керування, у якому команди обох приводів формуються через єдиний параметр траєкторії. У кожному інтерполяційному циклі система ЧПК обчислює кутове положення та відповідне йому лінійне переміщення. Контроль похибки синхронізації дозволяє виявляти випередження або відставання однієї координати відносно іншої.

Коригування може здійснюватися шляхом зміни завдання швидкості для одного або обох приводів. Координата, що випереджає задане співвідношення, отримує зменшене завдання, а координата з більшим відставанням – збільшене. Такий підхід орієнтований

безпосередньо на точність траєкторії, а не лише на індивідуальну точність каналів керування [2].

Результати моделювання підтверджують необхідність спільного формування профілів швидкості поступального та обертального виконавчих органів. Основними чинниками, що визначають точність руху, є коефіцієнт кінематичного узгодження, швидкість виконання операції, різниця динамічних характеристик приводів і жорсткість механічних підсистем.

Запропонований показник похибки синхронізації дозволяє оцінювати відхилення двох різнорідних координат в однакових одиницях. Модель придатна для вибору швидкісних режимів, налаштування приводів, перевірки сумісності їхніх динамічних характеристик і розроблення алгоритмів перехресної корекції. Подальша робота передбачає уточнення параметрів моделі за експериментальними даними та оцінювання точності спільного руху за різних профілів розгону і гальмування.

Список використаних джерел

1. Ramesh, R. Tracking and contour error control in CNC servo systems / R. Ramesh, M. A. Mannan, A. N. Poo // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2005. – Vol. 45, No. 3. – P. 301–326. – DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2004.08.008.
2. Cheng, M. Y. Contour error reduction for free-form contour following tasks of biaxial motion control systems / M. Y. Cheng, K. H. Su, S. F. Wang // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. – 2009. – Vol. 25, No. 2. – P. 323–333. – DOI: 10.1016/j.rcim.2008.01.003.
3. S-curve algorithm of acceleration/deceleration with smoothly-limited jerk in high-speed equipment control tasks / V. Kombarov, V. Sorokin, O. Fojtů [et al.] // *MM Science Journal*. – 2019. – No. 4. – P. 3264–3270. – DOI: 10.17973/MMSJ.2019_11_2019080.
4. ISO 10791-6:2014. Test conditions for machining centres. Part 6: Accuracy of speeds and interpolations. – 2nd ed. – Geneva : International Organization for Standardization, 2014. – 50 p.

ІНТЕГРАЦІЯ АВТОНОМНИХ ІІІ-АГЕНТІВ У СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМ ОБЛАДНАННЯМ МАШИНОБУДІВНОГО ВИРОБНИЦТВА

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут»

Постановка проблеми. Сучасне машинобудівне виробництво характеризується зростаючою складністю технологічного обладнання, високою мінливістю номенклатури деталей та жорсткими вимогами до точності й енергоефективності обробки. Традиційні системи автоматичного управління (SCADA, PLC, розподілені системи керування) забезпечують стабільне виконання наперед заданих алгоритмів, проте погано адаптуються до нештатних ситуацій, зміни режимів різання, зношування інструменту та інших факторів, які важко формалізувати на етапі проєктування. Це обумовлює актуальність інтеграції автономних ІІІ-агентів, здатних сприймати стан технологічного процесу, приймати рішення в умовах невизначеності та узгоджувати свої дії з іншими підсистемами виробництва, у контур автоматичного управління обладнанням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Ринок агентного штучного інтелекту в промисловості та машинобудуванні демонструє стрімке зростання: за оцінками аналітичних агентств, його обсяг у 2025 році становив близько 5,5 млрд дол. США з прогнозованим зростанням до 16,8 млрд дол. до 2030 року (CAGR близько 25%) [1]. Провідні постачальники систем промислової автоматизації вже впроваджують агентні рішення у власні продуктові лінійки: зокрема, у травні 2025 року компанія Siemens представила лінійку ІІІ-агентів (Copilot) для проєктування, планування, інжинірингу та експлуатації промислового обладнання [2]. У наукових публікаціях запропоновано агентні архітектури на основі великих мовних моделей (LLM), що поєднують дискретне планування відновлення після відмов і безперервне управління промисловими процесами [3], а також виконано систематичний огляд застосувань агентів на основі базових моделей (foundation models) у промисловій автоматизації з визначенням їхніх можливостей і обмежень [4]. Продемонстровано практичне застосування багатоагентних LLM-систем для автоматичної обробки аварійних сигналів верстатів з ЧПК та автономного технічного обслуговування металорізального обладнання [5], а також для адаптивного планування завдань і координації дій агентів у багатоагентних виробничих системах [6]. Окремий напрям становить формальна верифікація розподілу завдань між LLM-агентами в багатоагентних виробничих системах засобами темпоральної логіки та теорії дискретних подій для гарантування коректності й безпеки їхньої взаємодії [7].

Виділення невирішених частин загальної проблеми. Попри активний розвиток агентних рішень, залишається невирішеною низка питань, критичних для впровадження автономних ІІІ-агентів у контур саме автоматичного (а не дорадчого) управління технологічним обладнанням машинобудівного виробництва. По-перше, вихідні рішення LLM-агентів не гарантовано задовольняють задані обмеження безпеки, що ускладнює їх безпосередній вплив на фізичне обладнання без додаткової формальної верифікації [7]; аналітики ринку також відзначають регуляторну невизначеність щодо відповідальності за автономні рішення як один із головних факторів, що стримують впровадження таких систем [1]. По-друге, відсутні уніфіковані архітектурні рішення, які б поєднували швидкодію та детермінованість класичних контурів PLC/SCADA з гнучкістю й контекстною обізнаністю ІІІ-агентів. По-третє, недостатньо опрацьовані питання верифікації та трасованості рішень агентів для важкооброблюваних і відповідальних виробів авіаційного агрегато- та двигунобудування, де ціна помилки автоматичного управління є особливо високою.

Формування цілей дослідження. Метою роботи є визначення принципів побудови архітектури інтеграції автономних ІІІ-агентів у системи автоматичного управління

технологічним обладнанням машинобудівного виробництва, яка забезпечує поєднання детермінованого низькорівневого контуру керування з адаптивним прийняттям рішень на рівні агента, а також окреслення шляхів гарантування безпеки такої взаємодії.

Виклад основного матеріалу дослідження. Запропонована архітектура інтеграції передбачає трирівневу структуру. Нижній рівень утворюють традиційні детерміновані контури автоматичного управління (PLC, ЧПК, приводи), що безпосередньо взаємодіють з обладнанням і відповідають за виконання керуючих впливів у режимі реального часу з гарантованими часовими та амплітудними обмеженнями. Середній рівень становить шар нагляду (supervisory layer) з жорстко заданими межами безпеки (safety envelope), який фільтрує та перевіряє команди, згенеровані вищим рівнем, перш ніж вони можуть бути передані на виконання. Верхній рівень формують автономні ІІІ-агенти на основі великих мовних моделей та спеціалізованих алгоритмів прийняття рішень, які аналізують дані з датчиків, цифрового двійника технологічного процесу та історії попередніх режимів обробки, після чого формують рекомендації щодо коригування режимів різання, черговості операцій, розподілу навантаження між верстатами або реакції на нештатні ситуації.

Взаємодія агентів між собою організується за принципом багатоагентної системи, у якій кожен агент відповідає за окрему одиницю обладнання або технологічну операцію, а координація здійснюється через протокол узгодження завдань з формальною верифікацією їх розподілу, що дозволяє уникнути конфліктів і суперечливих керуючих команд [7]. Для критичних до безпеки дій (наприклад, зміни швидкості шпинделя за межі номінальних значень) передбачено обов'язкове підтвердження шаром нагляду або оператором, тоді як для завдань з низьким ризиком (планування черговості, прогнозне обслуговування, аналіз аварійних сигналів) агент може діяти автономно за прикладом реалізованих рішень для верстатів з ЧПК [5]. Такий підхід дозволяє поступово розширювати рівень автономності агентів у міру накопичення статистики їхньої надійної роботи, що узгоджується з практикою поетапного впровадження, яку демонструє, зокрема, Siemens у своїй лінійці агентних рішень [2].

Апробація запропонованих принципів на прикладі задач механічної обробки важкооброблюваних сплавів та зміцнення деталей авіаційного агрегатобудування показує, що використання агента для прогнозного коригування режимів різання на основі даних про стан різального інструменту дозволяє знизити кількість позапланових зупинок обладнання та підвищити стабільність показників якості обробленої поверхні порівняно з фіксованими програмами ЧПК, які не враховують поточний стан інструменту та заготовки.

Висновки та рекомендації. Інтеграція автономних ІІІ-агентів у системи автоматичного управління технологічним обладнанням машинобудівного виробництва є перспективним напрямом підвищення адаптивності та ефективності виробничих процесів, однак вимагає обов'язкового поєднання з детермінованим шаром безпеки, що обмежує дії агента заданими межами. Рекомендується впроваджувати автономні агенти поетапно — від дорадчих і низькоризикових функцій (аналіз аварійних сигналів, прогнозне обслуговування, планування завдань) до безпосереднього управління критичними параметрами процесу, — а також розвивати методи формальної верифікації розподілу завдань між агентами як необхідну передумову для розширення їхньої автономності в умовах реального машинобудівного виробництва.

Список використаних джерел

1. Agentic AI in Manufacturing and Industrial Automation Market Size, Share & 2030 Growth Trends Report. Mordor Intelligence, 2025. URL: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/agentic-artificial-intelligence-in-manufacturing-and-industrial-automation-market>
2. Siemens introduces AI agents for industrial automation. Siemens Press Release, 12.05.2025. URL: <https://press.siemens.com/global/en/pressrelease/siemens-introduces-ai-agents-industrial-automation>

3. Vyas J., Mercangöz M. Autonomous Control Leveraging LLMs: An Agentic Framework for Next-Generation Industrial Automation. arXiv:2507.07115, 2025.
4. Henkel V., Gehlhoff F., Kube D. et al. Foundation-Model-Based Agents in Industrial Automation: Purposes, Capabilities, and Open Challenges. arXiv:2605.02592, 2026.
5. Park J., Cho S., Chae Y., Durgunlu S.N., Um J. LLM-based multi-agent system for autonomous maintenance process of machine tools. Proceedings of the Asia Pacific Conference of the PHM Society, Vol. 5, No. 1, 2025.
6. Lim J., Zhao J., Hernandez E., Kovalenko I. Adaptive task planning and coordination in multi-agent manufacturing systems using large language models. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Vol. 100, Art. 103245, 2026.
7. Lim J., Tavakkoli Anbarani M., Meira-Góes R., Kovalenko I. Logic-Based Verification of Task Allocation for LLM-Enabled Multi-Agent Manufacturing Systems. arXiv:2604.17142, 2026.

АВТОМАТИЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ДЕКОРАТИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ МОЩЕННЯ

Харківський національний університет міського господарства ім. О.М. Бекетова

Сучасне виробництво декоративних елементів мощення потребує високої продуктивності, стабільної якості виробів та зменшення впливу людського фактора. Досягти цих вимог можливо завдяки впровадженню автоматизованих виробничих ліній, які забезпечують точне дозування матеріалів, автоматичне керування технологічними процесами та контроль параметрів роботи обладнання в режимі реального часу.

Метою дослідження є розробка та обґрунтування технологічного обладнання для виробництва декоративних елементів мощення із підвищенням ефективності виробництва шляхом застосування сучасних засобів автоматизації.

Аналіз сучасних технологій виробництва тротуарної плитки та встановлено, що найбільш ефективним методом є вібропресування (рис. 1). Ця технологія забезпечує високу міцність виробів, точність геометричних розмірів, довговічність та можливість повної автоматизації виробничого процесу. На відміну від вібролиття, вібропресування характеризується значно вищою продуктивністю, меншими витратами матеріалів і стабільною якістю готової продукції.



Рис. 1. Приклади готової продукції

Особливу увагу приділено автоматизації виробничої лінії (рис. 2). Запропонована технологічна схема передбачає автоматичне транспортування сировини, дозування компонентів бетонної суміші, керування процесом змішування, подачу матеріалу до вібропреса та автоматичне формування виробів. Керування змішувачем здійснюється автоматично, зокрема регулювання подачі води виконується відповідно до заданої програми, що забезпечує стабільність складу бетонної суміші.



Рис. 2. Автоматизована лінія виробництва декоративних елементів мощення методом вібропресування

Автоматизована виробнича лінія включає системи дозування, бетонозмішувач, вібропрес, транспортні механізми та ділянку тверднення виробів. Взаємодія між окремими

вузлами дозволяє мінімізувати ручну працю, забезпечити безперервність технологічного процесу та підвищити ефективність використання обладнання.

У роботі також проведено аналіз сучасних автоматизованих вібропресів. Встановлено, що використання PLC-контролерів, цифрових систем моніторингу, датчиків технологічних параметрів та енергоефективних електроприводів є основним напрямом розвитку обладнання для виробництва бетонних виробів. Такі рішення забезпечують оперативний контроль роботи обладнання, скорочують кількість аварійних ситуацій та підвищують ресурс технологічної лінії (рис. 3).

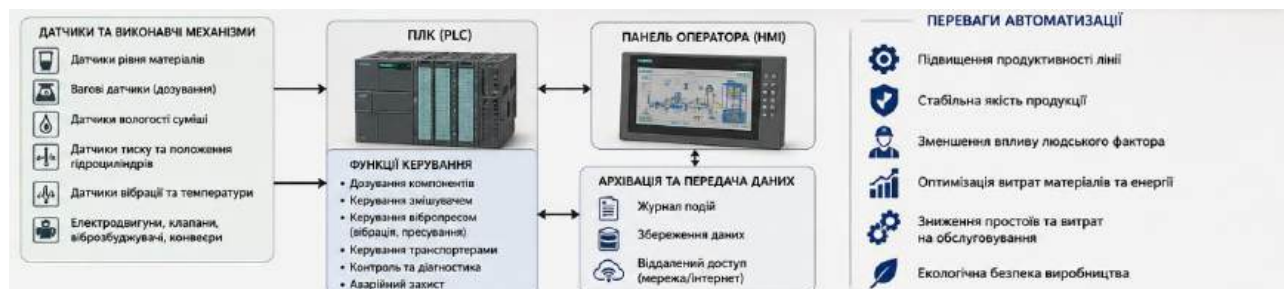


Рис. 3. Схема автоматизації та керування

Результати роботи підтверджують, що впровадження сучасних засобів автоматизації є одним із найефективніших шляхів підвищення конкурентоспроможності виробництва декоративних елементів мощення. Автоматизація процесів дозування, змішування, вібропресування, транспортування та контролю технологічних параметрів забезпечує підвищення продуктивності, покращення якості продукції, зниження енерговитрат і скорочення витрат на обслуговування обладнання. Використання програмованих логічних контролерів, цифрових систем моніторингу та автоматизованих систем керування дозволяє створити сучасне високоефективне виробництво, що відповідає вимогам Індустрії 4.0 та перспективам подальшої цифрової трансформації підприємств будівельної індустрії.

Список використаних джерел

1. Neville A. M. Properties of Concrete. 5th ed. Harlow : Pearson Education Limited, 2020. 846 р. URL: ResearchGate – https://www.researchgate.net/publication/273432725_Review_of_Properties_of_Concrete_5th_Ed_by_A_M_NevillePrentice_Hall_Pearson_San_Francisco_CA_2012_ISBN_0273755803_and_978-0273755807_846_pp_160_paperback.
2. Mindess S., Young J. F., Darwin D. Concrete. 2nd ed. Upper Saddle River : Prentice Hall, 2019. 644 р. URL: Concrete PDF Library – <https://www.rexresearch1.com/ConcreteCementLibrary/ConcreteMindess.pdf>.
3. Аналіз технології вібропресування тротуарної плитки [Електронний ресурс] / Вінницький національний технічний університет. URL: Репозитарій ВНТУ -- <https://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/8575>.

ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ТА РОЗШИРЕННЯ ФУНКЦІОНАЛУ ДЕРЕВООБРОБНОГО УСТАТКУВАННЯ З ЧПК

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Україна

Сучасне деревообробне виробництво характеризується стійкою тенденцією до переходу від верстатів із ручним і напівавтоматичним керуванням до устаткування з числовим програмним керуванням (ЧПК), що дозволяє забезпечити високу продуктивність, повторюваність операцій та можливість обробки складнопрофільних деталей із деревини та деревинних композиційних матеріалів. Застосування ЧПК суттєво скорочує допоміжний час, знижує вплив людського фактору на якість обробки та дозволяє реалізувати складні траєкторії формоутворення, недосяжні для традиційного обладнання.

Водночас експлуатація деревообробних верстатів з ЧПК виявляє низку проблем, пов'язаних із недостатньою точністю формоутворення поверхонь, обмеженим переліком реалізованих технологічних операцій та підвищеною чутливістю пружної системи верстата до змінних режимів різання. Похибки, що виникають унаслідок температурних деформацій елементів приводів, зношування напрямних, недосконалості систем компенсації люфту, а також неоднорідності фізико-механічних властивостей деревини (вологість, щільність, анізотропія), суттєво знижують якість готових виробів. Додатковим стримувальним чинником є обмеженість функціональних можливостей типового технологічного оснащення: більшість серійних верстатів орієнтована на виконання однієї-двох базових операцій, що вимагає переустановлення заготовки на іншому обладнанні та призводить до накопичення похибок базування. Тому вдосконалення деревообробного устаткування з ЧПК у напрямі підвищення точності обробки та розширення технологічного функціоналу є актуальним науково-прикладним завданням, вирішення якого має важливе значення для підвищення конкурентоспроможності вітчизняних деревообробних та меблевих підприємств.

Метою дослідження є підвищення точності формоутворення деталей на деревообробному устаткуванні з ЧПК та розширення його технологічного функціоналу шляхом удосконалення конструкції несучої системи, приводів подачі та систем керування верстата. Для досягнення поставленої мети вирішувалися такі завдання: проведено аналіз конструктивних та експлуатаційних чинників, що обумовлюють похибки обробки на деревообробних верстатах з ЧПК; розроблено математичну модель формування сумарної похибки обробки з урахуванням пружних, температурних та динамічних складових; обґрунтовано технічні рішення щодо підвищення жорсткості та віброзахисності несучої системи верстата; запропоновано способи розширення технологічного функціоналу устаткування за рахунок реалізації додаткових операцій обробки (фрезерування, свердління, гравірування, розкрою) в межах одного технологічного циклу; розроблено алгоритм адаптивної компенсації похибок у системі ЧПК на основі показань датчиків зворотного зв'язку; виконано експериментальні дослідження точності обробки на модернізованому устаткуванні та проведено порівняльний аналіз отриманих результатів із базовим варіантом верстата. Об'єктом дослідження є процес формоутворення поверхонь деталей з деревини та деревинних композиційних матеріалів на устаткуванні з ЧПК. Предметом дослідження є взаємозв'язки між конструктивними параметрами деревообробного верстата з ЧПК, режимами обробки та точністю й функціональними можливостями формоутворення.

У роботі використано методи теорії пружності та опору матеріалів для оцінювання деформацій елементів несучої системи верстата; методи математичного моделювання та чисельного аналізу – для розроблення й дослідження моделі формування сумарної похибки

обробки; методи теорії автоматичного керування – для розроблення алгоритму компенсації похибок у контурі ЧПК; методи планування експерименту та статистичної обробки даних – для перевірки адекватності теоретичних моделей і оцінювання ефективності запропонованих технічних рішень на фізичному зразку модернізованого устаткування.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в удосконаленні математичної моделі формування сумарної похибки обробки деревообробного верстата з ЧПК, яка, на відміну від існуючих, комплексно враховує взаємний вплив пружних деформацій несучої системи, теплових деформацій приводів та динамічних навантажень, що виникають під час обробки деревинних матеріалів зі змінними фізико-механічними властивостями. Це дозволило обґрунтувати раціональні конструктивні параметри модернізованого устаткування та алгоритми компенсації похибок у системі ЧПК. Дістав подальшого розвитку підхід до побудови багатофункціональних деревообробних модулів, який, на відміну від відомих рішень, ґрунтується на принципі поєднання кількох технологічних операцій у межах одного циклу базування заготовки, що дозволяє мінімізувати похибки перебезування.

Практичне значення одержаних результатів полягає в розробці інженерних рекомендацій щодо модернізації деревообробних верстатів з ЧПК, які забезпечують підвищення точності обробки та розширення переліку технологічних операцій, реалізованих на одному устаткуванні, без суттєвого збільшення його вартості. Запропоновані технічні рішення можуть бути використані підприємствами деревообробної та меблевої галузі під час модернізації наявного парку обладнання, а також виробниками верстатів під час проектування нових моделей деревообробного устаткування з ЧПК.

Узагальнена структурна схема модернізованого деревообробного верстата з ЧПК наведена на рис. 1.



Рис. 1. Структурна схема модернізованого деревообробного верстата з ЧПК

Особливістю запропонованого рішення є введення в структуру верстата блока компенсації похибок, що входить до складу системи ЧПК, та контуру зворотного зв'язку, який отримує сигнали від датчиків похибки положення, температури та вібрації. Наявність такого контуру дозволяє реалізувати адаптивне коригування режимів обробки залежно від

фактичного стану верстата та властивостей оброблюваного матеріалу, а об'єднання кількох технологічних операцій у єдиному технологічному модулі забезпечує розширення функціональних можливостей устаткування без потреби перебазування заготовки на іншому обладнанні.

Експериментальні дослідження проводилися на дослідному зразку модернізованого деревообробного верстата з ЧПК, оснащеного вдосконаленою несучою системою підвищеної жорсткості та системою адаптивної компенсації похибок. Обробці підлягали зразки з масиву деревини хвойних і листяних порід, а також деревинностружкових і деревинноволокнистих плит. Порівняльний аналіз результатів обробки на базовому та модернізованому варіантах верстата засвідчив зменшення сумарної похибки формоутворення контурних поверхонь, підвищення стабільності розмірів партії деталей та зниження шорсткості обробленої поверхні. Крім того, реалізація багатофункціонального технологічного модуля дозволила виконувати фрезерування, свердління, гравірування та розкрій деталей у межах одного циклу базування заготовки, що скоротило допоміжний час та виключило похибки перебазування, характерні для маршрутної технології обробки на кількох одиницях обладнання.

Отримані експериментальні дані підтвердили адекватність розробленої математичної моделі формування сумарної похибки обробки: розбіжність між розрахунковими та експериментальними значеннями похибки не перевищує допустимих меж для інженерних розрахунків, що свідчить про можливість використання моделі для прогнозування точності обробки на етапі проектування модернізованого устаткування.

Висновки. Проведене дослідження підтверджує доцільність комплексного підходу до вдосконалення деревообробного устаткування з ЧПК, що поєднує підвищення точності формоутворення з розширенням технологічного функціоналу верстата. Розроблена математична модель та запропоновані конструктивні й технологічні рішення дозволяють обґрунтовано підходити до модернізації наявного та проектування нового деревообробного устаткування. Подальші дослідження доцільно спрямувати на розвиток адаптивних систем керування, здатних автоматично коригувати режими обробки залежно від фізико-механічних властивостей оброблюваного матеріалу, а також на розширення номенклатури технологічних операцій, реалізованих у межах єдиного технологічного модуля.

Список використаних джерел

1. Кузнєцов В. Д. Верстати з числовим програмним керуванням для деревообробної промисловості : навч. посіб. Київ : НТУУ «КПІ», 2019. 248 с.
2. Мельник О. П., Ткаченко С. І. Точність обробки деревини на верстатах з ЧПК: аналіз похибок та шляхи їх зменшення. Наукові вісті НТУУ «КПІ». 2020. № 3. С. 45–53.
3. Стахів П. Г. Динаміка та жорсткість несучих систем деревообробних верстатів : монографія. Львів : Вид-во Львівської політехніки, 2018. 176 с.
4. Grabowski R., Nowak T. Accuracy improvement of CNC wood machining centres by thermal error compensation. Journal of Wood Science and Technology. 2021. Vol. 55, No. 4. P. 987–1002.
5. Бондаренко М. І. Розширення технологічних можливостей деревообробного обладнання шляхом інтеграції багатофункціональних модулів. Вісник машинобудування та транспорту. 2022. № 1 (15). С. 112–119.
6. Petrov A., Ivanova K. Adaptive error compensation strategies for CNC machine tools: a review. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2020. Vol. 150. Article 103512.
7. Шевченко Л. В., Гнатюк Р. А. Моделювання динамічних похибок формоутворення на верстатах з ЧПК. Технологічні комплекси. 2021. № 2 (23). С. 34–41.
8. Коваленко Д. С. Сучасні тенденції розвитку деревообробного устаткування з ЧПК. Матеріали Міжнар. наук.-техн. конф. «Нові технології в машинобудуванні». Харків, 2023. С. 78–81.

Протас Є.С., студент
e.s.protas@student.khai.edu
Белявський О.В., ст. викладач
o.beliavskyi@khai.edu
Косенко О.В., ст. викладач
o.kosenko@khai.edu

АНАЛОГОВО-ЦИФРОВИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ НА БАЗІ ПЛК

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут»

Аналогово/цифрове перетворення, як завдання поєднання будь-якого виробничого процесу з мікропроцесорною (цифровою) системою керування, було і залишається найважливішим завданням розробки систем керування автоматичним обладнанням особливо за умов використання ШІ, коли наявність похибок при прийнятті рішень може призвести до непередбачуваних наслідків.

Завданням роботи являлося конструювання системи А/Ц перетворення на базі ПЛК з метою долучення цього пристрою до дистанційного керування перетворенням даних у пристроях, які працюють у тяжких умовах експлуатації (шахти, високовольтні мережі електропостачання, т. і.) Сигнали керування такими перетворювачами можуть поступати через оптоволоконні з'єднання, які з одного боку ізолюють обчислювальну систему від процесів зовнішнього середовища, з іншого боку забезпечують надійний інформаційний зв'язок.

У даній схемі реалізовано перетворювач послідовного наближення (SAR ADC) — один із найпоширеніших типів аналого-цифрових перетворювачів. Основний принцип його роботи полягає у поступовому наближенні двійкового коду, який задає аналоговий сигнал, що порівнюється із вимірюваним вхідним.

Система послідовно формує двійкові значення, перетворює їх у аналоговий сигнал за допомогою винесеного назовні ЦАП, порівнює цей сигнал із вхідною напругою і на основі результату порівняння визначає кожен біт коду. Розроблена схема відтворює логіку цього процесу на рівні дискретних елементів логіки — тригерів, компараторів, лічильників та арифметичних блоків (рис.1).

Схема складається з таких основних частин:

- СТН1 — головний лічильник, який керує етапами наближення. Кожен його вихід активує один із розрядів SAR-регістра;
- Макроси 22–28 — регістри пам'яті, що зберігають значення окремих бітів (від старшого до молодшого). Вихідний код може бути знятий безпосередньо з них;
- Блоки MUL та ADD — реалізують внутрішній перетворювач кодів, який може бути замінений звичайним мультиплексером, але він працює елементом, який демонструє процес накопичення коду синхронно з віддаленим ЦАП, відтворюючи цифровий еквівалент вимірювальної напруги;
- DTRIG2 та EQ — ключовий елемент, який видає дані до лінії зв'язку з віддаленим цифроаналоговим перетворювачем у послідовному коді;
- СТН2 — допоміжний лічильник, що фіксує завершення циклу передачі даних (256 кроків);
- RS1, DTRIG1, NOT — формують логіку запуску і скидання SAR-регістра, забезпечуючи безперервність процесу перетворення.

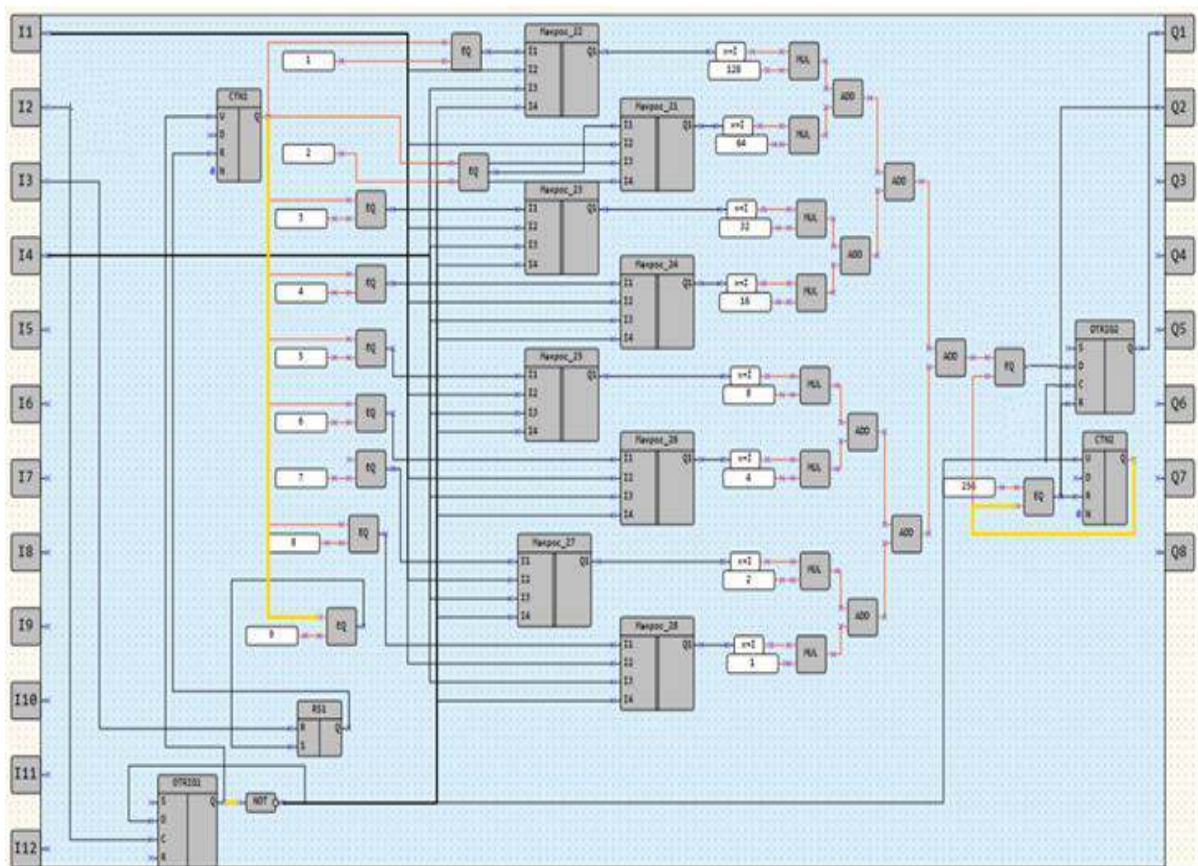


Рис. 1. Схема перетворювача послідовного наближення у середовищі Owen Logic

Принцип роботи перетворювача

Запуск процесу починається з подачі сигналу, який ініціює лічильник CTN1, тригеру DTRIG1 який починає послідовно активувати кожен етап наближення. Потім відбувається покрокове формування біта коли CTN1 дорівнює 1, активується Маркос_22, який відповідає за старший біт ($\times 128$). Потім послідовно активуються інші макроси (Маркос_21–Маркос_28), що відповідають за біти з вагою 64, 32, 16, 8, 4, 2 та 1. Цифровий код, сформований SAR-регістром, подається на внутрішній перетворювач (ланцюг MUL–ADD), де він перетворюється у відповідне число. Це значення порівнюється з вихідним кодом лічильника через блок EQ. Результат фіксується у тригері DTRIG2. Якщо еталонна напруга перевищує вхідну, поточний біт скидається. Якщо нижча — біту присвоюється логічна одиниця.

Таким чином, після кожного циклу наближення уточнюється значення двійкового коду, який наближається до реальної величини сигналу. Після проходження восьми етапів (усіх бітів) формується 8-бітне цифрове значення, що відповідає рівню аналогового сигналу. Лічильник CTN2 підраховує завершені цикли. Коли він досягає значення 256 (EQ праворуч), через вхід RES здійснюється скидання лічильника та підготовка до нового перетворення.

Запропонована схема реалізує принцип 8-бітного перетворювача послідовного наближення (SAR ADC) у середовищі OWEN Logic.

У ній чітко відображено взаємодію основних компонентів:

- CTN1 задає часову послідовність роботи;
- макроси 22–28 формують пам'ять розрядів коду;
- MUL–ADD блоки визначають миттєве значення перетворювача;
- EQ та DTRIG2 здійснюють порівняння сигналів та їх видачу назовні;
- CTN2 забезпечує періодичне оновлення циклу перетворення.

Такий підхід дозволяє візуально простежити логіку роботи SAR ADC та зрозуміти процес формування цифрового коду при його стеженні за аналоговим сигналом.

Система перетворення на базі ПЛК за умов доповнення ізольованими елементами передачі сигналів даних може бути використана для роботи з віддаленими пристроями автоматики, котрі працюють в тяжких умовах експлуатації.

Отримана модель перетворювача може бути корисною для демонстрації принципів аналого-цифрового перетворення, тестування алгоритмів керування або побудови цифрових систем збору даних.

Список використаних джерел

1. Воскобойник, В. Е. Основи електропривода виробничих машин та комплексів: навч. посіб. / В. Е. Воскобойник, В. А. Бородай, Р. О. Боровик, О. Ю. Нестерова. – Дніпр: Національний ТУ «Дніпровська політехніка», 2021. – 254 с.
2. U. Tietze, Ch. Schenk. Halbleiter-Schaltungstechnik: Funfte uberfrbeitete Aufgabe, Springer Verlag / U. Tietze, Ch. Schenk. – Berlin. – Heidelberg- New York, 1980. – 512 с.

АВТОМАТИЗАЦІЯ КОМПЛЕКТУ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА БУДІВЕЛЬНОЇ СУМІШІ З СИНТЕТИЧНОЮ ФІБРОЮ

Харківський національний університет міського господарства ім. О.М. Бекетова

Одним із сучасних напрямів розвитку будівельної індустрії є виробництво фібробетонних сумішей, які забезпечують підвищену міцність, тріщиностійкість і довговічність будівельних конструкцій. Для отримання стабільної якості суміші необхідно забезпечити точне дозування компонентів, рівномірне введення синтетичної фібри та безперервність технологічного процесу. Досягнення цих вимог можливе завдяки впровадженню автоматизованих систем керування технологічним обладнанням, що дозволяють підвищити продуктивність виробництва, зменшити вплив людського фактора та оптимізувати використання енергетичних ресурсів.

Метою дослідження є розробка комплексу технологічного обладнання для виробництва будівельної суміші із синтетичною фіброю та підвищення ефективності його роботи шляхом використання сучасних засобів автоматизації виробничого процесу.

У роботі проведено аналіз сучасних технологій приготування фібробетонних сумішей та досліджено обладнання, яке використовується для дозування, транспортування, змішування і введення синтетичної фібри. Встановлено, що ефективність виробництва значною мірою залежить від рівня автоматизації технологічної лінії, точності дозування компонентів і стабільності режимів роботи обладнання.

Запропонований технологічний комплект включає стрічковий живильник, автомат-різчик синтетичної фібри, тривальний бетонозмішувач та двопоршневий бетононасос. Особливістю комплексу є автоматизоване введення синтетичної фібри безпосередньо під час процесу змішування, що забезпечує рівномірний розподіл волокон у бетонній суміші та покращує її фізико-механічні властивості.

Особливу увагу приділено автоматизації технологічного процесу (рис. 1). Запропоновано використання програмованого логічного контролера (PLC), який координує роботу всіх вузлів комплексу: дозування матеріалів, керування стрічковим живильником, автоматом-різчиком фібри, бетонозмішувачем та бетононасосом. Контроль технологічних параметрів здійснюється за допомогою датчиків рівня, вагових дозаторів, датчиків швидкості обертання та систем контролю електроприводів.



Рис. 1. Автоматизована лінія виробництва будівельної суміші з синтетичною фіброю

Автоматизована система керування забезпечує синхронізацію роботи обладнання, підтримання заданих режимів змішування, контроль часу технологічного циклу та оперативне

реагування на можливі відхилення (рис. 2). Використання сучасних засобів автоматизації дозволяє підвищити продуктивність технологічної лінії, скоротити витрати електроенергії, зменшити втрати матеріалів і забезпечити стабільну якість готової будівельної суміші.

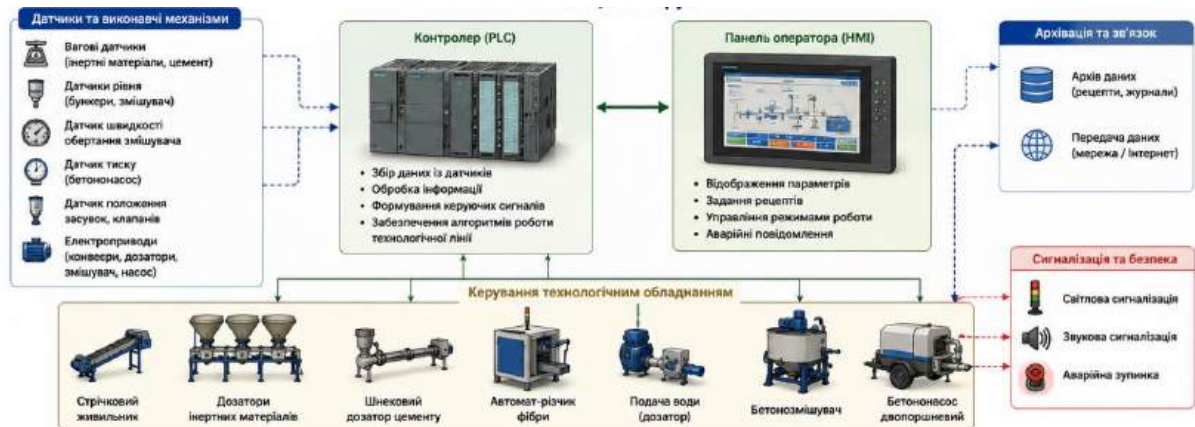


Рис. 2. Система автоматизації та керування

У роботі також виконано розрахунок продуктивності комплексу обладнання, визначено сумарну встановлену потужність, технічні характеристики основних машин та обґрунтовано вибір їх конструктивних параметрів.

Проведене дослідження підтвердило, що автоматизація процесів дозування компонентів, введення синтетичної фібри, змішування та транспортування будівельної суміші є ефективним напрямом підвищення продуктивності сучасних виробництв. Використання програмованих логічних контролерів, датчиків технологічних параметрів, автоматизованих систем дозування та цифрового моніторингу забезпечує високу точність виконання технологічних операцій, підвищує якість готової продукції, зменшує енерговитрати та створює передумови для впровадження концепцій цифрового виробництва й Industry 4.0 у галузі виробництва будівельних матеріалів.

Список використаних джерел

1. Neville A. M. Properties of Concrete. – 5th ed. – Harlow : Pearson Education Limited, 2020. – 846 p. URL: https://www.researchgate.net/publication/273432725_Review_of_Properties_of_Concrete_5th_Ed_by_A_M_NevillePrentice_Hall_Pearson_San_Francisco_CA_2012_ISBN
2. Mehta P. K., Monteiro P. J. M. Concrete: Microstructure, Properties and Materials. – 4th ed. – New York : McGraw-Hill Education, 2014. – 704 p. URL: <https://worksaccounts.com/wp-content/uploads/2020/08/Concrete-Microstructure-Properties-and-Materials.pdf>

9. ІННОВАЦІЙНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ В ЕКОНОМІЦІ ПІДПРИЄМСТВА

УДК 004.451

Губка О.С., к.т.н., доцент
o.gubka@khai.edu

Губка С.О., к.т.н., доцент
s.gubka@khai.edu

РОЗРОБКА НАВЧАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ВИВЧЕННЯ АРХІТЕКТУР ОПЕРАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут»

Сучасний розвиток ІТ-індустрії вимагає від фахівців глибокого розуміння внутрішніх процесів роботи комп'ютерної техніки (персональні комп'ютери, сервера, ноутбуки, смартфони тощо). Архітектура операційних систем (ОС) є фундаментальною дисципліною для програмістів та системних адміністраторів [1]. Проте абстрактність таких понять, як керування пам'яттю, планування процесів та синхронізація потоків, ускладнює сприйняття матеріалу [2]. Створення спеціалізованої навчальної системи є актуальним розв'язанням цієї проблеми.

Розробка інтерактивної програмної системи для візуалізації та практичного засвоєння базових концепцій архітектури сучасних операційних систем.

Основні складові системи:

- Теоретичний блок: структурована подача матеріалу (монолітні, мікроядерні та гібридні архітектури).
- Модуль візуалізації: графічна демонстрація роботи диспетчера завдань, заміщення сторінок пам'яті та обробки переривань.
- Практичний блок: симуляція розподілу ресурсів із можливістю зміни параметрів у реальному часі.
- Контроль знань: адаптивне тестування та інтерактивні завдання на вирішення конфліктів (deadlocks).

Архітектура та технологічний стек.

Система проектування базується на клієнт-серверній архітектурі (Web-орієнтований підхід), що забезпечує кросплатформеність та доступність з будь-якого пристрою.

- Frontend: React.js / Vue.js для створення динамічного та зручного інтерфейсу користувача.
- Backend: Python (FastAPI) для обробки логіки симуляцій [3].
- База даних: PostgreSQL або MongoDB для збереження профілів користувачів та результатів тестів.

Впровадження розробленої системи у навчальний процес дозволить підвищити рівень засвоєння матеріалу завдяки переходу від пасивного читання до активної взаємодії з моделями ОС. Інтерактивна візуалізація знизить поріг входження у складні системні дисципліни («Операційні системи», «Системне адміністрування», «Системне програмування» та інші).

Створення навчальної системи вивчення архітектур ОС є ефективним інструментом цифровізації освітнього процесу. Перспективи розвитку проекту полягають у додаванні модулів симуляції розподілених та хмарних операційних систем.

Список використаних джерел

1. Tanenbaum E. Modern operating systems / E. Tanenbaum, H. Boss. – New Jersey: Pearson Prentice-Hall, 2020. – 1120 p.
2. Silberschatz A. Operating System Concepts / A. Silberschatz, G. Gagne, P.B. Galvin. – New Jersey: Wiley, 2021. – 1040 p.
3. Лутц М. Вивчення Python. 5-те вид. Пер. з англ. Львів : Видавництво Старого Лева, 2020. 848 с.

ГЕНЕРАТИВНИЙ ПРОСТІР НАВЧАННЯ: СУЧАСНИЙ СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Україна

Цифрова трансформація освіти та корпоративного навчання дедалі більше пов'язується із застосуванням генеративного штучного інтелекту, який дозволяє автоматизувати створення навчальних матеріалів, персоналізувати освітній процес і скоротити витрати на розроблення цифрового контенту. У сучасних умовах формується поняття «генеративного простору навчання» - інтегрованого інформаційного середовища, у якому навчальний контент, сценарії взаємодії, засоби оцінювання та рекомендації генеруються відповідно до потреб конкретного користувача. Подібний підхід відкриває нові можливості для освітніх установ та організацій, діяльність яких потребує швидкої підготовки фахівців, оперативного оновлення знань і раціонального використання людських ресурсів.

Попри швидкий розвиток генеративних технологій, більшість існуючих рішень поки що реалізують окремі функції автоматизації, а не забезпечують комплексне формування навчального досвіду. Водночас сучасні дослідження демонструють, що найбільш перспективним напрямом розвитку є інтеграція генеративного штучного інтелекту з адаптивними моделями навчання, які враховують індивідуальні особливості користувача та результати його навчальної діяльності [1].

Одним із головних обмежень сучасного генеративного простору навчання залишається недостатній рівень персоналізації. Більшість систем аналізує лише окремі параметри користувача, тоді як рівень сформованості компетентностей, швидкість засвоєння матеріалу, особливості взаємодії із навчальним середовищем та результати практичної діяльності враховуються лише частково. Іншою проблемою є складність створення мультимодального навчального контенту. Незважаючи на значний прогрес генеративних моделей, підготовка інтерактивних тривимірних об'єктів, симуляцій, віртуальних лабораторій або AR/MR/VR-сценаріїв потребує участі фахівців різних напрямів. Це збільшує тривалість розробки, підвищує собівартість та ускладнює оперативне оновлення навчальних продуктів. Подолання цих обмежень можливе шляхом переходу до комплексного генеративного простору навчання, який об'єднає генерацію мультимодального контенту, аналіз освітніх даних, персоналізацію навчальних маршрутів та інструменти оцінювання результатів навчання. Особливо перспективним є використання генеративних моделей для автоматичного створення AR/MR/VR-контенту та їх адаптації відповідно до поточних результатів користувача.

Таким чином, подальший розвиток генеративного простору навчання доцільно пов'язувати з інтеграцією генеративного штучного інтелекту, адаптивних моделей навчання та технологій AR/MR/VR. Реалізація такого підходу створює передумови для підвищення ефективності освітніх процесів, оптимізації витрат на підготовку персоналу та формування сучасних інтелектуальних навчальних середовищ, здатних оперативно адаптуватися до потреб користувачів.

Список використаних джерел

1. Ogunleye B. A Systematic Review of Generative AI for Teaching and Learning Practice / Ogunleye B., Zakariyyah K. I., Ajao O., Olayinka O., Sharma H. // Education Sciences - 2024 - Vol. 14(6) - Art. 636 DOI: <https://doi.org/10.3390/educsci14060636>.

Іванченко Д.А., к.т.н.
ivanchenko_d_a@pstu.edu
Фоміна А.М., PhD
fomina_a_n@pstu.edu
Ганжесв Д.І.
ganzheev_d_i@pstu.edu

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ АВТОТРАНСПОРТНИХ ПІДПРИЄМСТВ ШЛЯХОМ ІНТЕГРАЦІЇ ІНЖЕНЕРНИХ РОЗРАХУНКІВ

Приазовський державний технічний університет, м. Дніпро, Україна

Постановка проблеми.

Стале функціонування транспортної галузі вимагає впровадження високоефективних рішень для підвищення конкурентоспроможності автотранспортних підприємств (АТП). Ефективне використання ресурсів підприємства безпосередньо залежить від точності інженерних розрахунків робочих процесів, а інтеграція сучасних цифрових технологій з методами прикладної механіки забезпечує фундамент для переходу до індустрії 4.0 у транспортній сфері.

Оптимізація роботи підприємств сьогодні неможлива без врахування динамічних навантажень, що діють на елементи конструкцій у реальних умовах експлуатації. Поєднання інженерних розрахунків із програмними комплексами дозволяє прогнозувати залишковий ресурс агрегатів із високою точністю та суттєво скорочувати час простою техніки на ремонті.

Аналіз останніх досліджень та публікацій.

Питанням оптимізації транспортних потоків та логістичних процесів присвячено низку сучасних досліджень [1–3]. Окремі автори розглядають оптимізацію інфраструктури та державно-приватне партнерство у транспортній галузі [4, 5], енергетичні аспекти рухомого складу [6, 7], а також управління перевезеннями й транспортними потоками [8–11]. Питання спільного використання автономних транспортних засобів досліджено в роботі [12].

Аналіз літературних джерел показав наявність значної кількості праць, присвячених окремим аспектам механіки транспортних засобів та автоматизації процесів. Проте питання цілісної інтеграції методів прикладної механіки і сучасних технологій для комплексної оптимізації роботи автотранспортних підприємств висвітлені лише фрагментарно.

Виділення невирішених частин проблеми.

Існуючі методи управління автотранспортними підприємствами часто базуються на емпіричних даних, які не враховують реальну кінематику та динаміку механічних систем у критичних режимах. Спостерігається розрив між фундаментальними досягненнями прикладної механіки та їх впровадженням у щоденну практику експлуатації транспорту, а відсутність інтегрованих моделей перешкоджає створенню ефективних систем предиктивного аналізу та зниженню експлуатаційних витрат.

Мета дослідження.

Метою роботи є розробка науково-методологічних засад інтеграції інженерних розрахунків прикладної механіки та цифрових технологій для підвищення ефективності функціонування автотранспортних підприємств і подовження терміну експлуатації рухомого складу.

Виклад основного матеріалу.

Інтеграція методів прикладної механіки та сучасних технологій на автотранспортному підприємстві базується на трирівневій структурі: фізичному, інформаційному та управлінському рівнях. На фізичному рівні застосовуються закони динаміки та теорії опору матеріалів; інформаційний рівень відповідає за збір даних через сенсори; управлінський рівень забезпечує прийняття рішень на основі інтегрованого аналізу.

Для рівня проектування комплексний критерій вартості володіння (TCO) для транспортного засобу на маршруті М за період Т має вигляд:

$$\min_p TCO(T) = C_{cap}(p) + \int_0^T [C_{fuel}(p,t) + C_{maint}(p,t) + C_{downtime}(p,t)] dt$$

де p – вектор параметрів конструкції (передаточні числа трансмісії, жорсткість підвіски, аеродинамічний коефіцієнт тощо); C_{cap} – капітальні витрати; C_{fuel} , C_{maint} , $C_{downtime}$ – відповідно витрати на енергію, технічне обслуговування та втрати від простоїв.

Рівняння поздовжньої динаміки транспортного засобу записується як:

$$m_{eff} \dot{v}(t) = F_{trac}(t) - F_{grade}(s(t)) - F_{roll} - F_{aero}(v(t))$$

де m_{eff} – ефективна маса з урахуванням обертових мас; F_{trac} – сила тяги; F_{grade} , F_{roll} , F_{aero} – складові опору руху від ухилу дороги, кочення та аеродинамічного опору відповідно.

Для рівня управління використовується модельно-прогнозуюче керування (MPC), яке на кожному кроці k розв'язує задачу мінімізації витрат енергії з урахуванням обмежень на швидкість і керуючий вплив, що забезпечує додаткову економію енергії на 2,6–3,4 % порівняно зі звичайним круїз-контролем.

Для рівня системної логістики оптимальне призначення транспортних засобів на маршрути формулюється як задача дискретної оптимізації:

$$\max \sum_j \sum_k x_{jk} [R_k - TCO_{jk}(T)], \quad x_{jk} \in \{0,1\}$$

за умов, що кожен транспортний засіб призначається не більше ніж на один маршрут одночасно, а кожен маршрут обслуговується одним транспортним засобом.

Для прогнозування залишкового ресурсу вузлів застосовується накопичене пошкодження за методом Палмгрена–Майнера: $D(t) = \sum_i n_i(\sigma_i)/N_f(\sigma_i)$, де n_i – кількість циклів навантаження з амплітудою σ_i , отримана з телеметрії, а $N_f(\sigma_i) = C \cdot \sigma_i^{-m}$ – крива втоми Веллера. Планове технічне обслуговування призначається при $D(t) \geq 0,8$.

Узагальнений алгоритм застосування передбачає послідовні етапи: збір телеметричних даних для кожного транспортного засобу і маршруту; ідентифікацію параметрів методом найменших квадратів; вкладену оптимізацію (генетичний алгоритм у поєднанні з САЕ-симуляцією) для типових маршрутів; налаштування MPC з горизонтом прогнозування 1–5 км; періодичний моніторинг та адаптацію параметрів і перепризначення транспортних засобів на маршрути.

Висновки.

Інтеграція інженерних розрахунків прикладної механіки із сучасними цифровими технологіями забезпечує якісно новий рівень контролю за станом складних технічних систем автотранспортних підприємств. Розроблена трирівнева структура взаємодії (фізичний, інформаційний, управлінський рівні) створює надійну базу для впровадження принципів індустрії 4.0.

Запропоноване формульне описання дає можливість формалізувати цілі управління автотранспортним підприємством та оцінювати їх досягнення. Використання математичних моделей зносу в реальному часі суттєво підвищує точність планування сервісних робіт, а оптимізація конструктивних параметрів, режимів керування та розподілу парку транспортних засобів дозволяє знизити експлуатаційні витрати та подовжити термін служби рухомого складу.

Список використаних джерел

1. Ulvi, H., Yerlikaya, M. A., & Yildiz, K. (2025). An innovative mathematical model for integrated traffic flow optimization in organized industrial zones. *Scientific Reports*, 15, 29427. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-14761-y>
2. Camaj, J., Bulková, Z., & Gašparík, J. (2025). Material flow optimization as a tool for improving logistics processes in the company. *Applied Sciences*, 15(6), 3116. <https://doi.org/10.3390/app15063116>

3. Yu, Z., & Li, B. (2025). Optimization of traffic flow operation mode in railway hubs. *Transportation Research Record*, 2679(11), 1097–1118. <https://doi.org/10.1177/03611981251351882>
4. Vovk, Y., Aulin, V., Vovk, I., & Romaniuk, S. (2025). Electric vehicle charging infrastructure optimization on international transport corridors: Economic analysis and EU regulatory alignment in Ukraine. *Journal of Sustainable Development of Transport and Logistics*, 10(2), 6–28. <https://doi.org/10.14254/jsdtl.2025.10-2.1>
5. Viniukov-Proshchenko, A. S., Maksymov, S., Panasiuk, I., & Petrenko, O. (2025). Public-private partnership mechanism application for transport-logistics infrastructure facilities development. *E3S Web of Conferences*, 654, 03005. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202565403005>
6. Fomin, O., Sulym, A., Kulbovskiy, I., Khozia, P., & Ishchenko, V. (2018). Determining rational parameters of the capacitive energy storage system for the underground railway rolling stock. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(1(92)), 63–71. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.126080>
7. Sulym, A.O., Fomin, O.V., Khozia, P.O., & Mastepan, A.G. (2018). Theoretical and practical determination of parameters of on-board capacitive energy storage of the rolling stock. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2018(5), 79–87. <https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-5/8>
8. Svichynska, O. (2025). The formation of the international transportation management strategy based on the regularities of the distribution of logistics indicators. *Advances in Mechanical Engineering and Transport*, 1(24), 392–398. <https://doi.org/10.36910/automash.v1i24.1746>
9. Chernetskaya-Beletskaya, N., Baranov, I., Miroshnykova, M., & Berezhna, S. (2024). Optimization of passenger transport based on the organization of suburban passenger flow. *Journal of Mechanical Engineering and Transport*, 18(2), 183–189. <https://doi.org/10.31649/2413-4503-2023-18-2-183-189>
10. Danyiuk, A., & Mulyarevych, O. (2024). Features of the application of traffic flow management methods and tools. *ACPS*, 9(1), 68–74. <https://doi.org/10.23939/acps2024.01.068>
11. Kulikov, A. V., Efimov, M. A., Halbaev, D., & Soltanov, Y. (2022). Economically justified optimization of flow processes in the organization of transportation. *Actual Directions of Scientific Researches of the XXI Century*, 10(1), 57–74. <https://doi.org/10.34220/2308-8877-2022-10-1-57-74>
12. Eppenberger, N., & Richter, M. A. (2021). The opportunity of shared autonomous vehicles to improve spatial equity in accessibility and socio-economic developments in European urban areas. *European Transport Research Review*, 13(1), 32. <https://doi.org/10.1186/s12544-021-00484-4>

РОЗРОБКА КОМП'ЮТЕРНОЇ 3D-ГРИ В ЖАНРІ FIRST-PERSON SHOOTER НА ОСНОВІ ІГРОВОГО РУШІЯ GODOT

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Україна

Стрімкий розвиток комп'ютерних технологій зумовив глобальне зростання інтересу до віртуальних розваг [1]. На тлі автоматизації та цифровізації розробка відеоігор виділяється як наукомісткий напрям софтверної інженерії. Ігрові проекти об'єднують у собі широке коло дисциплін: програмування, комп'ютерну симуляцію фізики, анімацію, обробку звуку та створення інтерфейсів взаємодії людини з комп'ютером. Серед жанрового різноманіття виділяється клас FPS (First-Person Shooter), де користувач взаємодіє з тривимірним середовищем від першої особи, а базовою ігровою механікою є стрільба по мішенях, ворогах чи перешкодах [2]. Актуальність створення проекту в жанрі FPS полягає у глибокому практичному вивченні архітектури тривимірних інтерактивних систем. Робота над такою грою дозволяє опанувати принципи побудови ігрового простору, зчитування даних із контролерів, програмування логіки зброї, створення UI та налаштування динамічного аудіосупроводу. Для автоматизації цих процесів використовуються сучасні ігрові рушії. Базою для реалізації проекту став рушій Godot Engine, що пропонує ефективну сцену структуру, потужний функціонал для програмування механік, розвинені засоби фізичної симуляції та зручний інструментарій для розробки 2D/3D-додатків [3, 4], а також дозволяє оптимізувати продуктивність гри й досягти плавності геймплею. Попри свою відносну новизну, Godot активно розвивається та модернізується на основі відгуків спільноти розробників. Розробка проекту на цьому рушії не лише забезпечить користувачам якісний ігровий досвід, а й сприятиме вдосконаленню професійних навичок автора у сфері програмування та геймдизайну [4 - 6].

Метою доповіді є відображення процесу розроблення працездатного прототипу комп'ютерної 3D-гри в жанрі First-Person Shooter на основі ігрового рушія Godot. В доповіді наводяться результати детального аналізу предметної області, розглянуто особливості FPS-ігор, визначено вимоги до ігрового додатку, спроектовано структуру гри, реалізовано основні механіки та проведено їх тестування.

Дослідження предметної області дозволило виділити ключові специфічні ознаки жанру FPS. Було визначено, що архітектура базового прототипу шутера від першої особи має охоплювати такі обов'язкові компоненти: тривимірний ігровий простір (рівень), контролер персонажа, камеру від першої особи, модуль ведення вогню, механіки обмеження боезапасу та перезарядки зброї, користувацький інтерфейс, а також статичні чи динамічні мішені – цілі для влучань.

На основі аналізу комерційних аналогів і відомих представників жанру було обґрунтовано, що для прототипу достатньо реалізувати не повномасштабну гру зі складним сюжетом, штучним інтелектом ворогів та багатомодульною структурою рівнів, а базову систему, яка наочно демонструє та тестує фундаментальні механіки FPS-геймплею.

Під час формування вимог до програми було визначено основного користувача системи – гравця. Гравець повинен мати можливість запустити гру з головного меню, переміщуватися по 3D-рівню, оглядати простір за допомогою миші, виконувати стрибок, стріляти, спостерігати за кількістю патронів, автоматично перезаряджати зброю після закінчення магазину та взаємодіяти з мішенню. Окремо було визначено входні дії користувача та реакції системи. До таких дій/реакцій належать: 1) натискання клавіш руху, 2) рух миші,

3) натискання лівої кнопки миші, 4) утримання кнопки стрільби, 5) закінчення патронів, 6) влучання в мішень.

Архітектуру ігрового додатка спроектовано на основі специфіки сценової моделі Godot Engine. Проєкт структурно поділений на дві ключові сцени: головне меню та безпосередньо ігровий рівень. Перша з них забезпечує навігацію користувача – запуск ігрового процесу та коректне закриття програми. Друга (сцена ігрового рівня) є комплексним середовищем, що об'єднує в собі тривимірну локацію, контролер гравця з налаштованою камерою, візуальну модель зброї, HUD-інтерфейс (Head-Up Display), систему динамічного освітлення та інтерактивні мішені для ураження.

Програмна логіка проєкту реалізована за допомогою кількох функціональних скриптів. Модулі керування головним меню забезпечують ініціалізацію переходу до ігрової локації та коректний вихід із додатка. Основний скрипт гравця координує базові геймплейні механіки: переміщення персонажа в просторі, обертання камери, стрибки, ведення вогню та перезаряджання зброї, а також відповідає за динамічне оновлення елементів UI, тригерування відповідних анімацій і генерацію аудіоефектів пострілу. Логіка поведінки цілей винесена в автономний скрипт мішені, який керує станом об'єкта: фіксує пошкодження, змінює візуальні властивості при взаємодії, відповідає за регенерацію або ініціює алгоритм випадкового переміщення (релокації) після критичного ураження.

Програмна реалізація контролера гравця базується на вбудованому вузлі CharacterBody3D, що є стандартним інструментом Godot для створення керованих суб'єктів із підтримкою фізики колізій у тривимірному просторі [3, 4]. Система введення (input) налаштована на використання клавіатури та миші: клавіші W, A, S, D координують лінійне переміщення, тоді як вектор руху миші керує орієнтацією камери. Обертання за горизонталлю змінює вектор погляду самого персонажа, а вертикальне зміщення транслює нахил камери. Для запобігання артефактам візуалізації (неприродному обертанню камери) та забезпечення природного сприйняття, вертикальний кут огляду обмежено в заданому діапазоні за допомогою математичного відсікання. Окрім базового руху, інтегровано механіку стрибка, вплив вектора гравітації, алгоритми плавного прискорення й гальмування (інтерполяцію швидкості), а також збереження моменту інерції горизонтального руху під час перебування об'єкта в повітрі.

Механіку ведення вогню в проєкті реалізовано на основі алгоритму hitscan. Особливість цього підходу полягає у відмові від генерації окремого фізичного об'єкта снаряда (кулі). Замість цього в момент пострілу з оптичного центру камери гравця у векторі її спрямування транслюється математичний промінь, що дозволяє миттєво визначити наявність колізій попереду. Цей метод характеризується високою обчислювальною ефективністю та простотою програмної архітектури. У середовищі Godot Engine для цього застосовуються засоби ray-casting та прямі низькорівневі запити до фізичного простору (Physics Direct Space State) [7]. У розробленому додатку промінь ініціюється від глобальних координат камери вздовж її осі зору. У разі детекції перетину з тривимірним об'єктом система виконує перевірку наявності в цього об'єкта інтерфейсу або методу реєстрації пошкоджень; якщо так, об'єкту-цілі передається відповідне числове значення нанесеної шкоди.

Задля відповідності канонам ігрового процесу жанру FPS, у проєкті було реалізовано підсистему обліку боєприпасів та автоматичного перезаряджання зброї. Місткість магазину обмежено 30 набоями. При кожному пострілі поточна кількість патронів декрементується, а актуальний стан боєкомплекту динамічно виводиться на екран за допомогою графічного інтерфейсу (HUD). У момент вичерпання останнього набою в магазині ініціюється часова затримка, що передуює активації відповідного анімаційного треку перезарядки. На час виконання цієї анімації можливість ведення вогню програмно блокується. Після завершення процесу перезаряджання внутрішня змінна кількості набоїв знову набуває свого максимального початкового значення.

Графічний інтерфейс користувача (UI) побудовано з використанням спеціалізованих вузлів CanvasLayer та Label. Він забезпечує візуалізацію поточного стану боєкомплекту в

магазині у форматі «30/∞», де символ нескінченності вказує на нелімітований резервний запас набоїв у межах розробленого прототипу. Функція синхронізації текстового індикатора викликається під час ініціалізації ігрової сцени, при кожному декременті патронів після пострілу, а також у момент фіксації повного перезарядження зброї. Додатково в центрі екрана реалізовано графічний маркер прицілу (перехрестя), просторові координати якого збігаються з вектором спрямування математичного променя стрільби.

Задля підвищення якості зворотного зв'язку (ігрового імпаку) та покращення користувацького досвіду (UX), в проєкті було інтегровано готові анімаційні ресурси та аудіоефекти з відкритих джерел. Анімаційна модель охоплює три треки: ведення вогню, переміщення (ходьба) та перезарядження. Відтворення анімації пострілу тригерується синхронно з кожним натисканням клавіші стрільби, анімація ходьби активується під час лінійного руху персонажа, а трек перезарядки – у момент повного вичерпання набоїв у магазині. Для забезпечення коректної поведінки зброї було налаштовано ієрархію та пріоритетність анімаційних станів; зокрема, процес перезарядження має найвищий пріоритет і не може бути перерваний іншими діями. Акустичний супровід пострілу реалізовано за допомогою просторового вузла `AudioStreamPlayer3D`, що забезпечує коректне позиціонування звуку в тривимірній сцені.

Задля верифікації та тестування коректності функціонування системи стрільби було розроблено інтерактивний об'єкт – мішень. Сутність мішені наділена певним пулом одиниць міцності (здоров'я). У момент реєстрації влучання об'єкт отримує обчислювальний збиток і на короткий проміжок часу змінює колір свого матеріалу, що забезпечує користувачу чіткий візуальний відгук (hit marker). Якщо поточний показник здоров'я мішені декрементується до нуля, ініціюється алгоритм її регенерації до початкового стану, а сама модель автоматично релокується (переміщується) у нову випадкову позицію в межах наперед визначеної тривимірної зони (spawn zone).

Після завершення програмної реалізації ключових ігрових компонентів було проведено ручне функціональне тестування розробленого додатка. Процес верифікації охоплював комплексну перевірку всіх інтегрованих механік та елементів користувацького інтерфейсу. Під час налагодження (debugging) було виявлено та усунено декілька програмних дефектів. Зокрема, розв'язано проблему колізії (конфлікту) між анімаційними треками руху персонажа та ведення вогню, а також інтегровано додатковий алгоритм валідації координат для забезпечення безпечного респауну (spawn zone) мішені, що унеможливорює її появу за межами ігрової карти або всередині текстур.

Список використаних джерел

1. Як Україна виглядає на світовому ринку розробки ігор [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://businessviews.com.ua/ru/tech/id/virobnictvo-igor-v-ukrajini-1948/>
2. Robert Nystrom. *Game Programming Patterns*. – Genever Benning; 2014. – 354 p.
3. Chris Bradfield. *Godot 4 Game Development Projects - Second Edition: Build five cross-platform 2D and 3D games using one of the most powerful open source game engines*. - Packt Publishing; 2023. - 264 p.
4. Robert Henning. *Godot 4 for Beginners: Develop engaging 2D and 3D games with Godot 4's scripting and design features*. - Packt Publishing; 2025. - 360 p.
5. Henrique Campos. *Game Development Patterns with Godot 4: Create resilient game systems using industry-proven solutions in Godot*. - Packt Publishing; 2025. - 304 p.
6. Wallace Wang, Tonnetta Walcott. *Programming for Game Design: A Hands-On Guide with Godot*. - Apress; 2024. - 536 p.
7. Godot Engine Documentation. Ray-casting. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://docs.godotengine.org/en/stable/tutorials/physics/ray-casting.html>

ПРОГНОЗУВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СПОРТСМЕНІВ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДІВ МАШИННОГО НАВЧАННЯ

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Україна

У сучасному спорті прийняття рішень дедалі більше спирається на аналіз великих обсягів даних. Статистичні показники, що характеризують виступи спортсменів, команд та окремі ігрові епізоди, утворюють інформаційну базу для побудови систем спортивної аналітики. Водночас традиційні методи оцінювання ефективності спортсменів часто є суб'єктивними та не враховують складних нелінійних залежностей між різними характеристиками гри. Це зумовлює потребу у використанні сучасних інтелектуальних технологій, здатних виявляти приховані закономірності у даних і забезпечувати точні прогнози результативності [1].

Методи машинного навчання відкривають нові можливості для спортивної аналітики – від оцінки потенціалу молодих гравців і прогнозування їхньої кар'єрної успішності до виявлення оптимальних комбінацій у командній грі.

В умовах швидкого розвитку спортивних технологій та цифровізації галузі актуальним стає створення моделей, що дозволяють не лише аналізувати минулі результати, а й прогнозувати майбутню ефективність спортсменів. Такі системи мають практичне значення для клубів, федерацій, аналітичних центрів і спортивних менеджерів, адже дають змогу оптимізувати відбір, планування тренувального процесу та оцінку інвестицій у спортсменів.

Метою дослідження є розроблення та дослідження моделей машинного навчання для прогнозування ефективності спортсменів на основі історичних статистичних даних, з метою підвищення обґрунтованості прийняття рішень у спортивній аналітиці.

У процесі дослідження було проведено: аналіз предметної області, який показав актуальність застосування методів машинного навчання у спортивній аналітиці; формування та попередню обробку даних про гравців, що включали демографічні, командні та результативні показники; розробку набору інформативних ознак; побудову та навчання моделей машинного навчання (Random Forest, Linear Regression), які продемонстрували високу якість прогнозування кількості очок спортсменів. Модель Random Forest виявилася найефективнішою, забезпечивши найкраще співвідношення точності та узагальнювальної здатності; кластеризацію гравців за допомогою алгоритму k-means. Оптимальну кількість кластерів визначено за допомогою методу «лікоть» і коефіцієнта силуету; візуалізацію результатів аналізу за допомогою РСА, що підтвердила природне відокремлення груп гравців із різною результативністю; розробку спрощеного програмного модуля, який реалізує інтерфейс для прогнозування результативності гравців як за одним запитом, так і у пакетному режимі. Модуль може використовуватись аналітиками, скаутами або спортивними менеджерами для прийняття рішень щодо відбору та розвитку гравців.

Отримані результати демонструють, що застосування машинного навчання дозволяє значно підвищити об'єктивність і точність прогнозування спортивних показників, забезпечуючи нові можливості для інтелектуальної аналітики у спорті.

Список використаних джерел

1. Pietraszewski, P. (2025). The role of artificial intelligence in sports analytics. Applied Sciences, 15(13), 7254. <https://doi.org/10.3390/app15137254>

ТРАНСФОРМАЦІЯ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ ВАРТІСТЮ ВИРОБНИЦТВА ТА КАДРОВИМ ПОТЕНЦІАЛОМ СУЧАСНОГО МЕХАНОСКЛАДАЛЬНОГО ВИРОБНИЦТВА

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Україна

Вступ

Сучасний стан розвитку вітчизняного машинобудування характеризується одночасним впливом декількох критичних факторів: глибокою технологічною модернізацією на засадах Індустрії 4.0, гострою кризою кадрового забезпечення в умовах воєнного стану та мобілізації, а також об'єктивною зміною парадигми підготовки інженерно-технічних фахівців. Традиційні підходи до організації та управління виробництвом, сформовані в епоху домінування універсального обладнання та чіткого функціонального поділу праці, демонструють свою неефективність. Перехід провідних підприємств на використання високотехнологічних обробляючих центрів, гнучких автоматизованих виробництв (ГАВ) та наскрізних CALS-технологій вимагає не просто оновлення парку верстатів, а докорінного переосмислення процесів операційного менеджменту, кадрового планування та розрахунку економічних показників виробництва.

Особливої актуальності набуває перебудова системи управління персоналом через інтеграцію дуальної форми здобуття освіти (ДФЗО). Вона стає базовим інструментом стабілізації кадрового потенціалу, оскільки здобувачі вищої освіти мають відстрочку від мобілізації, що робить їх найбільш прогнозованою та надійною категорією для роботодавця в кризовий період. Метою цієї публікації є обґрунтування нових підходів до управління сучасним механоскладальним виробництвом на основі злиття професій, використання європейської класифікації навичок, компетенцій та професій (ESCO) та системної інтеграції дуальної освіти в контур планування стратегічного розвитку підприємства.

1. Криза традиційних методик управління персоналом та розрахунку фонду оплати заробітної плати

Протягом десятиліть алгоритм управління кадровими ресурсами механоскладальних цехів базувався на класичному ланцюжку: визначення виробничої програми → розрахунку трудомісткості → визначення кількості обладнання → розрахунок чисельності верстатників за категоріями (верстатник, оператор, наладчик, контролер тощо). Кількість допоміжних робітників, службовців та інженерно-технічних працівників (ІТП) розраховувалася як фіксований відсоток від базової кількості верстатників.

Така методологія, хоч і частково враховувала коефіцієнт багатоверстатного обслуговування (який для високоавтоматизованих систем та верстатів-автоматів може сягати значних показників), має низку критичних недоліків у сучасних умовах:

1. Вона орієнтована на монофункціональних робітників низької або середньої кваліфікації (переважно 8 розділ Класифікатора професій ДК 003:2010), які не мають вищої освіти.

2. Вона штучно розділяє інженерну роботу (технолога, програміста) та безпосереднє виконання операції на робочому місці, створюючи надлишкові комунікаційні бар'єри та збільшуючи час на налагодження обладнання.

3. Вона унеможливає точне бюджетування фонду оплати праці (ФОП), оскільки сучасний мультифункціональний фахівець виконує комплекс дій, що раніше належали до 3-4 різних посад.

Розвиток сучасних аерокосмічних та машинобудівних підприємств вимагає кардинальної зміни в розрахунках персоналу "у відсотках від верстатників". Якщо раніше інженер-технолог високої кваліфікації займався виключно розробкою документації в кабінеті, то сьогодні процеси генерації керуючих програм, моделювання та безпосередньої обробки

деталей інтегруються в єдиний цифровий комплекс, керований безпосередньо з робочого місця біля верстата з ЧПК. [1].

2. Досвід трансформації професійних профілів: кейс АТ «ФЕД»

Процес оптимізації структури персоналу та управління виробництвом чітко простежується на прикладі досвіду передових підприємств авіаційної галузі, зокрема АТ «ФЕД». Реальний сектор доводить: впровадження обробляючих центрів призводить до кардинального перерозподілу та об'єднання трудових функцій. [8].

Цей перерозподіл означає, що професії масово мігрують із 8-го розділу Класифікатора професій (робочі спеціальності без вимог до вищої освіти) до 3-го та 2-го розділів (фахівці та професіонали з рівнем освіти не нижче бакалавра). Сучасний робітник біля верстата має володіти знаннями з вищої математики, кібернетики, матеріалознавства та програмування. Відповідно, структура управління виробництвом стає більш пласкою, зменшується кількість рівнів узгодження, а основне інженерне навантаження переноситься на CALS-технології.

3. Міжнародні стандарти ESCO як основа управління компетенціями

Для побудови ефективної системи управління сучасним цифровим виробництвом вітчизняні підприємства мають відмовитися від застарілих радянських кваліфікаційних довідників та інтегрувати європейську класифікацію ESCO (European Skills, Competences, Qualifications and Occupations). ESCO дозволяє формувати матриці компетенцій на основі динамічних ринкових навичок, а не статичних посадових інструкцій. **Фактично такий підхід вирішує проблему відсутності в Системі кваліфікацій України великої кількості професійних стандартів, а також нівелює проблему низької якості державних освітніх стандартів за спеціальностями.**

Так, наприклад, згідно з ESCO, сучасний оператор устаткування з ЧПК розглядається як універсальний інженерний працівник широкого профілю, чий обов'язкові компетентності включають:

- Роботу з високоточним вимірювальним та контрольним обладнанням;
- Самостійне технічне обслуговування, діагностику та усунення несправностей складних мехатронних систем;
- Програмування логічних контролерів (ПЛК) та глибоке використання спеціалізованого програмного забезпечення САМ;
- Оцінку та визначення придатності вхідних матеріалів.

Використання методології ESCO в управлінні виробництвом дає змогу керівництву чітко бачити "прогалини у знаннях" (skills gaps) персоналу, гнучко переміщувати фахівців між ділянками залежно від поточної потреби виробничої програми та формувати диференційовану систему оплати праці, що базується на реальному рівні володіння цифровими навичками, а не на паперовому розряді. [5-7].

4. Дуальна освіта (ДФЗО) як стратегічний інструмент управління кадровими ризиками

Упровадження ДФЗО в умовах воєнного стану перетворилося з суто освітнього експерименту на безальтернативний інструмент антикризового менеджменту для підприємств механічного профілю. Дистанційне навчання, спричинене спочатку пандемією COVID-19, а згодом повномасштабним вторгненням, суттєво послабило практичну складову підготовки студентів, що є критичним для інженерних спеціальностей. ДФЗО дозволяє перенести лабораторні та практичні заняття безпосередньо у виробниче середовище підприємств-партнерів.

З точки зору управління виробництвом, інтеграція ДФЗО має відбуватися за чітким алгоритмом кореляції освітніх програм та бізнес-процесів:

Аналіз ПРН освітньої програми

└─> Добір відповідних професій

└─> Співставлення з вакансіями підприємства

└─> Формування індивідуальної траєкторії студента

Як приклад, для освітньої програми «Робототехнічні системи та комплекси» в рамках дисципліни «Проектування гнучких автоматизованих виробництв» керівництво підприємства спільно з університетом проводить аудит Програмних результатів навчання (ПРН) [2,3,4,9].

Такий підхід трансформує управління виробництвом у декількох аспектів. По-перше, підприємство отримує максимально прогнозований кадровий ресурс, захищений від раптових мобілізаційних втрат. По-друге, студент адаптується до конкретної цифрової екосистеми (MES, ERP, CAD/CAM системи підприємства) ще під час навчання. На виході виробництво отримує унікального фахівця-практика, який здатний виконувати обов'язки інженера-технолога чи оператора ЧПК з першого дня після отримання диплома, повністю виключаючи тривалий і затратний етап адаптації та перенавчання.

Окреме питання полягає також в тому, що потрібно впроваджувати відповідні зміни в плануванні фонду робочого часу працівників та принципів їхньої оплати праці. Адже студенти дуальної форми здобуття освіти повинні також навчатися та мають відповідний графік освітнього процесу, який потрібно враховувати. Також розмір заробітної плати зазвичай визначається не за принципами тарифікації та галузевими стандартами, а безпосередньо за договором про співпрацю в підготовці фахівців за ДФЗО між університетом та підприємством та трудовим договором зі здобувачем дуальної форми здобуття освіти.

Висновки

1. Трансформація сучасного механоскладального виробництва на принципах Індустрії 4.0 робить традиційні методики розрахунку чисельності персоналу та планування фонду оплати праці неактуальними. Необхідно впроваджувати нові інтегровані динамічні моделі кадрового менеджменту.

2. Реальний досвід лідерів ринку (АТ «ФЕД») та міжнародні стандарти ESCO доводять необхідність ліквідації жорстких меж між робітничими та інженерними професіями.

3. Дуальна форма здобуття освіти в сучасних умовах є стратегічним інструментом управління операційними ризиками підприємства. Системне проектування робочих місць дуальщиків на основі матричного зшивання ПРН університету та навичок ESCO забезпечує стабільність кадрового планування, знижує витрати на рекрутинг і гарантує безперервність високотехнологічних виробничих процесів.

Список використаних джерел

1. Курс підвищення кваліфікації з питань впровадження дуальної форми здобуття освіти у закладах вищої та фахової передвищої освіти – URL: <https://nmc-vfpo.com/>

2. Аналітичний звіт за результатами пілотного проєкту підготовки фахівців за дуальною формою здобуття освіти / О. Бучинська, О. Давліканова, Т. Іщенко та ін. – Київ, 2021. – 188 с.

3. Інструментарій щодо впровадження дуальної форми здобуття освіти (ДФЗО) – URL: <https://era-ukraine.org.ua/>

4. Методичні рекомендації щодо впровадження дуальної форми здобуття освіти / за заг. ред. М. Романова. – Київ : ТОВ «Вістка», 2023. – 281 с.

5. ESCO (European Skills, Competences, Qualifications and Occupations) – URL: <https://esco.ec.europa.eu/uk>

6. Механоскладальні дільниці та цехи в машинобудуванні: навч. посібник / С. Ю. Олійник. – Краматорськ : ДДМА, 2021. – 260 с.

7. Державний класифікатор професій ДК 003:2010 – URL: <https://zakon.rada.gov.ua/>

8. Зміни в підходах щодо розрахунків складу виробничих працівників сучасного механоскладального виробництва / Романов М.С. / Сучасні проблеми двигунобудування, енергетики та інтелектуальної механіки / <https://dspace.library.khai.edu/xmlui/handle/123456789/8921>

9. Підбір посади при навчанні за ДФЗО для опанування/поглиблення компетентностей в рамках дисципліни «Проектування гнучких автоматизованих виробництв» освітньої програми «Робототехнічні системи та комплекси» / М. Романов. - Нові технології в машинобудуванні [Текст]: тези доп. Тридцять п'ятої Всеукраїн. конф. 2–5 верес. 2025 р. – Харків : Нац. аерокосм. ун-т «Харків. авіац. ін-т», 2025. – 228 с.

ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ОБСЛУГОВУВАННЯ ПАЦІЄНТІВ КЛІНІКИ

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Україна

Сучасні медичні заклади функціонують у умовах постійного зростання навантаження на систему охорони здоров'я, збільшення кількості пацієнтів та обмеженості матеріальних і кадрових ресурсів. Однією з ключових проблем клінік є неефективна організація процесів обслуговування пацієнтів, що проявляється у перевантаженні персоналу, надмірних чергах, збільшенні часу очікування та нерівномірному використанні ресурсів. Це негативно впливає як на якість медичної допомоги, так і на задоволеність пацієнтів.

Імітаційне моделювання як сучасний інструмент дослідження складних динамічних систем дозволяє без ризику для реальної клініки аналізувати потоки пацієнтів, виявляти «вузькі місця» у процесах, тестувати різні сценарії роботи персоналу та розподілу ресурсів. Такі моделі дають змогу прогнозувати наслідки управлінських рішень, оцінювати завантаження персоналу і обладнання, оптимізувати маршрути пацієнтів і підвищувати ефективність роботи медичного закладу.

Метою дослідження є розробка та дослідження імітаційної моделі процесів обслуговування пацієнтів у клініці для підвищення ефективності використання ресурсів медичного закладу, скорочення часу очікування та оптимізації потоків пацієнтів.

Під час дослідження було створено функціональну і детально опрацьовану симуляційну модель лікарні, яка відтворює повний цикл проходження пацієнтів через усі ключові етапи: реєстрацію, діагностику, отримання медичних послуг, проведення операцій та можливу госпіталізацію. Модель поєднує засоби агентного й пішохідного моделювання, тривимірну візуалізацію руху людей і логіку сервісів, що дозволяє комплексно аналізувати роботу медичної установи в різних умовах.

Проведені експерименти підтвердили, що поведінка системи суттєво залежить від потоку пацієнтів та ймовірнісних параметрів, які визначають потребу в медичних процедурах. У помірному режимі лікарня працює стабільно, з мінімальними затримками та оптимальним використанням ресурсів. При значному збільшенні кількості пацієнтів проявляються структурні обмеження системи: черги, затримки у переміщенні, зростання навантаження на діагностичні та операційні підрозділи. Такий стан демонструє, що ефективність лікарні має природні межі, які можна розширювати лише за рахунок збільшення ресурсів або оптимізації внутрішніх процесів.

Загалом створена модель дозволяє не лише дослідити динаміку роботи лікарні, але й оцінити фінансовий ефект від зміни потоків пацієнтів та структури медичних послуг. Вона може бути застосована для планування ресурсів, стратегічного аналізу інфраструктури, навчання управлінців та експериментів з організаційними структурами медичного обслуговування.

Робота підтверджує, що симуляційні методи є ефективним інструментом для вивчення складних соціотехнічних систем, таких як лікарня, та прийняття обґрунтованих управлінських рішень.

У контексті цифрової трансформації медицини та зростання вимог до якості послуг обслуговування пацієнтів у клініці, запропонована модель може стати основою для прийняття рішень щодо оптимізації роботи в реальних умовах клініки, що робить дослідження важливим з точки зору підвищення ефективності системи охорони здоров'я.

ДЛЯ ПОДАТОК

Наукове видання

**ТЕЗИ ДОПОВІДЕЙ
ТРИДЦЯТЬ ШОСТОЇ ВСЕУКРАЇНСЬКОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ
«НОВІ ТЕХНОЛОГІЇ В МАШИНОБУДУВАННІ»**

2 – 4 вересня 2026 р.

Відповідальний за випуск д-р техн. наук, проф. О. О. Баранов

Підписано до друку 23.09.2026
Формат 60x84 1/16. Папір офс. Офс. друк
Ум. друк. арк. 13,3. Обл.-вид. арк. 15. Наклад 12 пр.
Замовлення . Ціна вільна

Видавець і виготовлювач
Національний аерокосмічний університет
«Харківський авіаційний інститут»
61070, Харків-70, вул. Вадима Манька, 17
<http://www.khai.edu>

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи
до Державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів
видавничої продукції сер. ДК № 391 від 30.03.2001