

*Національний університет біоресурсів  
і природокористування України*



## **ЗБІРНИК**

*тез доповідей*

### ***XX МІЖНАРОДНОЇ НАУКОВО-ПРАКТИЧНОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ «ОБУХОВСЬКІ ЧИТАННЯ»***

*з нагоди 100-ї річниці від дня народження  
доктора технічних наук, професора, академіка АН ВШ України,  
Обухової Віолетти Сергіївни  
(1926-2005)*

*та 25-річчя з дня заснування факультету  
конструювання та дизайну*

*30 березня 2026 року*



м. Київ

ББК40.7

УДК 631.17+62-52-631.3

Обуховські читання: XX Міжнародна науково-практична конференція, м. Київ, 30 березня 2026 року: тези конференції. Національний університет біоресурсів і природокористування України. Київ. 2026. 186 с.

В збірнику представлені тези доповідей науково-педагогічних працівників, наукових співробітників, аспірантів і докторантів учасників XX Міжнародної науково-практичної конференції «Обуховські читання», в яких розглядаються нинішній стан та шляхи розвитку прикладної геометрії та інженерної графіки, дизайну, питання викладання графічних дисциплін.

### **ОРГАНІЗАЦІЙНИЙ КОМІТЕТ:**

**Отченашко В.В.**, начальник науково-дослідної частини НУБіП України, – голова організаційного комітету;

**Пилипака С.Ф.**, завідувач кафедри нарисної геометрії, комп'ютерної графіки та дизайну НУБіП України, – заступник голови організаційного комітету;

**Несвідомін В.М.**, професор кафедри нарисної геометрії, комп'ютерної графіки та дизайну НУБіП України, – секретар організаційного комітету.

### **ЧЛЕНИ ОРГАНІЗАЦІЙНОГО КОМІТЕТУ:**

**Адамчук О.В.**, директор ГО «Аграрний клуб», голова ради роботодавців факультету конструювання та дизайну НУБіП України;

**Арак М.**, директор інженерного інституту Естонського університету наук про життя (Естонська Республіка) (за згодою);

**Бабка В.М.**, доцент кафедри нарисної геометрії, комп'ютерної графіки та дизайну НУБіП України;

**Булгаков В.М.**, завідувач кафедри механіки НУБіП України, академік НААН;

**Воліна Т.М.**, доцент кафедри нарисної геометрії, комп'ютерної графіки та дизайну НУБіП України;

**Грищенко І.Ю.**, доцент кафедри нарисної геометрії, комп'ютерної графіки та дизайну НУБіП України;

**Джеонг І.**, Голова представництва в Україні «Hyundai Xitesolution» (Республіка Корея) (за згодою);

**Домейка Р.**, декан відділення агроінженірингу Університету Вітаутаса Великого (Литовська Республіка) (за згодою);

**Коренко М.**, професор Інституту проектування та інженерних технологій Словацького університету с.-г. в Нітрі, (Словацька Республіка);

**Ловейкін В.С.**, завідувач кафедри конструювання машин і обладнання НУБіП України;

**Лопатько К.Г.**, завідувач кафедри технології конструкційних матеріалів і матеріалознавства НУБіП України;

**Несвідомін А.В.**, доцент кафедри нарисної геометрії, комп'ютерної графіки та дизайну НУБіП України;

**Новицький А.В.**, завідувач кафедри надійності техніки НУБіП України;

**Роговський І.Л.**, декан факультету конструювання та дизайну НУБіП України;

**Шатров Р.В.**, в.о. завідувача кафедри технічного сервісу та інженерного менеджменту НУБіП України;

**Яковенко І.А.**, завідувач кафедри будівництва НУБіП України

**ПОДРУЖЖЮ ПРОФЕСОРІВ ВІОЛЕТТИ СЕРГІЇВНИ ОБУХОВОЇ (НУБІП УКРАЇНИ) І ОЛЕКСІЯ ЛЕОНТІЙОВИЧА ПІДГОРНОГО (КНУБА), ЯКІ ОЧОЛЮВАЛИ КАФЕДРИ В СВОЇХ УНІВЕРСИТЕТАХ І ПРОВІДИЛИ СПІЛЬНІ АСПІРАНТСЬКІ СЕМІНАРИ, ПРИСВЯЧУЄТЬСЯ**



**ОБУХОВА Віолетта Сергіївна (1926-2005)  
доктор технічних наук, професор**

Народилася в 23 лютого 1926 р. в місті Томську. В 1949 році закінчила Уральський політехнічний інститут за спеціальністю „Електро-устаткування промислових підприємств”. В 1955 році закінчила аспірантуру при Київському інженерно-будівельному інституті. З 1955 до 2005 року працювала на кафедрі нарисної геометрії та машинобудівного креслення Української сільськогосподарської академії (нині НУБіП України), яку очолювала в 1980-1991 р.р. і 1994-1999 р.р.. В 1955 році захистила кандидатську дисертацію, в 1991 році – докторську. Була членом редколегії республіканської науково-технічної збірки “Прикладна геометрія та інженерна графіка”, предметної науково-методичної комісії при Міносвіти України, Всесвітньої організації геометрів і графіків (ISGG), семінару загальнотехнічного відділення АН ВШУ, Президії Української асоціації з прикладної геометрії. Підготувала 9 кандидатів та 2 докторів технічних наук. Нагороджена медалями “Ветеран праці”, “В пам’ять 1500-річчя Києва”, нагрудним знаком МВО СРСР “За відмінні успіхи в роботі”, почесною грамотою Міносвіти України. Академік АН ВШ України. Померла 26 лютого 2005 року

**ПІДГОРНИЙ Олексій Леонтійович (1929-2023)  
доктор технічних наук, професор**

Народився 30 березня 1929 року в с. Чечеліївка, Петровського району Кіровоградської області. В 1947 році поступив, а в 1953 р. закінчив архітектурний факультет Київського інженерно-будівельного інституту. До 1956 року навчався в аспірантурі при кафедрі нарисної геометрії і креслення КІБІ, після чого працював на тій же кафедрі. В 1959 році захистив кандидатську дисертацію, в 1975 році – докторську з 1971 до 2009 року – завідувач кафедри архітектурних конструкцій Київського інженерно-будівельного інституту (нині КНУБА), з 2009 року – професор кафедри. Підготував 44 кандидати та 6 докторів наук. Член спілки архітекторів України з 1975 року. Дійсний член Української академії архітектури та Академії будівництва України. Академік АН ВШ України. Член міжнародного товариства геометрів і графіків (ISGG). Віце-президент Української асоціації з прикладної геометрії (УАПГ). Нагороджений Орденом «За заслуги» третього ступеня, двома медалями та знаками «Винахідник СРСР», «Відмінник освіти України». В 1996 році проф. Підгорного О.Л. удостоєно почесного звання «Заслужений діяч науки і техніки України». Помер 19 січня 2023 року.

УДК 514.18

## РЕЗУЛЬТАТИ НАУКОВОЇ РОБОТИ КАФЕДРИ НГКГД

*Пилипака С.Ф.*

*Національний університет біоресурсів і природокористування України*

Виповнилося 100 роки від дня народження професора Обухової Віолетти Сергіївни і 21 рік, як її не стало. Прийшовши на кафедру в 1955 році після захисту кандидатської дисертації, вона відразу ж започаткувала і розгорнула наукову роботу. Завідувачем кафедри на той час був С.В. Розов, який активно займався методичною діяльністю. Його підручники і посібники в того часу були відомі не тільки в країні, а і за її межами. Таке вдале поєднання двох творчих особистостей дало хороші результати: на кафедрі розвивалася і методична, і наукова робота.

Згодом було відкрито аспірантуру із наукової спеціальності «Прикладна геометрія, інженерна графіка», з'явилися аспіранти. Віолеттою Сергіївною був сформований колектив, у якому працювали викладачами її колишні аспіранти. У 2000 році захищає докторську дисертацію під науковим консультуванням Обухової В.С. її колишній аспірант Пилипака С.Ф., а в 2008 році (уже після смерті Віолетти Сергіївни) теж її колишній аспірант Несвідомін В.М. На кафедрі вперше за весь період її існування з'явилось два доктори наук із профільної спеціальності. Це стало новим поштовхом для наукової роботи. За 21 останніх років на кафедрі захищено 16 кандидатських дисертацій, 1 дисертація доктора філософії і одна докторська дисертація (колишня аспірантка Воліна Т.М.). Завдяки цьому на кафедрі в даний час працює три доктори наук і три кандидати наук, доценти.

Значним кроком вперед в плані розвитку наукової школи кафедри, яку започаткувала В.С. Обухова, стало відкриття спеціалізованої ради із захисту докторських дисертацій Д 26.004.11 в нашому університеті за двома спеціальностями: 05.01.01 – Прикладна геометрія, інженерна графіка та 05.23.01 – Будівельні конструкції, будівлі та споруди (голова ради – проф. С.Ф. Пилипака). В цій раді в 2025 році була захищена перша дисертація – докторська робота Воліної Т.М. В 2020 році відбувся попередній захист докторської роботи Муквича М.М., однак вона не була захищена із-за того, що автор передчасно пішов із життя. Доопрацьовує докторську дисертацію колишня аспірантка і докторантка кафедри, а нині завідувачка кафедри у відокремленому підрозділі України «Ніжинський агротехнічний інститут» Т.А. Кресан. Закінчується термін перебування в докторантурі колишнього аспіранта кафедри, доцента А.В. Несвідоміна. Науково-педагогічні працівники кафедри успішно публікують свої праці у виданнях, що індексуються наукометричною базою “Scopus”. Наприклад, у А.В. Несвідоміна за темою докторської роботи опубліковано 10 праць.

Тематика наукових досліджень охоплює досить широке коло задач. Це задачі згинання листового матеріалу і побудова викрійок, згинання матеріалу із врахуванням пружинення. Окремий напрям – застосування супровідного тригранника Френе в задачах конструювання поверхонь та кінематики і

динаміки матеріальної точки. В цьому плані розглянуто конструювання поверхонь середньої сталої і нульової кривини, обвідних поверхонь однопараметричної множини площин, лінійчатих поверхонь полицевого типу для проектування ґрунтообробних знарядь тощо. В полі зору науковців кафедри наступні напрямки досліджень: апроксимація нерозгортних поверхонь відсіками розгортних, застосування ізометричних координат, геодезичні лінії поверхонь, комп'ютерні моделі синтетичної геометрії, внутрішня геометрія кривих ліній і поверхонь. За результатами досліджень опубліковано три монографії, в тому числі одна англійською мовою. Не відстає і студентська наукова робота – наші студенти неодноразово були призерами всеукраїнського конкурсу студентських наукових робіт, який проводився до повномасштабного вторгнення російського агресора до нашої держави.

З того часу, як не стало Віолетти Сергіївни, пройшов 21 рік. За цей час були захищені наступні кандидатські дисертації: Грищенко І.Ю. (2005), Чернишова Е.О. (2007), Дзюба В.В. (2008), Муквич М.М. (2009), Бабка В.М. (2010), Пилипака Т.С. (2010), Кресан Т.А. (2012), Демчук І.О. (2012), Бойко Л.С. (2013), Воліна Т.М. (2014), Пилипака О.А. (2014), Кременець Т.С. (2016), Несвідомін А.В. (2016), Кременець Я.С. (2017), Чепіжний А.В. (2019), Бичок О.В. (2021), Хропост В.І. (2025, доктор філософії).

Загалом проф. Обухова В.С. пропрацювала на кафедрі 50 років (1955 – 2005). Таким чином, її наукова школа відзначає 70-ліття свого існування наведеними здобутками. Слід зазначити, що в останні роки до перерахованих напрямків наукових досліджень добавився ще один – технології віртуальної та доповненої реальності. Її активно просуває як в навчальний процес, так і у наукових дослідженнях докторант Несвідомін А.В. Його старший колега проф. Несвідомін В.М. також підхоплює новітні напрямки розвитку цифрових технологій. Він досить ґрунтовно розібрався у особливостях різних версій штучного інтелекту і успішно їх застосовує в навчальній роботі, при цьому може доручати їм перевірку студентських робіт.

Підводячи підсумки, скажемо так. З 2025 року науково-педагогічна діяльність переживає не прості часи. Епідемія коронавірусу, а згодом повномасштабна війна змусили навчальний процес трансформуватися у дистанційний формат. До цього додався відтік майбутніх абітурієнтів за кордон на фоні того, що падає престиж здобуття вищої освіти і скорочуються години на викладання графічних дисциплін. Цим факторам важко протидіяти, через те кафедра шукає шляхи виходу із ситуації, що склалася, опануванням новітніх досягнень цифрових технологій та інтегруванням їх у традиційні дисципліни кафедри.

УДК 631.3.001.4:621.01

## **ЗАРОДЖЕННЯ В УКРАЇНІ НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ «НАРИСНА ГЕОМЕТРІЯ»**

***Булгакова Оксана***

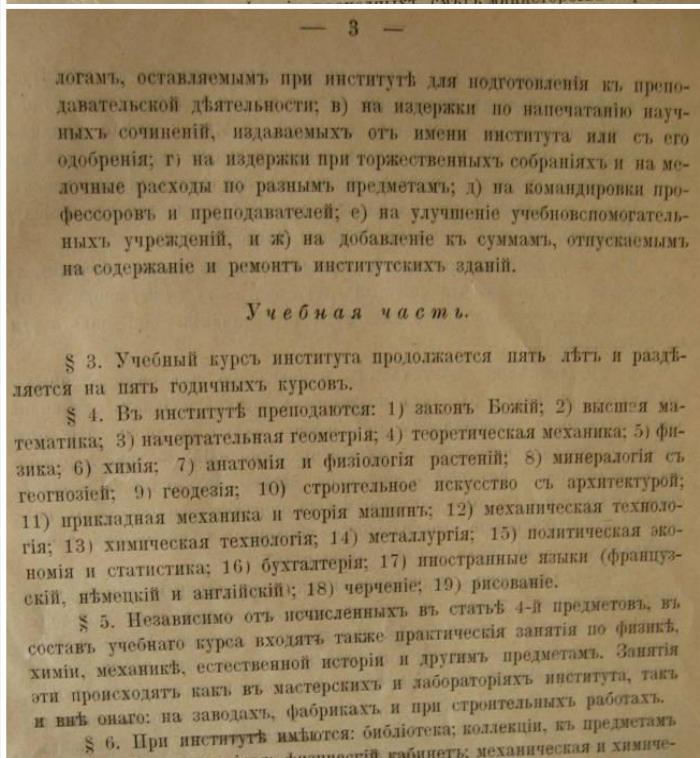
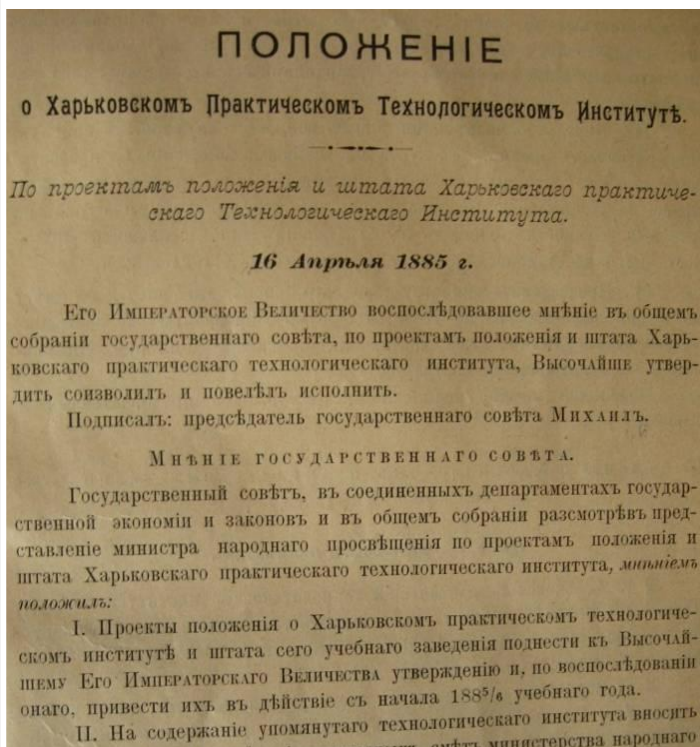
*Національний університет біоресурсів і природокористування України*

Міжнародною мовою спілкування інженерів усіх часів і народів незмінно було і є креслення. Невміння читати й аналізувати кресленики, знаходити помилки чи невідповідності на них ставить під сумнів інженерну кваліфікацію такого «фахівця».

Предмет «Нарисна геометрія» й досі залишається одним із найскладніших для опанування студентами. Незважаючи на сучасні досягнення у сфері математичних методів, численні комп'ютерні програми й великий вибір спеціалізованої літератури, цей курс викликає труднощі й часто сприймається студентами перших курсів вишів як малозрозумілий. Лишається тільки уявляти, наскільки важким було вивчення нарисної геометрії понад сто сорок років тому. Особлива складність полягала в тому, що в ті часи практично не існувало методичних матеріалів чи навіть доступної літератури з цієї тематики. Базові технічні бібліотеки, стандарти, технічні умови, а тим більше ресурси на зразок сучасного Інтернету тоді були недосяжною мрією. Класична література в цій галузі здебільшого ще навіть не була написана.

Однак, слід зазначити, що у Харківському Практичному Технологічному Інституті (ХПТІ), відкритому в 1885 році, інженерна освіта була організована на досить високому рівні. Зокрема, перший директор ХПТІ професор Віктор Львович Кирпичов, видатний спеціаліст у галузі прикладної механіки та опору матеріалів, добре усвідомлював важливість вміння майбутніми інженерами користуватися «мовою креслень»: читати й створювати графічні проекти. Завдяки зусиллям професора В. Л. Кирпичова до викладання в Інституті вдалося залучити багатьох висококваліфікованих науковців і педагогів з усієї країни. Вони успішно навчали студентів не лише нарисної геометрії та креслення, а й малювання. Серед них – такі знані в Харкові архітектори, як Володимир Васильович Хрустальов, Юлій Семенович Цауне, Володимир Християнович Немкін і Олексій Миколайович Бекетов, які читали студентам лекції з будівельного та загального креслення. Навчання мистецтву малювання проводили художники Андрій Іванович Данилевський та Валентин Августович Фельдман.

Слід підкреслити, що згідно «Положення» та «Статуту» Харківського практичного технологічного інституту (див. рис. 1 та рис. 2) серед навчальних дисциплін передбачалось викладання студентам тоді існуючих тільки двох факультетів (Механічному та Хімічному) окремих навчальних курсів з «Нарисної геометрії», «Креслення» і «Малювання».



**ПОЛОЖЕННЯ**  
про Харківський практичний технологічний інститут

За проектами Положення та штатного розпису  
Харківського практичного технологічного інституту.

16 квітня 1885 року.

Стор. 2.

III. До вирішення загального питання про службові права, які надає закінчення навчання у вищих навчальних закладах, дозволити особам, удостоєним звання інженера-технолога або технолога, отримувати право затвердження при вступі на державну службу на штатні посади техніків у таких чинах: інженер-технолог – у чині X класу, а технолог – у чині XII класу; .....

**Мета та засоби інституту.**

§ 1. Харківський практичний технологічний інститут має на меті надавати своїм учням вищу технологічну освіту за спеціальностями механічною та хімічною. Відповідно до цього інститут поділяється на два відділення.

– 3 –

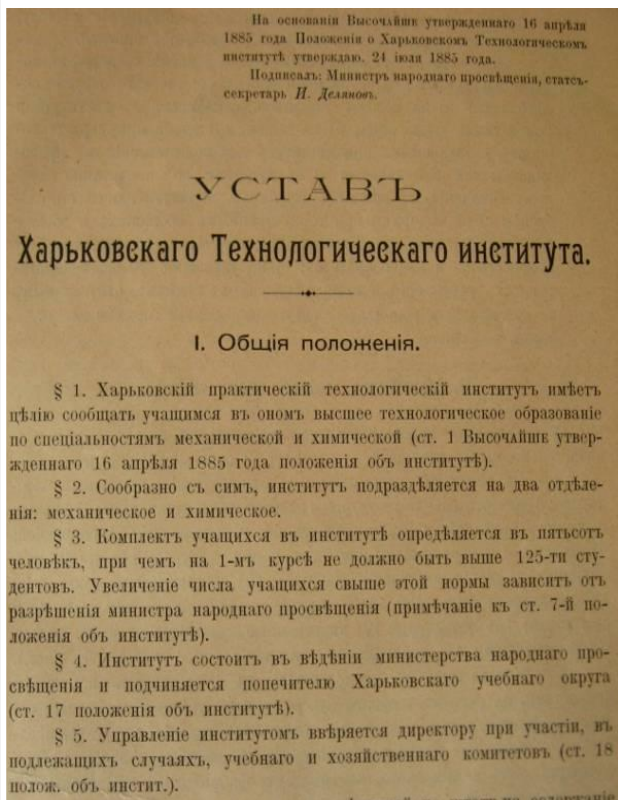
**Навчальна частина.**

§ 3. Навчальний курс інституту триває п'ять років і поділяється на п'ять річних курсів.

§ 4. В інституті викладаються: 1) закон Божий; 2) вища математика; 3) нарисна геометрія; 4) теоретична механіка; 5) фізика; 6) хімія; 7) анатомія і фізіологія рослин; 8) мінералогія з геогнозією; 9) геодезія; 10) будівельне мистецтво з архітектурою; 11) прикладна механіка і теорія машин; 12) механічна технологія; 13) хімічна технологія; 14) металургія; 15) політична економія і статистика; 16) бухгалтерія; 17) іноземні мови (французька, німецька та англійська); 18) креслення; 19) малювання.

§ 5. Незалежно від перелічених у статті 4 предметів, до навчального курсу входять також практичні заняття з фізики, хімії, механіки, історії та інших дисциплін. Ці заняття відбуваються як у майстернях і лабораторіях інституту, так і поза ним – на заводах, фабриках і під час будівельних робіт.

Рис. 1. Титульна сторінка та фрагмент 3 сторінки (деякі відомості з 2 сторінки) Положення про затвердження Харківського практичного технологічного інституту із зазначенням факультетів (відділень), звань, якими будуть відзначатися випускники інституту, та навчальних курсів, що викладатимуться студентам протягом п'яти років навчання (ліворуч – фото архівного документа, праворуч – переклад автора)



На підставі Найвищо затвердженого 16 квітня 1885 року Положення про Харківський технологічний інститут затверджую. 24 липня 1885 року.  
Підписав: Міністр народної освіти, статс-секретар  
І. Делянов.

## СТАТУТ

### Харківського Технологічного інституту.

#### I. Загальні положення.

§ 1. Харківський практичний технологічний інститут має на меті надавати своїм учням вищу технологічну освіту за спеціальностями механічною та хімічною (ст. 1 Найвищо затвердженого 16 квітня 1885 року Положення про інститут).

§ 2. Відповідно до цього інститут поділяється на два відділення: механічне та хімічне.

§ 4. Інститут перебуває у віданні Міністерства народної освіти і підпорядковується піклувальнику Харківського навчального округу (ст. 17 Положення про інститут).

§ 5. Управління інститутом доручається директорові за участю, у відповідних випадках, навчального та господарського комітетів (ст. 18 Положення про інститут).

#### II. Навчальна частина інституту

§ 7. Навчальний курс інституту триває п'ять років і поділяється на п'ять річних курсів (ст. 3 положення про інститут).

§ 8. В інституті викладаються: 1) закон Божий; 2) вища математика; 3) нарисна геометрія; 4) теоретична механіка; 5) фізика; 6) хімія; 7) анатомія і фізіологія рослин; 8) мінералогія з геогнозією; 9) геодезія; 10) будівельне мистецтво з архітектурою; 11) прикладна механіка і теорія машин; 12) механічна технологія; 13) хімічна технологія; 14) металургія; 15) політична економія і статистика; 16) бухгалтерія; 17) іноземні мови (французька, німецька та англійська); 18) креслення; 19) малювання (ст. 4 положення про інститут).

§ 9. Незалежно від перелічених у статті 4 предметів, до складу навчального курсу входять також практичні заняття з фізики, хімії, механіки, історії та інших предметів. Ці заняття відбуваються як у майстернях і лабораторіях інституту, так і поза ним – на заводах, фабриках і під час будівельних робіт (ст. 5 положення про інститут).

Рис. 2. Титульна сторінка та фрагмент 2 сторінки Статуту Харківського технологічного інституту із зазначенням основних загальних положень і навчальних предметів, запланованих для викладання студентам (ліворуч – фото архівного документа, праворуч – переклад автора)

При чому, незважаючи на те, що в назві «Положення» та «Статуту» цей перший технічний виш України начебто має різні назви, однак на початку існування (офіційне відкриття відбулося 27 вересня 1885 року) він мав назву, яка декларувалась першим офіційним документом [1, 2].

У квітні 1885 року для Харківського Практичного Технологічного інституту було затверджено штатний розпис, який передбачав такі посади: десять професорів, сім ад'юнкт-професорів, один законовчитель, механік механічних майстерень, лаборант хімічних лабораторій та біолог. Однак із самого початку вирішити проблему комплектування викладацького складу в

Інституті не вдалося. Причиною цього стало те, що з набором лише на перший курс відразу після заснування закладу не було потреби у викладачах для спеціальних дисциплін старших курсів, таких як обробка металів різанням, приготування дріжджів, металургія чи цукрове виробництво. На ранніх етапах навчального процесу фахівців із деяких базових дисциплін залучали з Імператорського Харківського університету. Зокрема, це стосувалося викладачів вищої математики, геології, статистики, фабричної гігієни та навіть фізики й хімії. Деякі з них були випускниками університету, а дехто одночасно працював і викладав у ньому.

Станом на 1885 рік до складу педагогічного персоналу ХПТІ офіційно входили: один професор Віктор Львович Кирпичов (прикладна механіка), він же директор Інституту, два ад'юнкт-професори – фізик Олександр Костянтинівич Погорелко та хімік Олександр Павлович Ельтеков; два штатні викладачі – Григорій Олексійович Латишев (креслення) та Олексій Васильович Гречанінов (креслення й механіка, який доєднався до педагогічного корпусу ХПТІ в 1886 році), а також законовчитель Василь Миколайович Добровольський [3, с. 37]. Згодом, із розширенням кількості курсів, що почали викладатись в інституті, і збільшенням студентського контингенту, поступово поповнювалися й лави педагогічного складу Інституту.

Першим викладачем, який заклав основу для розвитку дисциплін з нарисної геометрії та графіки, став Григорій Олексійович Латишев. Його педагогічний шлях у ХПТІ розпочався безпосередньо в 1885 році, коли він почав викладати першим студентам Вишу нарисну геометрію й креслення. У 1886 році він додатково почав читати курс лекцій із сільськогосподарських машин, а в 1892 – із механічної технології. З 1893 року Латишев Г. О. обійняв посаду ад'юнкт-професора з нарисної геометрії, а також викладав цю дисципліну як приват-доцент в Імператорському Харківському університеті в різні роки між 1891 та 1916 роками, де також читав курс лекцій з нарисної геометрії [4, с. 92]. У 1897 році Григорій Олексійович опублікував перший підручник «Нарисна геометрія», який користувався великим успіхом і згодом двічі перевидавався (у 1901 та 1910 роках) зі значними доповненнями та оновленнями, зокрема з прикладами практичного застосування графічної статистики. Цей підручник став основою для викладання курсу «Нарисна геометрія», який продовжують вивчати студенти НТУ «ХП» (таку назву має сучасний політехнічний інститут у Харкові) й дотепер.

Згодом Латишев Г. О. здобув у 1916–1921 роках звання Заслуженого професора Харківського технологічного інституту (так почав іменуватись Харківський практичний технологічний інститут), і з того часу більша частина його науково-педагогічної діяльності була присвячена розвитку сільськогосподарського машинобудування [5, 6].

Продовжуючи традиції Григорія Олексійовича Латишева керівництво вишу активно застосовувало у своїй педагогічній діяльності оригінальний підхід. Так, чимала кількість викладачів спеціальних предметів починали свою кар'єру з посади викладачів креслення. А у рамках усього навчального процесу, що

здійснювався на двох факультетах (тобто при викладанні інших предметів інженерного профілю) нерідко замість креслень абстрактних фігур студенти працювали над створенням креслень реальних деталей, вузлів та обладнання, зокрема паровозів, парових машин, деталей верстатів, використовуючи основні положення та закони нарисної геометрії та технічного креслення. Завдяки такому підходу всі учасники навчального процесу (тобто викладачі та студенти) набували навичок креслення навіть найскладніших складових частин деталей, механізмів та машин. У подальшому, на старших курсах, виконання креслень, навіть більш складних конструкцій, вже не викликало жодних труднощів.

Навчальні та наукові роботи Григорія Олексійовича Латишева заклали основу для розвитку викладання нарисної геометрії і креслення, які стали справжнім випробуванням для багатьох викладачів і лаборантів на початку їхньої кар'єри в ХПТІ та ХТІ. Водночас велика кількість студентів і випускників цих закладів отримували надійний фундамент у вигляді опанованих курсів креслення для вивчення більш складних дисциплін. Це стосувалося таких предметів, як теорія механізмів та машин, деталі машин, піднімально-транспортні машини, проектування парових машин, паровозів, а також хімічного обладнання. Безумовно, що успішне вивчення сільськогосподарських машин та знарядь, викладання яких вперше в Україні студентам вишів відбулось саме у Харкові, вимагало від студентів політехнічного інституту бездоганних знань саме нарисної геометрії та машинобудівного креслення. Без розуміння технологічних схем, креслень конкретних конструкцій землеробських машин та їх робочих органів, креслень обладнання за допомогою якого можна виготовляти ці машини, інженерна діяльність майбутніх фахівців в галузі сільськогосподарського машинобудування просто неможлива. Такий підхід став важливим досягненням і значним внеском у розвиток вітчизняної освіти.

Такий же самий підхід необхідний і у сучасний період підготовки інженерних кадрів для аграрної галузі України. І майбутні інженери-технологи, і інженери-конструктори машинобудівної галузі, і інженери-будівельники, що здобувають освіту в аграрних університетах нашої держави, повинні бездоганно володіти знаннями в галузях нарисної геометрії, технічного креслення, комп'ютерної графіки та дизайну.

### **Література**

1. Збірник постанов щодо Міністерства народної освіти. Т. 10. Царювання імператора Олександра III. 1885–1888. Тип. Товариш. «Товариств. Користь», 1894. С. 72-74. (українська мова).
2. Збірник постанов щодо Міністерства народної освіти. Т. 10. Царювання імператора Олександра III. 1885–1888. Тип. Товариш. «Товариств. Користь», 1894. С. 74-123. (українська мова).
3. Журило Д. Ю. Становлення та розвиток Харківського Технологічного інституту наприкінці XIX – на початку XX сторіччя: монографія. Нац. техн. ун-т «Харк. політехн. ін-т». – Харків: Підручник НТУ «ХП», 2016. 264 с.

4. Журило О. Д., Журило А. Г. Викладання нарисної геометрії в ХТІ наприкінці XIX століття. «Україна і світ»: гуманітарно-технічна еліта та соціальний прогрес: тези доп. Міжнар. наук.-теор. конф. студ. і аспір., м. Харків: 7-8 квітня 2015 р., у 3 ч. Ч. 3. С. 92-93.

5. Державний архів Харківської області (ДАХО). Ф. Р-1682. Оп. 2. Спр. 179. Справа про службу професора Григорія Олексійовича Латишева.

6. Булгакова О. В. Витоки зародження в Україні навчальної дисципліни та фундаментальної науки землеробська механіка в контексті філософського аспекту понять. ЧАСТИНА I. ХАРКІВСЬКИЙ ПЕРІОД. // «Вісник науки та освіти (Серія «Історія та археологія»)»: журнал. 2025. № 11(41). – С. 3531-3554.

УДК 514.18

## РОЗВИТОК НАУКОВОЇ ШКОЛИ ОБУХОВОЇ В. С.

*Воліна Т.М.*

*Національний університет біоресурсів і природокористування України*

Пилипакою С. Ф. на Несвідомим В. М. у 2000 та 2008 роках відповідно було захищено докторські дисертації зі спеціальності 05.01.01 «Прикладна геометрія та інженерна графіка» (консультант – проф. Обухова В. С.). Це відкрило нові можливості розвитку наукової школи на кафедрі нарисної геометрії та комп'ютерної графіки Національного університету біоресурсів і природокористування України.

Тематика наукових досліджень змінювалась протягом років. На початковому етапі (2000–2010 р.р.) представниками наукової школи було здійснено фундаментальний перехід від класичних графічних методів нарисної геометрії до аналітичного опису об'єктів (рис. 1).

Друге десятиліття (2011–2019 р.р.) характеризувалося поглибленим вивченням кінематики та оптимізації технічних форм. Ключовим вектором став аналіз складного руху матеріальної точки по шорстких поверхнях із залученням математичного апарату супровідного тригранника Френе та Дарбу. Паралельно активно розвивався напрямок конструювання розгортних і мінімальних поверхонь, а також аналіз геодезичних ліній, що знайшло практичне застосування у проектуванні робочих органів сільськогосподарських машин.

Практична реалізація такого масиву досліджень стала можливою виключно завдяки активному впровадженню систем комп'ютерної алгебри (CAS). Аналітичне обґрунтування вимагало створення розгалужених обчислювальних алгоритмів. Базовими інструментами для розв'язання диференціальних рівнянь та точної візуалізації просторових поверхонь стали програмні середовища MapleSoft, Mathematica та MatLAB.

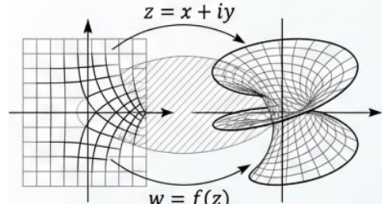
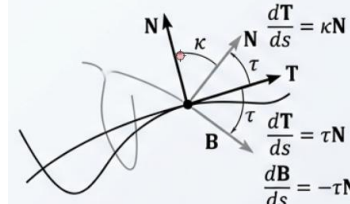
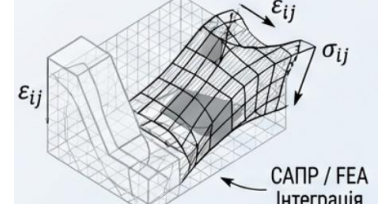
<p><b>2000–2008 рр.:</b> Фундаментальні моделі, конформні відображення</p>	<p><b>2009–2014 рр.:</b> Кінематика, диференціальна геометрія</p>	<p><b>2015–2025 рр.:</b> Ізометричні сітки, деформація</p>
<p><b>Фокус:</b> ортогональні сітки, функції комплексної змінної, мінімальні поверхні</p>	<p><b>Фокус:</b> складний рух точки, супровідний тригранник кривої, натуральні рівняння</p>	<p><b>Фокус:</b> ізометричні координати, пружно-пластична деформація, інтеграція з САПР</p>
		
<p><b>Здобувачі:</b> Ананенко Т.А., Грищенко І.Ю., Дзюба В.В., Чернишова Е.О.</p>	<p><b>Здобувачі:</b> Бабка В.М., Бойко Л.С., Воліна (Захарова) Т.М., Коровіна І.О., Муквич М.М., Пилипака Т.С.</p>	<p><b>Здобувачі:</b> Кремець Т.С., Бичок (Несвідоміна) О.В., Кремець Т.С., Несвідомін А.В., Хропост В.І., Чепіжний А.В., Кремець Я.С.,</p>
<p>17 захищених дисертацій, об'єднаних єдиним напрямком досліджень – від абстрактних математичних моделей до розв'язання прикладних інженерних задач.</p>		

Рис. 1. Хронологія наукових досліджень

Використаний у наукових дослідженнях математичний апарат структурно розгалужується на кілька ключових напрямків, що забезпечують всебічний аналітичний опис геометричних об'єктів (рис. 2).



Рис. 2. Особливості математичного апарату символічних обчислень

Одним із базових інструментів є формули Френе та вектори супровідного тригранника, використання яких дозволяє здійснювати моделювання траєкторій складного просторового руху та орієнтації робочих органів машин.

Водночас застосування першої та другої квадратичних форм поверхонь дає можливість розраховувати геодезичні лінії та проводити комплексний аналіз внутрішньої геометрії (наприклад, при армуванні оболонок).

Впровадження в інженерну практику апарату функцій комплексної змінної відкрило шлях до застосування конформних відображень, що дозволило будувати ізометричні сітки та складні профілі без спотворення кутів.

Використання натуральних рівнянь кривих стало ефективним математичним апаратом у задачах згинання листового матеріалу, оскільки цей метод гарантує інваріантність довжини дуги при таких деформаціях.

Логічним продовженням фундаментальних розробок наукової школи стало перенесення абстрактних моделей у площину практичної кінематики, що сформувало окремий напрямок – кінематичну геометрію складного руху (рис. 3). В основі цього підходу лежить використання математичного апарату тригранника Френе або Дарбу для здійснення переходу до внутрішніх координат досліджуваної поверхні. Застосування такого методу дозволяє проводити проєкціювання всіх діючих сил та описувати взаємодію матеріальної точки з поверхнею в проєкціях на орти рухомих тригранників.

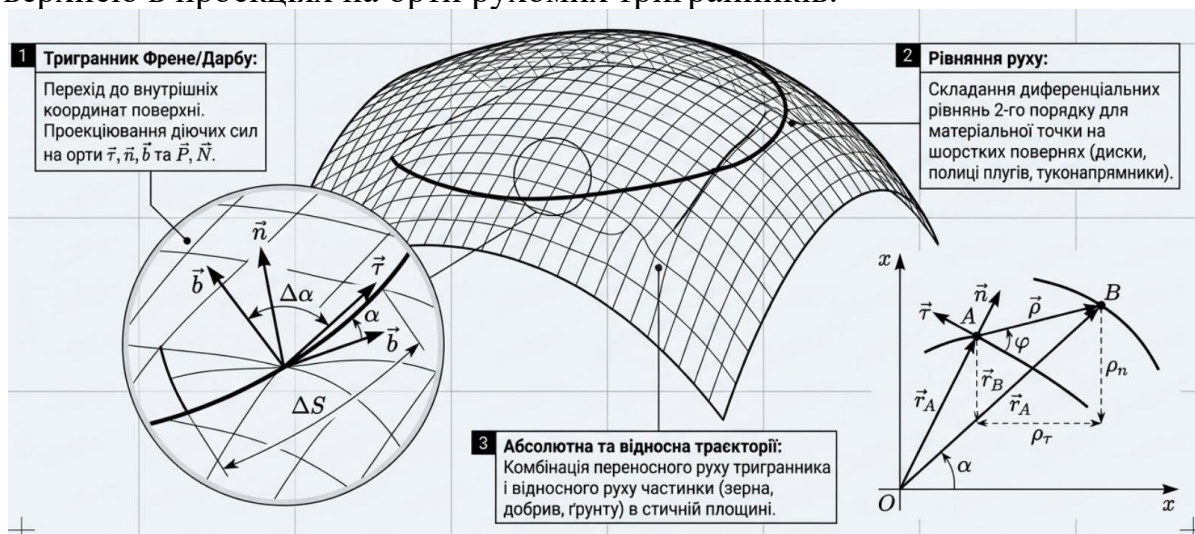


Рис. 3. Кінематична геометрія складного руху точки на поверхні

Центральним завданням цього етапу досліджень стало складання диференціальних рівнянь для опису руху матеріальної точки по шорстких поверхнях. Практична цінність цих математичних моделей полягає в їхній прямій адаптації до потреб сільськогосподарського машинобудування. Розроблені алгоритми дозволяють математично обґрунтувати та оптимізувати просторові форми різноманітних робочих органів (диски відцентрових апаратів, розкидачі, полиці плугів, туконапрямки тощо).

Наступним важливим напрямом досліджень наукової школи є комплексне розв'язання задач формоутворення, яке базується на теорії ізометричних координатних сіток (рис. 4).

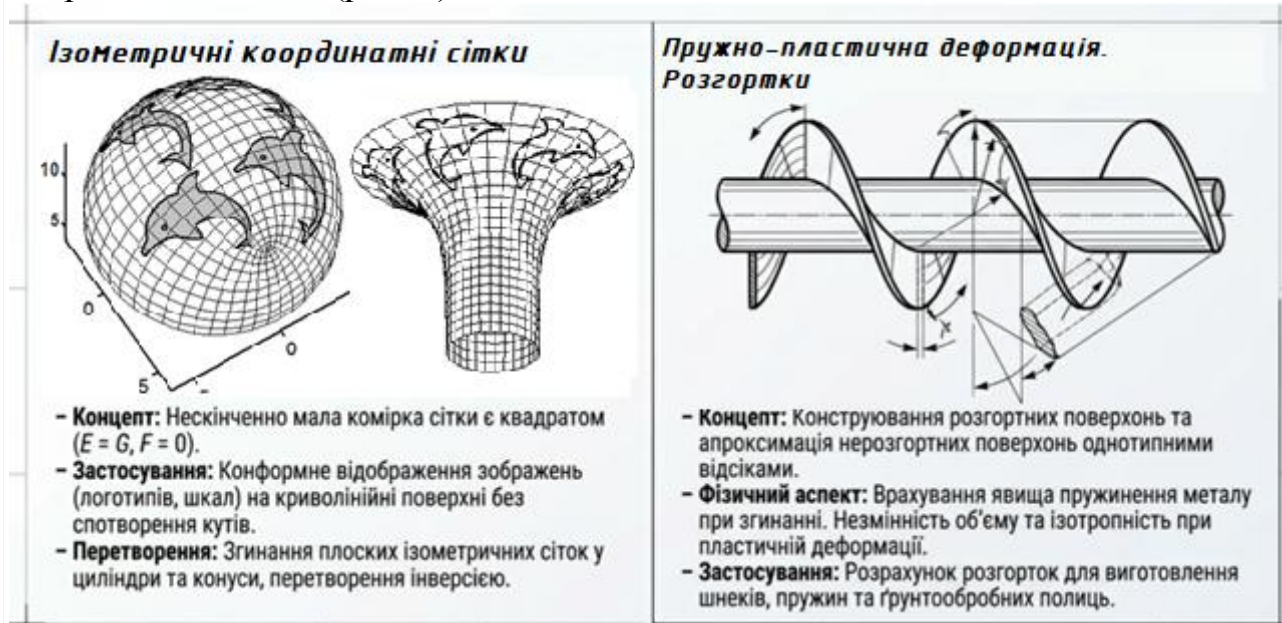


Рис. 4. Формоутворення: від ізометрії до точних та наближених розгорток

Концептуально цей підхід розглядає нескінченно малу комірку сітки як квадрат. Застосування такого математичного апарату дозволяє здійснювати конформне відображення заданих контурів на криволінійні поверхні без спотворення кутів. Завдяки цьому було реалізовано алгоритми перетворення та згинання плоских ізометричних сіток у просторові оболонки, застосовано апарат перетворення інверсії для генерації нових технічних форм.

Окремим вагомим здобутком стало вирішення прикладних проблем конструювання точних розгорток розгортних поверхонь та апроксимації складних нерозгортних поверхонь відсіками або смугами розгортних. Відмовившись від наближених графічних процедур нарисної геометрії, було запропоновано аналітичні моделі, які дозволяють замінювати складні просторові форми набором однотипних відсіків. Такий метод суттєво оптимізує технологічний процес розкрою листового матеріалу. Отримані алгоритми є критичними для розрахунку параметрів плоских заготовок при виробництві шнекових механізмів, ґрунтообробних полиць.

При переході від геометричного моделювання до реального виробництва було досліджено геометричні аспекти пружно-пластичної деформації (рис. 4). У розрахунках розгорток і матриць для штампування обов'язково враховувався фізичний аспект процесу: явище пружинення металу після згинання, а також умови незмінності об'єму та ізотропності матеріалу.

Сучасний етап еволюції наукових досліджень нерозривно пов'язаний із глибокою алгоритмізацією досліджень та інтеграцією систем комп'ютерної алгебри (CAS) у процес інженерного проектування. З огляду на високу обчислювальну складність операцій, представниками наукової школи

імплементовано методологію фрагментації програмного коду, де точний рендеринг складних тривимірних поверхонь забезпечується коректним підключенням спеціалізованих графічних бібліотек. Чисельне розв'язання обернених задач кінематики успішно реалізується через матричні операції в MatLab із подальшою 3D-візуалізацією в AutoCAD.

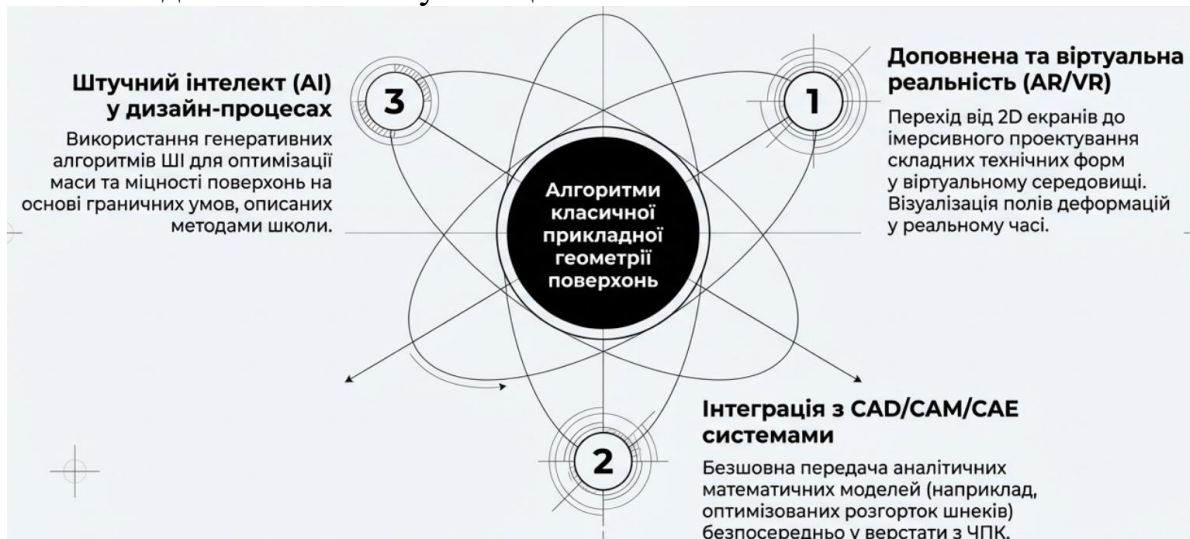


Рис. 5. Цифрові тренди та майбутнє прикладної геометрії

Напрямок майбутніх досліджень школи орієнтований на інтеграцію класичного математичного апарату з новітніми цифровими трендами (рис. 5). Одним із пріоритетів стає впровадження штучного інтелекту (AI) у дизайн-процеси, що дозволяє автоматизувати оптимізацію характеристик поверхонь. Іншим вагомим кроком є перехід до проектування складних технічних форм у середовищах доповненої та віртуальної реальності (AR/VR), що забезпечує візуалізацію деформацій робочих органів у режимі реального часу. Завершальним етапом цифрової трансформації є безшовна інтеграція аналітичних алгоритмів із сучасними CAD/CAM/CAE системами для прямої передачі моделей у системи керування верстатами.

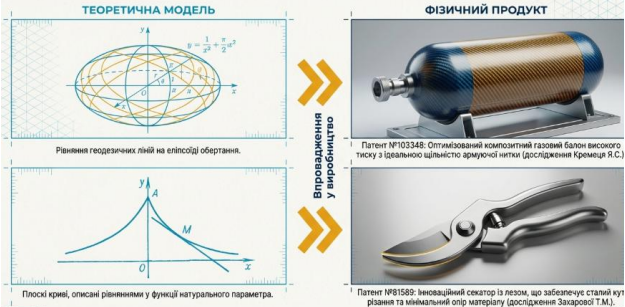
Підсумовуючи результати діяльності більше, ніж за чверть століття (2000–2026 рр.), варто констатувати, що наукова школа здійснила вплив на розвиток прикладної геометрії в Україні, органічно поєднавши її з кінематикою та опором матеріалів (рис. 6).



**Мистецтво ізометричних сіток:  
Конформне відображення.**



**Від теорії до металу: Інженерні рішення.**



**Синергія науки: Конвергенція методів в одній машині.**



Рис. 6. Інфографіка отриманих результатів наукових досліджень



Рис. 7. Статистика та топологія наукових робіт

Трансформація абстрактних математичних моделей у промислові інновації для аграрного та машинобудівного секторів беззаперечно доводить їхню високу прикладну цінність. Здобутком школи є формування потужного інтелектуального ядра – успішна підготовка 17 кандидатів та 1 доктора технічних наук (рис. 7), які продовжують здійснювати наукові дослідження в напрямку, обраному науковою школою Обухової В. С.

УДК 514.18

**ПЕРЕПАРАМЕТРИЗАЦІЯ ПОВЕРХОНЬ****Несвідомін В.М.***Національний університет біоресурсів і природокористування України*

У сучасних системах автоматизованого проектування більшість просторових об'єктів моделюються за допомогою параметричних поверхонь, заданих вектор-функцією  $r(u, v)$  двох незалежних  $u, v$ -змінних. Координатна  $u, v$ -сітка на поверхні визначається її параметричним рівнянням  $r(u, v)$  і в найпростіших випадках складається із прямих ліній та кіл. Проте, при вирішенні прикладних інженерних задач (намотування, генерація адаптивних сіток) виникає потреба у формуванні специфічних координатних ліній на одній тій же поверхні. Дослідимо спосіб алгебраїчної перепараметризації поверхні  $r(u, v)$  через цілеспрямовану деформацію плоского домену (області визначення  $u \times v$ ).

Нехай маємо регулярну поверхню  $r(u, v) = [x(u, v), y(u, v), z(u, v)]$ , визначену на прямокутному домені  $D = [u_{min}, u_{max}] \times [v_{min}, v_{max}]$ . Створимо проміжний двовимірний простір параметрів  $(\tilde{u}, \tilde{v})$  та відображення  $f: \tilde{D} \rightarrow D$ , що задається функціями переходу:

$$u = f1(\tilde{u}, \tilde{v}), v = f2(\tilde{u}, \tilde{v}). \quad (1)$$

Тоді нова параметризація поверхні є композицією відображень:

$$r(\tilde{u}, \tilde{v}) = r(f1(\tilde{u}, \tilde{v}), f2(\tilde{u}, \tilde{v})). \quad (2)$$

Обов'язковою вимогою до функцій  $f1$  та  $f2$  є відсутність топологічних вироджень (складок). Аналітично цей випадок визначається через визначник матриці Якобі в усіх точках домену, який не повинен рівнятися нулю.

Аналітичну реалізацію даного методу розглянемо на прикладі кругового циліндра. Класичне рівняння циліндра радіуса  $a$ , де параметр  $u$  відповідає за висоту, а  $v$  — за азимутальний кут, має вигляд:

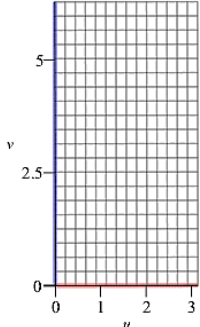
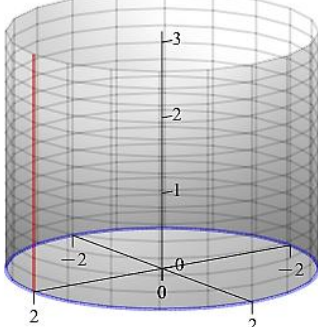
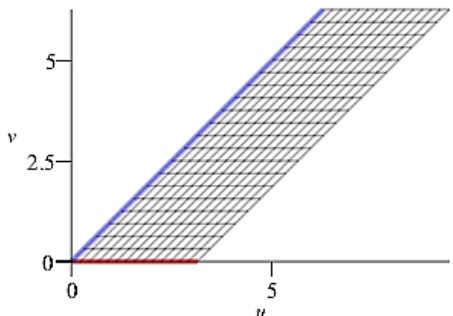
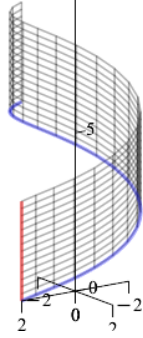
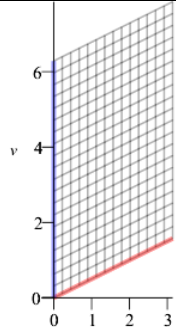
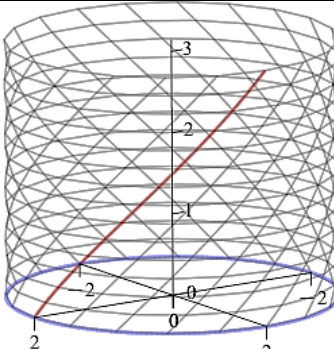
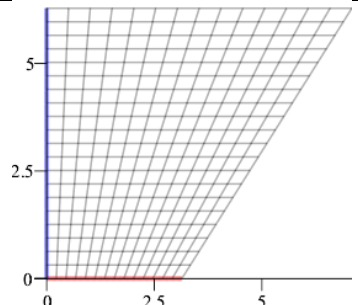
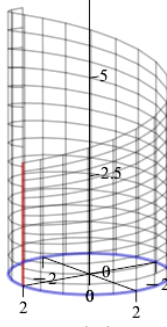
$$r(u, v) = [a \cos(v), a \sin(v), u]. \quad (3)$$

Застосовуючи різні закони відображення домену  $f1, f2$ , ми отримуємо циліндричну поверхню радіуса  $a$ , але з різною формою  $u, v$  — координатних ліній на її поверхні. Для візуального контролю топологічних перетворень від плоскої  $f(u, v)$  — сітки до просторової  $r(u, v)$  — структури виділимо координатну лінію  $u = const$  синім кольором, а лінію  $v = const$  — червоним.

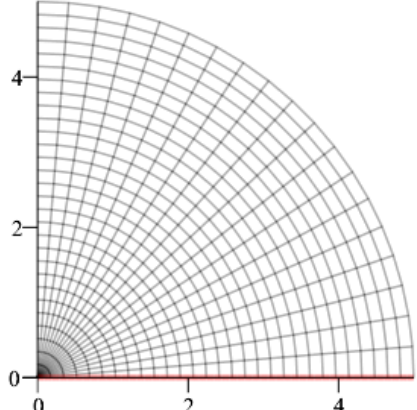
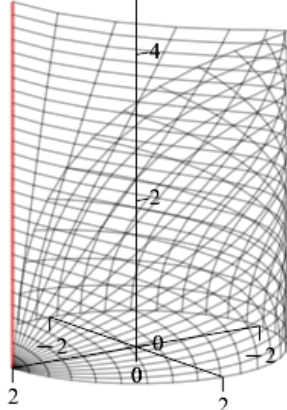
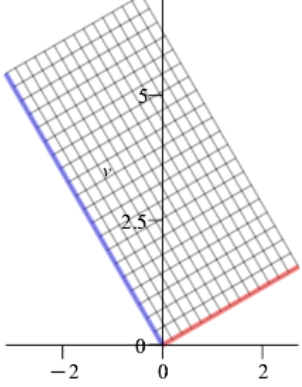
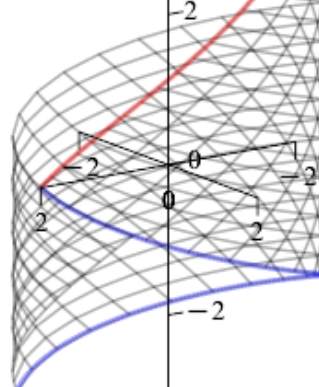
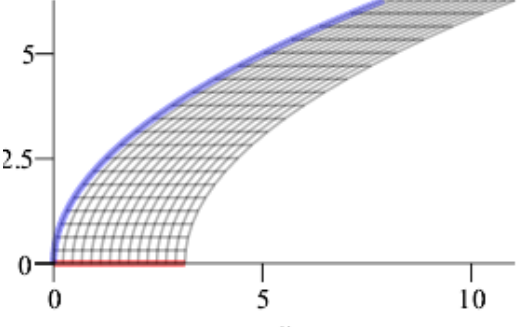
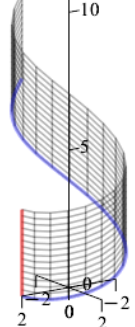
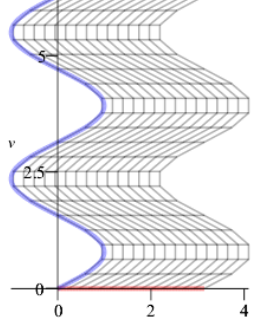
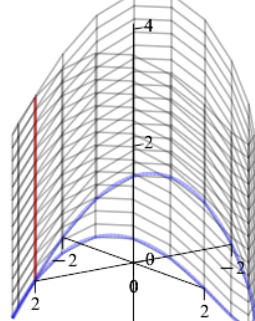
В табл.1 рядок 1 наведено зображення плоскої сітки у вигляді прямокутника з вершинами  $[0,0], [\pi, 2\pi]$  по діагоналі. Вершини цієї плоскої сітки відображаються у вершини циліндра: 1) прямі лінії  $u = const$ , які паралельні осі  $Ox$  відображаються в прямолінійні твірні (червоний колір); 2) прямі лінії  $v = const$ , які паралельні осі  $Oy$  відображаються в кола на циліндрі (синій колір).

Здійснимо перетворення прямокутної плоскої сітки  $[u, v]$  в паралелограм  $[u + k v, v]$ , де  $k$ -коефіцієнт нахилу вертикальних прямих (рядок 2 табл.1). В цьому випадку, прямі паралельні осі  $Ox$  відображаються в прямолінійні твірні циліндра, а ось нахилені прямі відображаються у гвинтові на циліндрі.

Таблиця 1. Вплив форми  $(u, v)$ -сітки на координатні лінії циліндра

N	Область визначення $[u, v]$	Координатні $u, v$ -лінії на циліндрі $r(u, v) = [x(u, v), y(u, v), z(u, v)]$
1	 <p>прямокутна сітка <math>[u, v], u = 0 \dots \pi, v = 0 \dots \pi</math></p>	 <p>ортогональна сітка із прямих та кіл <math>[a \cos(v), a \sin(v), u]</math></p>
2	 <p>косокутна сітка <math>[u + k v, v], u = 0 \dots \pi, v = 0 \dots 2\pi</math></p>	 <p>сітка із прямих та гвинтових ліній <math>[a \cos(v), a \sin(v), u + k v]</math></p>
3	 <p>косокутна сітка <math>[u, v + k u], u = 0 \dots \pi, v = 0 \dots 2\pi</math></p>	 <p>сітка із кіл та гвинтових ліній <math>[a \cos(v + k u), a \sin(v + k u), u]</math></p>
4	 <p><math>[u(1 + k v), v], u = 0 \dots \pi, v = 0 \dots 2\pi</math></p>	 <p><math>[a \cos(v), a \sin(v), u(1 + k v)]</math></p>

Продовження таблиці 1

5	 <p><math>[u \cos(v), u \sin(v)], u = 0 \dots \pi, v = 0 \dots \pi/2</math></p>	 <p><math>[a \cos(u \sin(v)), a \sin(u \sin(v)), u \cos(v)]</math></p>
6	 <p><math>[f1(u, v), f2(u, v)], u = 0 \dots \pi, v = 0 \dots \pi/2</math></p>	 <p><math>[a \cos(f1(u, v)), a \sin(f1(u, v)), f2(u, v)]</math></p>
7	 <p><math>[u + k v^2, v], u = 0 \dots \pi, v = 0 \dots 2\pi</math></p>	 <p><math>[a \cos(v), a \sin(v), u + k v^2]</math></p>
8	 <p><math>[u + k \sin(l v), v], u = 0 \dots \pi, v = 0 \dots 2\pi</math></p>	 <p><math>[a \cos(v), a \sin(v), u + k \sin(l v)]</math></p>

Для всіх цих перепараметризацій циліндр залишається циліндром. Покажемо, що для різних його алгебраїчних перепараметризацій  $r(u, v) = r(f1(u, v), f2(u, v))$  не буде спотворень циліндра як цілісного об'єкта, а лише будуть змінюватися напрямки (топология) координатної сітки на ньому. Базовий спосіб є перевірка рівності для всіх цих параметризацій циліндра радіусу  $a$ :

$$x(u, v)^2 + y(u, v)^2 = a^2. \quad (4)$$

Інший спосіб перевірки ідентичності поверхні є геометричний принцип, що і в ідентифікації просторових кривих. Згідно з основною теоремою теорії кривих, дві просторові лінії є конгруентними (ідентичними), якщо збігаються їхні внутрішні інваріанти — кривина  $k$  та кручення (скрут)  $\tau$ , незалежно від закону руху (параметризації) вздовж них.

Перенесемо цей принцип на двовимірні многовиди (поверхні), у яких роль абсолютних локальних інваріантів відіграють головні кривини  $k1$  та  $k2$ . Перепараметризація поверхні через деформацію домену  $f(u, v)$  є аналогом нанесення нової, викривленої координатної сітки на об'єкт. Локальний базис дотичних векторів змінюється, що закономірно призводить до трансформації коефіцієнтів першої  $E, F, G$  та другої  $L, M, N$  квадратичних форм поверхні, але фізична зігнутість самого об'єкта в кожній його точці залишається незмінною. Обчислення головних кривин як коренів характеристичного рівняння  $\det(II - k \cdot I) = 0$  дає тотожний результат, де:  $I, II$  – матриці 1-ї та 2-ї квадратичних форм;  $k$  - головні кривини  $k1, k2$ .

Для кругового циліндра радіуса  $a$ , незалежно від складності застосованої  $u, v$ -карти (афінне перетворення зсув чи нелінійна деформація), головні кривини в усіх точках поверхні аналітично спрощуються до констант:  $k1 = 0, k2 = 1/a$ .

Так для параметризацій циліндра (1) радіуса  $a$ :

$$r(u, v) = [a \cos(v), a \sin(v), u + k v], \quad (5)$$

$$r(u, v) = [a \cos(v + k u), a \sin(v + k u), u], \quad (6)$$

Рівняння коефіцієнтів  $E, F, G$  1-ї та  $L, M, N$  2-ї квадратичних форм будуть різними, але Гаусова  $K$  та середня  $H$  кривини будуть однакові і рівняються:

$$K = \frac{LN - M^2}{EG - F^2} = 0, \quad H = \frac{EN - 2FM + GL}{2(EG - F^2)} = \frac{1}{2a} \quad (7)$$

Головні кривини поверхні  $k1, k2$  пов'язані з Гаусовою  $K$  та середньою  $H$  кривинами системою рівнянь:

$$\begin{cases} K = k1 \cdot k2, \\ H = (k1 + k2)/2, \end{cases} \quad (8)$$

звідки отримаємо головні кривини  $k1 = 0, k2 = 1/a$ , що підтверджує циліндричність поверхні в кожній її точці.

**Висновок.** Керування топологією координатних ліній на 3D-поверхнях ефективно можна здійснювати шляхом попередньої алгебраїчної деформації плоского 2D-домену. Цей підхід усуває потребу в складному тензорному численні та розв'язанні диференціальних рівнянь, гарантуючи при цьому ідеальну гладкість поверхонь (за умови контролю Якобіана). Розроблений метод легко алгоритмізується заданням виду перетворення над  $u, v$ -доменом.

УДК 514.18

## КОНСТРУЮВАННЯ КАНАЛОПОДІБНИХ ГВИНТОВИХ ПОВЕРХОНЬ ІЗ СМУГ ТОРСІВ

*Пилипака С.Ф., Несвідомін А.В.*

*Національний університет біоресурсів і природокористування України*

Нерозгортні поверхні можна апроксимувати смугами розгортних. При цьому смуги можуть бути як змінної, так і сталої ширини. Якщо нерозгортну поверхню апроксимувати смугою торса вздовж лінії її кривини, то прямолінійні твірні розгортної поверхні будуть перпендикулярними до лінії дотику. Це означає, що лінія дотику є лінією кривини як для нерозгортної поверхні, яку апроксимують, так і для розгортної, якою апроксимують. Це дає можливість відкладати однакові відрізки вздовж прямолінійних твірних торса перпендикулярно до лінії дотику. Таким чином утворюється криволінійна смуга сталої ширини, обмежена еквідистантними кривими. Не всякі поверхні допускають апроксимацію смугами сталої ширини. В праці [1] розглянута апроксимація поверхні кулі неперервною смугою сталої ширини. Таку апроксимацію допускають трубчасті поверхні без ліній самоперетину.

Якщо віссю трубчастої поверхні є гвинтова лінія, то її параметричні рівняння мають наступний вигляд:

$$\begin{aligned} X &= a \cos \alpha - \rho \left( \cos \alpha \cos v - \frac{b \sin v}{\sqrt{a^2 + b^2}} \sin \alpha \right); \\ Y &= a \sin \alpha - \rho \left( \sin \alpha \cos v + \frac{b \sin v}{\sqrt{a^2 + b^2}} \cos \alpha \right); \\ Z &= b \alpha + \frac{a \rho \sin v}{\sqrt{a^2 + b^2}}, \end{aligned} \quad (1)$$

де  $\alpha$  і  $v$  – незалежні змінні поверхні, при цьому  $\alpha$  – кут повороту точки навколо осі гвинтової лінії при її русі по ній;  $v$  – кут повороту точки навколо центру твірного кола при її русі по ньому. До рівнянь (1) входять сталі величини:  $a$  – радіус циліндра, на якому розташована гвинтова лінія,  $b$  – гвинтовий параметр,  $\rho$  – радіус твірного кола.

У поверхні, описаній рівняннями (1) тільки одна сім'я координатних ліній – сім'я кіл – є лініями кривини. Сітка координатних ліній косокутна. Лініями дотику смуг до поверхні буде друга сім'я ліній кривини, яку потрібно знайти. Для їх знаходження потрібно ввести нові змінні замість існуючих:

$$\alpha = \frac{s}{\sqrt{a^2 + b^2}}; \quad v = w - \frac{bs}{a^2 + b^2}, \quad (2)$$

де  $s$  – нова незалежна змінна поверхні – довжина дуги лінії центрів;  $w$  – друга незалежна змінна – теж кут, який змінюється в межах  $w=0 \dots 2\pi$ , що забезпечує замкнені твірні кола трубчастої поверхні.

На рис. 1,а побудований один виток поверхні за рівняннями (1), а на рис. 1,б – при переході до нових змінних за формулами (2). В першому випадку сітка координатних ліній не ортогональна, а в другому ортогональна, тому що обидві сім'ї координатних ліній є лініями кривини. Якщо в другій залежності (2) прийняти  $w=const$ , то на поверхні виділиться лінія кривини другої сім'ї. Порівнюючи рис. 1, а і рис. 1,б, бачимо що в другому випадку лінія кривини (тобто лінія дотику), є однією із координатних ліній.

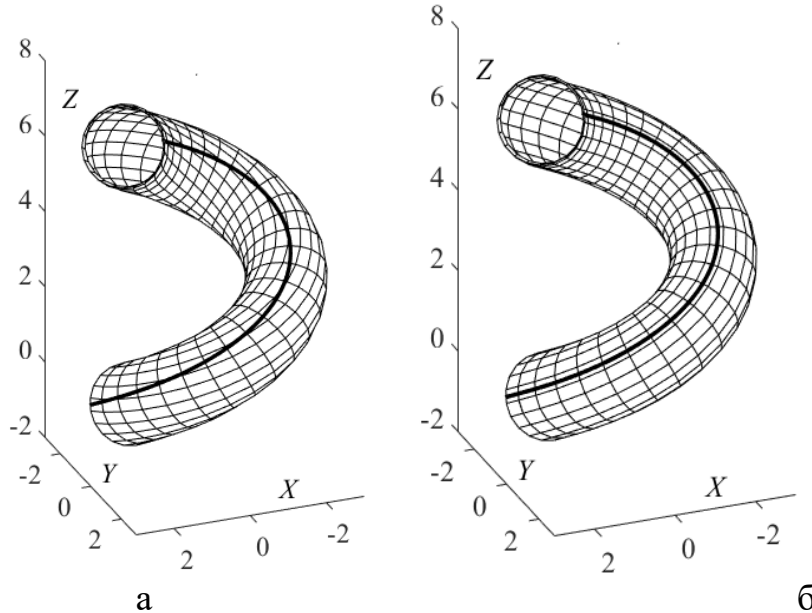
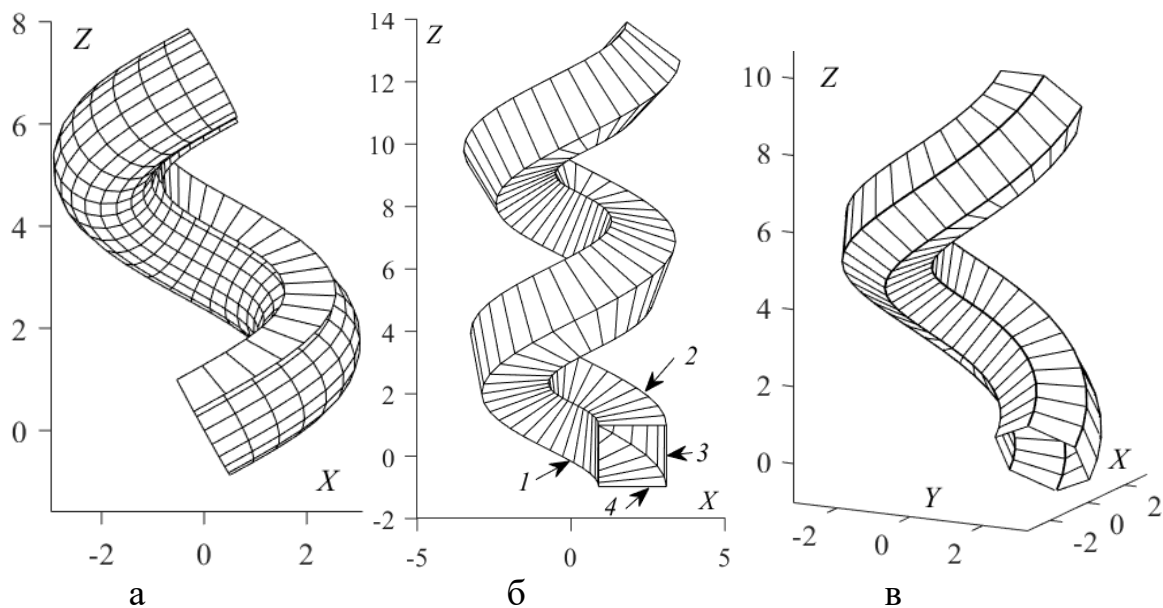


Рис. 1. Трубчаста гвинтова поверхня при  $a=2$ ;  $b=1,1$ ;  $\rho=1$  з виділеною лінією кривини на ній: а) сім'єю ліній кривини є тільки каркас твірних кіл; б) обидві сім'ї координатних ліній є лініями кривини

На рис. 2,а вздовж лінії кривини побудована смуга розгортної поверхні. Таких смуг може бути декілька, починаючи із трьох. Щоб апроксимувати поверхню смугами, потрібно лінії дотику розташувати на поверхні рівномірно. Наприклад, на рис. 2,б таких смуг чотири, а на рис. 2,в – шість. Смуги вздовж лінії дотику будувалися за умови, що вона є лінією кривини, а нормаль до поверхні в кожній точці кривої задає дотичну площину, в якій розташована прямолінійна твірна.

Було знайдено розгортку кожної смуги для складеної поверхні, зображеної на рис. 2,б. За основу було взято положення диференціальної геометрії про те, що геодезична кривина кривої не змінюється при згинанні поверхні. За знайденою геодезичною кривою будувалася плоска крива, яка є лінією дотику на розгортці. Після цього на однаковій відстані в обидві сторони від кривої будувалися еквідистантні криві, які обмежують смугу. Ширина смуги визначалася таким чином, щоб на поверхні обмежувальні лінії сусідніх смуг збігалися. Прямолінійні твірні на розгортці, перпендикулярні лінії дотику, є лініями згинання смуги.

Рис. 2. Поверхні, побудовані при  $a=2$ ;  $b=1$ ;  $\rho=1$ 

Також було виготовлено натурну модель, яка підтвердила правильність розрахунків (рис. 4). До неї не долучили однієї смуги, оскільки не було б видно прямолінійних твірних, вздовж яких здійснюється згинання смуг, і які розташовані всередині апроксимованої поверхні.

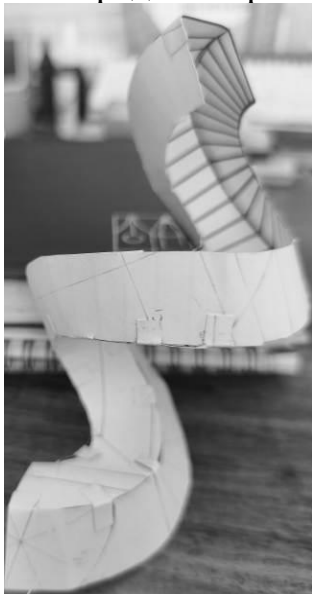


Рис. 4. Натурна модель, виготовлена з'єднанням розгортки окремих смуг

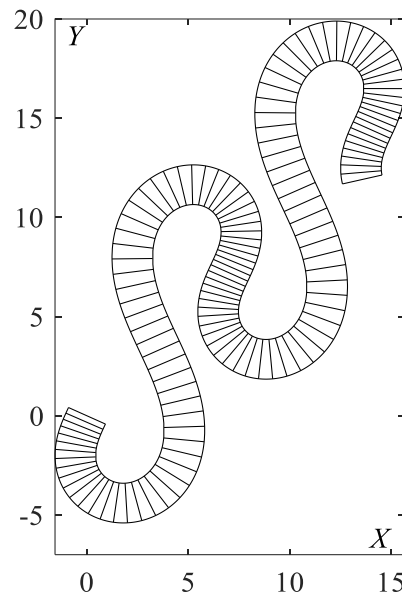


Рис. 5. Періодичність контурів розгортки смуги апроксимованої поверхні при зростанні числа її витків

### Література

1. A technique for approximating a tubular helical surface with strips of toruses. Nesvidomin, A., Pylypaka, S., Nesvidomin, V., Babka, V., Shoman, O., Savoiskyi, O., Pylypaka, T., Lokhonia, M., Semirnenko, S., Borodai, Y. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6(1 (138), 64–70. – Режим доступу: <https://www.scopus.com/pages/publications/105031529334?origin=resultslist>

УДК 514.18

## ПЕРЕХІДНІ КРИВІ ДЛЯ ПЛАВНОГО З'ЄДНАННЯ ЛІНІЙ ІЗ ЗАДАНИМИ КРИВИНАМИ НА ЇХ КІНЦЯХ

*Несвідомін А.В.*

*Національний університет біоресурсів і природокористування України*

У комп'ютерному проектуванні (наприклад, при проектуванні лез турбін, автомобільних кузовів або верстатних траєкторій) неперервність є обов'язковою умовою для естетичної привабливості виробів та якості фрезерування. З підвищенням точності виконуваних робіт зростають вимоги до з'єднань кривих. Відомою кривою, яка з'єднує прямолінійну і криволінійну ділянки за другим порядком гладкості, є клотоїда. В точці з'єднання ліній дотична спільна і кривини їх кінців мають однакове значення. Однак із розвитком високоточних технологій цього може бути недостатньо, оскільки кривина клотоїди змінюється за лінійним законом. Якщо її дуга з'єднує дві дуги кола із сталими кривинами, то графік кривини такої складеної лінії є ламаною лінією, хоча сама крива має другий порядок гладкості у точках з'єднання.

В зв'язку із цим доцільно ламану лінію графіка кривини замінити плавною кривою. Графік кривини описується кубічним поліномом із заданими значеннями кривин  $k_A$  і  $k_B$  в точках  $A$  і  $B$ , тобто на кінцях дуги перехідної кривої довжиною  $S$ :

$$k = k_A + \frac{3(k_B - k_A)}{S^2} s^2 - \frac{2(k_B - k_A)}{S^3} s^3. \quad (1)$$

По суті, рівняння (1) є натуральним рівнянням  $k=k(s)$  кривої. Воно забезпечує плавну зміну графіка кривини із горизонтальними дотичними на його кінцях. Саму криву потрібно будувати за допомогою чисельних методів інтегрування, як і клотоїду. Якщо задати кривини на кінцях кривої із протилежними знаками, то вона матиме точку перегину, в якій кривина дорівнює нулю. На рис. 1,а побудована така перехідна крива із однаковим абсолютним значенням кривини на кінцях, а на рис. 1,б – графік зміни її кривини.

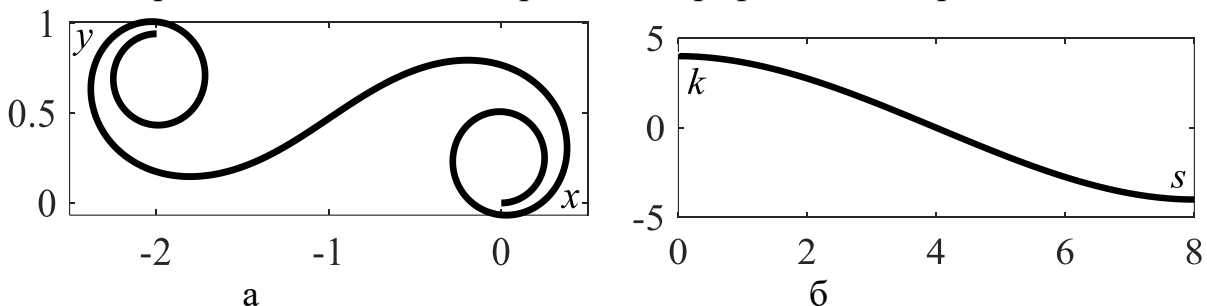


Рис. 1. Графічні ілюстрації до перехідної кривої з кривинами на кінцях дуги  $k_A=4$ ,  $k_B=-4$  і довжиною  $S=8$

Крива подібна до клотоїди, але не є нею. У клотоїди графік залежності  $k=k(s)$  є лінійним, а в даному випадку (рис. 1,б) – криволінійним плавним.

УДК 514.18

## НЕПЕРЕРВНЕ ЗГИНАННЯ ВІДКРИТОГО ГЕЛІКОЇДА ДЛЯ ПОБУДОВИ РОЗГОРТКИ

*Хропост<sup>1</sup> В.І., Пилипака<sup>2</sup> С.Ф., Кресан<sup>1</sup> Т.А.*

<sup>1</sup> ВП НУБіП України «Ніжинський агротехнічний інститут»

<sup>2</sup> Національний університет біоресурсів і природокористування України

Лінійчаті нерозгортні поверхні можуть зазнавати неперервного згинання без втрати прямолінійності твірних, зберігаючи при цьому свою лінійчатість. У роботі цей підхід застосовано до прямого відкритого гелікоїда з метою побудови його наближеної розгортки. Для порівняння розглянуто гвинтовий коноїд (шнек), який є лінійчатим лише в початковому стані.

Прямий закритий гелікоїд (шнек), широко використовуваний у техніці, утворюється гвинтовим переміщенням відрізка з перетином осі. Відкритий гелікоїд формується аналогічно, однак його твірні не перетинають вісь і розташовані на сталій відстані від неї. У міру зменшення цієї відстані геометрична відмінність між відкритим і закритим гелікоїдами зменшується.

Найточніше відтворення витка відкритого гелікоїда досягається штампуванням, тоді як у малосерійному виробництві застосовують формування поверхні шляхом розтягування зварених плоских кілець уздовж вала, що потребує попереднього визначення їхніх розмірів.

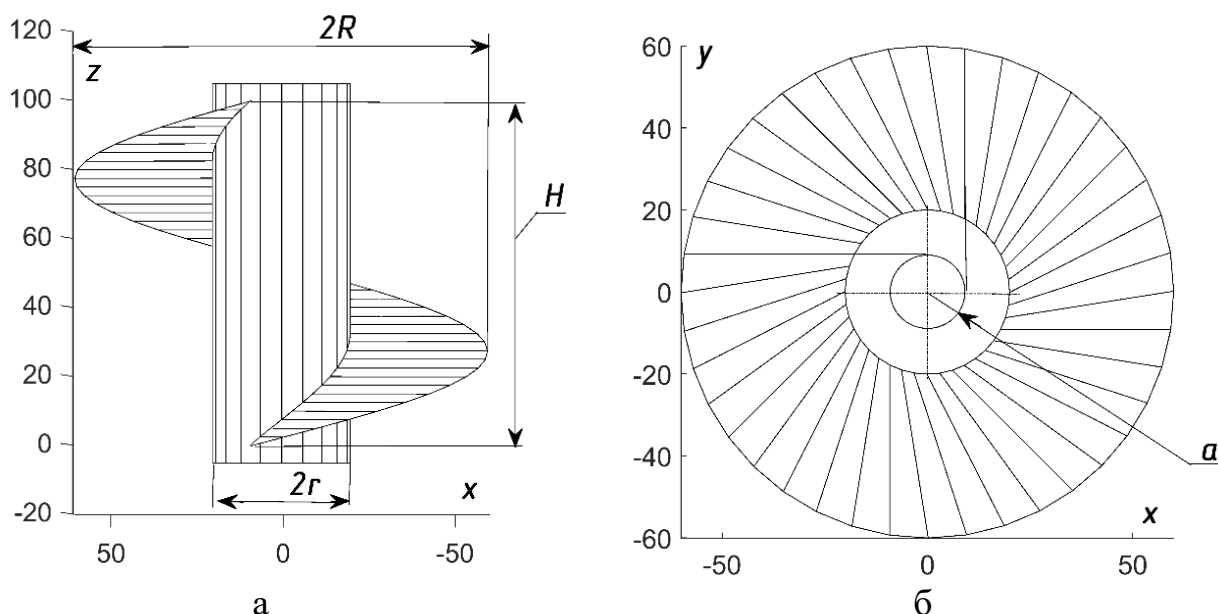


Рис. 1. Проекції витка прямого відкритого гелікоїда: а) фронтальна проекція; б) горизонтальна проекція

Для побудови розгортки шнека як однієї з найбільш поширених у техніці поверхонь наявні відповідні довідкові матеріали. Водночас для відкритого гелікоїда такі відомості відсутні, тому наближену розгортку доцільно визначати

з використанням положень диференціальної геометрії, зокрема відомого факту про можливість неперервного згинання будь-якої гвинтової поверхні в поверхню обертання. У зв'язку з цим виток відкритого гелікоїда доцільно зігнути у відповідний відсік поверхні обертання, який може бути апроксимований конусом. Для конічної поверхні, як розгортної, існує точна розгортка, що в даному випадку слугуватиме наближеною розгорткою витка відкритого гелікоїда.

Нижче наведені параметричні рівняння неперервного згинання поверхні із, коли початковим станом є поверхня прямого відкритого гелікоїда, а кінцевим – поверхня однопорожнинного гіперболоїда обертання:

$$\begin{aligned}
 X &= \frac{a \cos p\gamma \cos(p\gamma - \gamma)}{\cos \gamma} \cos\left(\frac{\cos \gamma}{a \cos(p\gamma - \gamma)} s\right) - \\
 &\quad - u \cos(p\gamma - \gamma) \sin\left(\frac{\cos \gamma}{a \cos(p\gamma - \gamma)} s\right); \\
 Y &= \frac{a \cos p\gamma \cos(p\gamma - \gamma)}{\cos \gamma} \sin\left(\frac{\cos \gamma}{a \cos(p\gamma - \gamma)} s\right) + \\
 &\quad + u \cos(p\gamma - \gamma) \cos\left(\frac{\cos \gamma}{a \cos(p\gamma - \gamma)} s\right); \\
 Z &= s \sin p\gamma + u \sin(p\gamma - \gamma).
 \end{aligned} \tag{1}$$

У рівняннях (1) як незалежні змінні використано  $s$ , що відповідає довжині дуги гвинтової лінії, розташованої на циліндрі радіуса  $a$ , а також  $u$  — довжину прямолінійної твірної поверхні, відлік якої ведеться від зазначеної гвинтової лінії. Інші параметри є сталими:  $\gamma$  визначає кут підйому цієї гвинтової лінії, а  $p$  є параметром згинання, який змінюється в інтервалі від 1, що відповідає початковому стану поверхні, до 0 — її кінцевому стану. Для вибору необхідного відсіку поверхні, що підлягає згинанню, слід задати значення сталих параметрів, а також межі зміни незалежних змінних  $s$  і  $u$ .

### Література

1. Kresan T., Pylypaka, S., Ruzhylo, Z., Rogovskii, I., Trokhaniak, O. (2021) Rolling of a single-cavity hyperboloid of rotation on a helicoid on which it bends. *Engineering Review*, 41(3). P. 106 - 114.
2. Pylypaka, S., Hropost, V., Kresan, T., Volina, T., Zabolotnii, O. (2023). Construction of a flat workpiece for manufacturing a turn of the right helicoid. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(1 (122)), 6–11.
3. Kresan, T., Pylypaka, S., Ruzhylo, Z., Rogovskii, I., Trokhaniak, O. (2020). Rolling of a single-cavity hyperboloid of rotation on a helicoid on which it bends. *Engineering Review*, 40(2), 106–114.

УДК 514.18

## КРИВІ КОЛЕСА, ОДНЕ З ЯКИХ ОКРЕСЛЕНЕ КОЛОМ ЗІ ЗМІЩЕНИМ ЦЕНТРОМ ОБЕРТАННЯ

*Кресан Т.А.,<sup>1</sup> Пилипака С.Ф.,<sup>2</sup> Хропост В.І., Федорина Т.П.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>ВП НУБіП України «Ніжинський агротехнічний інститут»

<sup>2</sup>Національний університет біоресурсів і природокористування України

В передачах обертального руху як між паралельними осями, так і мимобіжними, а також з такими, що перетинаються, використовуються в ролі центроїд круглі колеса із сталим передавальним числом. Такі передачі є найбільш поширеними в інженерній практиці. Однак є механізми, які потребують передач обертального руху некруглими колесами із змінним передавальним числом. Класичним прикладом таких коліс є два конгруентні еліпси, у яких центри обертання розташовані у фокусах. Якщо взяти кругле колесо, окреслене колом, і за центр обертання взяти точку, зміщену відносно його центра на певну величину, то кругле колесо стає некруглим. Якщо його вважати ведучим, то відшукування контуру веденого колеса і центра обертання потребує спеціальних розрахунків. В такому випадку ведене колесо буде окреслене не колом, а іншою замкненою кривою при умові, що за один повний оберт ведучого колеса ведене теж робить один повний оберт.

За ведуче колесо було взято круг, окреслений колом радіуса  $R=2$  із зміщеним центром обертання відносно центра кола на величину  $a$ . На рис. 1 побудовано пару коліс при  $a=1$ . При цьому міжцентрова відстань становить  $L=4,23$ . Центри обертання коліс знаходяться в початку координат.

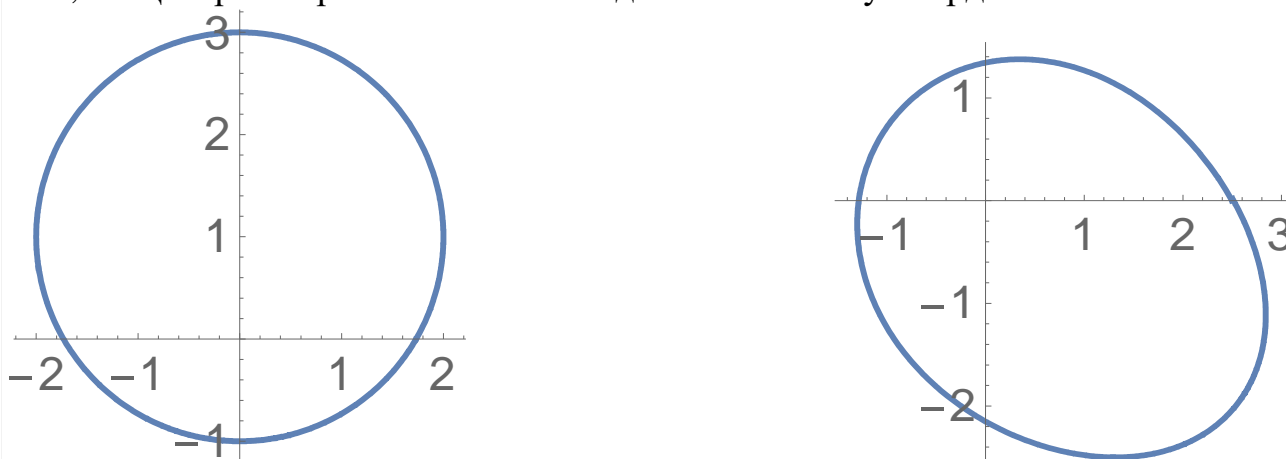


Рис.1. Некруглі колеса із зміщеним центром обертання ведучого колеса, окресленого колом радіуса  $R=2$ , на  $a=1$  відносно центра кола

Слід зазначити, що при  $a=0$  обидва колеса стають круглими і для них міжцентрова відстань  $L=4$ . По мірі збільшення величини зміщення  $a$  міжцентрова відстань теж зростає. Однак це зміщення має певну межу: воно має бути меншим радіуса  $R$ . Для знаходження контуру веденого колеса при заданому зміщенні  $a$  потрібно застосовувати чисельне інтегрування.

УДК 514.182: 514.185.2:519.873

## МОДЕЛЬ НАДІЙНОСТІ ОДНОКІЛЬЦЕВОЇ МЕРЕЖІ З УРАХУВАННЯМ ДЕГРАДАЦІЇ ЕЛЕМЕНТІВ

Усенко В.Г.

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

У задачах аналізу інженерних мереж кільцева топологія розглядається як одна з фундаментальних і найбільш ефективних форм структурного резервування, оскільки замикання контуру створює природний механізм дублювання шляхів передавання потоку, енергії або інформації. Ця топологічна організація забезпечує альтернативні маршрути між вузлами системи, що суттєво підвищує її живучість, стійкість до відмов окремих елементів та здатність зберігати функціональність навіть за умов часткових пошкоджень. У практичних застосуваннях це означає, що при виході з ладу однієї ділянки потік може бути перенаправлений по іншому шляху без повної втрати зв'язності системи.

Для однокільцевої мережі існує важлива топологічна властивість, яка значно спрощує аналітичний опис її надійності. Відмова одного елемента не призводить до розриву структури, оскільки зберігається альтернативний шлях, тоді як відмова двох і більше ребер уже руйнує замкненість контуру та призводить до втрати зв'язності. Ця топологічна умова дозволяє перейти від складного комбінаторного аналізу можливих станів мережі до компактного та визначеного аналітичного представлення.

Нехай кільцева мережа складається з  $p$  ребер, кожне з яких характеризується ймовірністю безвідмовної роботи  $r_i$ . Тоді структурна надійність мережі визначається як

$$R_p = \prod_{i=1}^p r_i + \sum_{i=1}^p (1 - r_i) \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^p r_j \quad (1)$$

Цей вираз враховує два допустимі стани: відсутність відмов та наявність однієї відмови, що повністю відповідає топологічному критерію працездатності циклу. Для врахування деградації елементів параметри надійності є функціями часу:

$$r_i = r_i(t) \quad (2)$$

Для найпростішого випадку експоненціальної деградації маємо

$$r_i(t) = e^{-\lambda_i t} \quad (3)$$

де  $\lambda_i$  — інтенсивність відмов або деградації  $i$ -го елемента.

Тоді надійність мережі набуває вигляду

$$R_p(t) = \prod_{i=1}^p e^{-\lambda_i t} + \sum_{i=1}^p (1 - e^{-\lambda_i t}) \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^p e^{-\lambda_j t} \quad (4)$$

Інтегральна оцінка надійності на часовому інтервалі  $[0, T]$  використовує середню надійність:

$$\bar{R}(T) = \frac{1}{T} \int_0^T R_p(t) dt \quad (5)$$

Важливим аспектом аналізу є визначення критичності окремих елементів мережі. Для цього служить показник чутливості:

$$S_i(t) = \frac{\partial R_p(t)}{\partial r_i(t)} \quad (6)$$

який характеризує вплив зміни надійності  $i$ -го ребра на загальну надійність системи. Такий підхід узгоджується із сучасними тенденціями аналізу мереж, де значна увага приділяється виявленню критичних компонентів і оптимізації топології [1–3].

Ця модель дозволяє перейти від статичного аналізу до динамічного прогнозування надійності, а також створює основу для подальшого дослідження багатокільцевих і сітчастих структур. Зокрема, результати можуть бути використані для оцінювання живучості водопровідних, енергетичних і телекомунікаційних мереж, де кільцеві топології є типовими [1–3]. Поєднання аналітичної моделі для циклу з урахуванням часової деградації та оцінкою критичності елементів формує універсальний інструмент для дослідження надійності мережевих структур.

### Література

1. Bistouni, F., Jahanshahi, M. A novel method for calculating the reliability of Ethernet ring mesh networks. *Reliability Engineering & System Safety*, 167, 362–375, 2017. DOI: 10.1016/j.ress.2017.06.016
2. Bistouni, F., Jahanshahi, M. Reliability Analysis of Ethernet Ring Mesh Networks. *IEEE Transactions on Reliability*, 2017. DOI: 10.1109/TR.2017.2738659
3. Jahanshahi, M., Bistouni, F. Reliable networking in Ethernet ring mesh networks using regular topologies. *Telecommunication Systems*, 72, 199–220, 2019. DOI: 10.1007/s11235-019-00566-8

УДК 514.8

## СТРУКТУРИЗАЦІЯ ДАНИХ У НАБОРАХ ПРАВИЛЬНИХ БАГАТОГРАННИКІВ

*Морозова М.Ю., Сидоренко О.С.*

*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»*

На сучасному етапі розвитку комп'ютерної математики зростає необхідність стандартизованих описів об'єктів в геометричних наборах даних. Одними з основних структур, що використовуються у таких наборах, є правильні багатогранники, що мають прикладне значення у інженерії, архітектурі, матеріалознавстві та інших галузях. У роботі розглядаються відкриті набори даних: Canonical Polyhedra, Off Polyhedra, Netlib Polyhedra, у яких представлено різні підходи до організації геометричної інформації щодо правильних багатогранників. Важливість аналізу відповідних наборів полягає у їхньому подальшому практичному застосуванні, зокрема для оптимізації процесів візуалізації правильних багатогранників або більш складних структур, основою яких вони є.

Незважаючи на відмінності у форматах, розглянуті набори даних базуються на єдиному принципі: описах правильних багатогранників у тривимірному просторі через множину вершин і множину граней, заданих індексами цих вершин. В загальному розумінні такий підхід відповідає класичному поданню правильного багатогранника як геометричного об'єкта, що складається з плоских багатокутників, з'єднаних ребрами [1]. В наведених наборах даних наявні п'ять типів правильних багатогранників, а саме: тетраедр, гексаедр, октаедр, додекаедр, ікосаедр [1]. Не дивлячись на різне координатне представлення, для однакових багатогранників у всіх наборах співпадають дані щодо кількості вершин, ребер і граней, тобто ці характеристики є геометричними інваріантами. Це означає, що існує можливість порівняльного аналізу і оцінки рівня структурованості правильних багатогранників в усіх розглянутих наборах.

З точки зору аналізу даних, геометричні набори можуть бути визначені як багатовимірні масиви ознак. Так правильні багатогранники здебільшого описуються сукупністю певних характеристик, до якої можуть входити не лише стандартні інваріанти (кількість вершин, ребер, граней), але і додаткові властивості (вид об'єкта, групу симетрії тощо). Це дозволяє застосовувати до геометричних наборів даних методи статистичного аналізу, наприклад, встановлювати структурні розподіли і кореляції. Оскільки для правильних багатогранників є допустимим представлення у вигляді графа, де вершини відповідають вузлам, а ребра — зв'язкам, це відкриває можливість адаптації графових алгоритмів для їхнього дослідження [2]. Це є ефективним на добре структурованих наборах для вирішення задач класифікації багатогранників чи групування за певними ознаками.

Однією з основних проблем сучасних геометричних наборів, у яких представлено правильні багатогранники, є відсутність єдиної стандартизованої

системи представлення даних, які отримано з різних джерел. Для збільшення рівня організованості даних і підвищення кількості класів задач, що розв'язуються за допомогою таких наборів, можуть застосовуватися окремі підходи:

1. Уніфікація форматів. JSON дозволяє подавати інформацію за принципом вкладеності і зберігати метадані про об'єкт, що робить його придатним для комплексного представлення багатогранних структур [3]. Метаданими у геометричних наборах можуть виступати, наприклад, назва багатогранника, група симетрії, вид граней, конфігурація вершини тощо. Оскільки багатогранники є просторовими об'єктами, інформацію про них не є доцільним подавати як табличні рядки. Через це формати OFF чи CSV, що широко використовуються у сучасних геометричних наборах даних, можуть бути незручними для подальшого аналізу і потребувати більшого часу обробки дослідником.

2. Урізноманітнення характеристик. Такими можуть бути, наприклад, площа або об'єм правильного багатогранника, що призводитиме до збільшення кількості контекстів, у яких ці структури можуть бути розглянуті.

3. Додавання графових даних. Збереження багатогранників не лише у вигляді геометричних об'єктів, але і у вигляді графових структур (таких як, наприклад, матриці суміжності), може потенційно дозволити застосовувати до них більшу кількість алгоритмів машинного навчання і, відповідно, збільшить кількість завдань, що можуть бути вирішені за допомогою конкретного набору.

Таким чином, розглянуті геометричні набори дозволяють дійти до висновку, що сучасний підхід в організації даних для правильних багатогранників базується на їхній структуризації за інваріантами (вершинами, ребрами, гранями). На сучасному етапі розвитку комп'ютерних наук це може суттєво обмежувати кількість алгоритмів, які можуть бути застосовані для аналізу таких наборів. Дотримання єдиного цифрового формату представлення даних, додавання більшої кількості обчислених характеристик і застосування графових методів подання інформації у перспективі може підвищити ефективність вивчення правильних багатогранних структур і розширити кількість пов'язаних з ними прикладних завдань.

### **Література**

1. Coxeter H.S.M. Regular polytopes. New York : Dover Publications, 1973. 321 p.
2. Harris J. M., Hirst J. L., Mossinghoff M. J. Combinatorics and graph theory. Vol. 2. New York : Springer, 2008. 412 p.
3. Bourhis P., Reutter J. L., Suarez F., Vrgoc D. JSON: data model, query languages and schema specification. Proceedings of the 36th ACM SIGMOD-SIGACT-SIGAI Symposium on Principles of Database Systems (PODS 2017), Chicago, IL, USA, May 14–19, 2017. New York : ACM, 2017. P. 123–135.

УДК 514.18

## МОДЕЛЮВАННЯ ТРАНСМІСІЙНИХ ТЕПЛОВТРАТ В ХОДІ АРХІТЕКТУРНОГО ПРОЄКТУВАННЯ ПРИ ОПТИМІЗАЦІЇ ПРОПОРЦІЙ ЗЕЛЕНИХ БУДІВЕЛЬ

*Мартинюк В.Л., Мартинюк О.Л., Поляк Ю.Ю.*

*Київський національний університет будівництва і архітектури*

**Вступ.** В умовах сьогодення України проектування енергоефективних зелених будівель перетворюється з перспективної практики на стратегічний пріоритет. Для забезпечення високих експлуатаційних показників фахівці мають виконувати детальне моделювання енергоспоживання, враховуючи всі суттєві фактори експлуатації об'єкта.

Важливе місце тут займає аналіз трансмісійних тепловтрат при вдосконаленні архітектурних рішень. Це передбачає кількісну оцінку ефективності варіантів термозахисту, аналіз впливу кожного конструктивного елемента — від матеріалів стін до властивостей скління, а також визначення оптимального співвідношення геометричних параметрів та пропорцій огорожувальних конструкцій.

Така системна методологія є обов'язковою умовою створення архітектурних об'єктів, у яких естетика поєднується з максимальною енергетичною ефективністю кожного елемента. Результатом стає формування будівель нового зразка — екологічних, економічно вигідних та комфортних для користувачів, що набуває особливої ваги в контексті сучасних енергетичних викликів.

Аналіз наукових праць з енергоефективності будівель дає змогу виокремити кілька основних напрямів досліджень.

У роботі [1] запропоновано системний підхід до зниження енергоспоживання шляхом оптимізації геометричних параметрів будівель, а також представлено метод моделювання енергоспоживання зелених будівель на стадії проектування з використанням вагових коефіцієнтів. Це дозволяє кількісно оцінювати ефективність теплоізоляції, внесок окремих конструктивних елементів (від матеріалу стін до скління) та раціональність геометричних параметрів.

Автори [2] запровадили концепцію «квазікулі» як оптимальної форми для мінімізації тепловтрат. У дослідженні [3] цю ідею розвинуто у вигляді багатокритеріальної оптимізації форми будівель і товщини теплоізоляції для окремих та блокованих об'єктів.

Роботи [4, 5] присвячено геометричним моделям, що візуалізують зв'язок між тепловим балансом та архітектурними параметрами; вони реалізовані у спеціалізованому ПЗ для архітектурного проектування. У дослідженні [6] запропоновано методику оптимізації багатопверхових будівель з урахуванням форми та кольору фасадів через вагові коефіцієнти. Однак поза увагою залишилася комплексна взаємодія конфігурації споруди, утеплення та параметрів віконних систем.

Окремий напрям становлять роботи [7, 8], присвячені системному аналізу огорожувальних конструкцій, оцінці їх теплової надійності та показникам енергоефективності в українському контексті. У галузі архітектурної теплотехніки [9, 10] розроблено моделі тепловологоперенесення та методи аналізу конструкцій. Дослідження [11] вирізняється застосуванням методу миттєво-векторних перетворень для моделювання теплових процесів.

Попри значний науковий доробок, наявні розробки недостатньо враховують комплексну оцінку трансмісійних втрат, обґрунтування вагових коефіцієнтів та підвищення енергоефективності при зміні пропорцій будівель різних конфігурацій у контексті впровадження зелених технологій.

**Мета дослідження.** Визначити аналітичні залежності та створити спосіб та довідкові данні, вагові коефіцієнти для визначення трансмісійних витрат з метою підвищення енергоефективності будівель за рахунок зміни пропорцій будівель для використання в ході архітектурного проектування.

**Основний текст.** Проведено дослідження [1] та визначено заходи що можуть вплинути на зменшення енергетичних витрат на опалення та зменшення трансмісійних тепловтрат через огорожувальні конструкції. На трансмісійні тепловтрати  $\Delta Q_T$  можуть вплинути наступні чинники, що залежать від геометричних параметрів будівель (рис.1).

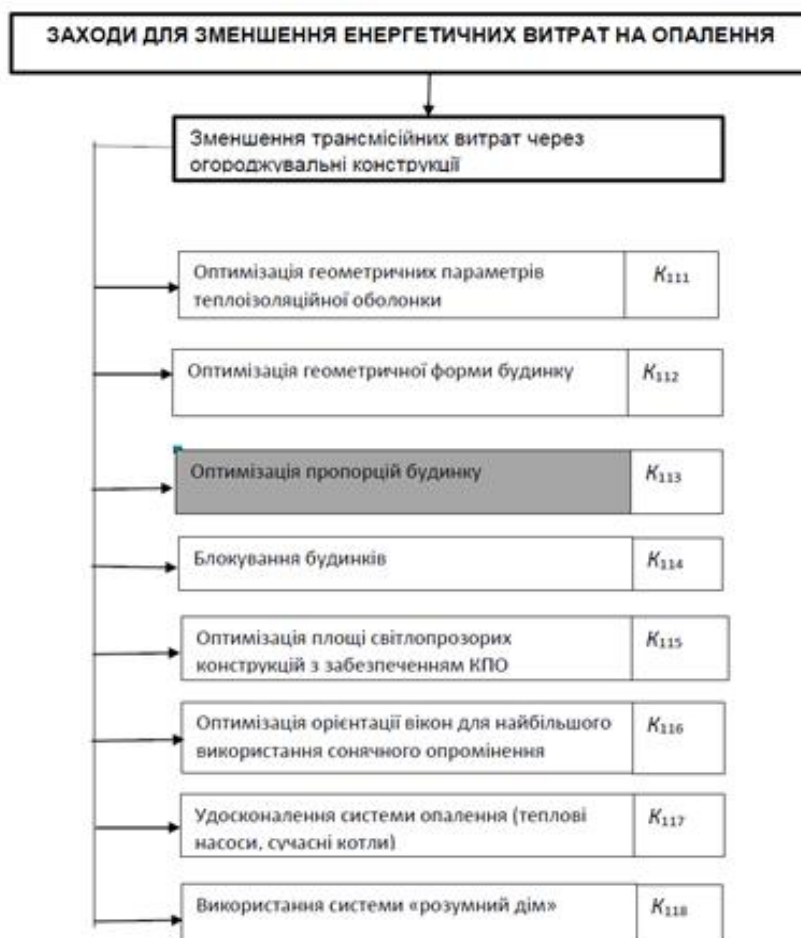


Рис. 1. Заходи для зменшення трансмісійних витрат будівель

Це оптимізація параметрів теплоізоляційної оболонки будівель, оптимізація форми будівель, оптимізація пропорцій будівель, блокування будівель та інше.

Вплив кожного заходу з підвищення енергоефективності будівель та зменшення тепловтрат характеризується ваговим коефіцієнтом впливу.

Ключову роль у цьому процесі відіграє оцінка трансмісійних втрат тепла під час оптимізації архітектурних рішень, зміні пропорцій будівлі.

Ваговий коефіцієнт  $K_{113}$  показує яку частину будуть становити трансмісійні тепловтрати  $\Delta Q_{\text{тр}}$  від існуючих  $Q_{\text{тр}}$  при змінні пропорцій будівлі, та дозволяє точніше прогнозувати енергоспоживання, оптимізувати пропорції будинку, оцінювати ефективність після енергетичної модернізації в ході архітектурного проектування.

Проведено дослідження та визначено аналітичні залежності для розрахунку коефіцієнту впливу  $K_{113}$  (скорочення трансмісійних тепловтрат) при зміні пропорцій будівлі, який визначається за наступною формулою

$$K_{113} = \sum_{i=1}^{i=n} \left( \frac{(S_{\text{г.н.}i} - S_{\text{г.н.н.}i})/R_{\text{г.н.}i} - (S_{\text{г.пр.}i} - S_{\text{г.пр.н.}i})/R_{\text{г.пр.}i}}{\frac{S_{\text{г.н.}i}}{R_{\text{г.н.}i}} + \frac{S_{\text{г.пр.}i}}{R_{\text{г.пр.}i}}} \right) \quad (1)$$

де:

$l..n$  – кількість граней будинку;

$S_{\text{г.н.}}$  – площа непрозорої частини грані;

$S_{\text{г.н.н.}}$  – площа непрозорої частини грані (після зміни пропорцій);

$S_{\text{г.пр.}}$  – площа світлопрозорої частини грані ;

$S_{\text{г.пр.н.}}$  – площа світлопрозорої частини грані (після зміни пропорцій);

$R_{\text{г.н.}}$  – опір теплопередачі непрозорих конструкцій;

$R_{\text{г.пр.}}$  – опір теплопередачі світлопрозорих конструкцій.

На рисунку 2 показано вплив зміни пропорцій будівлі на ваговий коефіцієнт  $K_{113}$  та наведено довідкові дані для визначення коефіцієнта.

Для будівель у вигляді прямокутного паралелепіпеда визначено коефіцієнт  $K_{113}$  зміни трансмісійних витрат при раціональній зміні пропорцій будівлі (рис.2). Визначено межі можливого значення  $K_{113}$ . Вони становлять від 1 до 0,616.



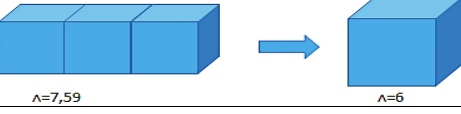
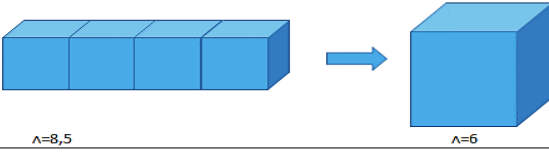

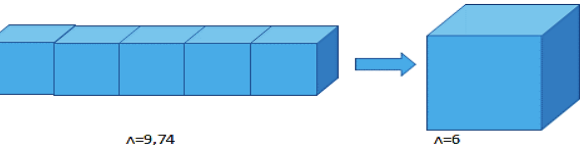
	Варіанти зміни пропорцій будівлі об'ємом 1м <sup>3</sup>	Коефіцієнт впливу $K_{113}$
1	 $\lambda=6$ $\lambda=6$	$K_{113}=1$
2	 $\lambda=6,69$ $\lambda=6$	$K_{113}=0,897$
3	 $\lambda=7,59$ $\lambda=6$	$K_{113}=0,79$
4	 $\lambda=8,5$ $\lambda=6$	$K_{113}=0,706$
5	 $\lambda=6,82$ $\lambda=6$	$K_{113}=0,88$
6	 $\lambda=9,74$ $\lambda=6$	$K_{113}=0,616$

Рис. 2. Вплив зміни пропорцій будівлі на ваговий коефіцієнт  $K_{113}$ 

Для будівлі гранної форми для підвищення енергоефективності запропоновано також спосіб визначення оптимальних пропорцій та коефіцієнта  $K_{113}$  з точки зору мінімізації трансмісійних тепловтрат через теплоізоляційну оболонку будівлі.

Висновок. У ході дослідження отримано аналітичні залежності та розроблено методику визначення вагових коефіцієнтів  $K_{113}$ , що дає змогу оцінювати зміну трансмісійних тепловтрат залежно від варіювання пропорціями зеленої будівлі в ході архітектурного проектування. Для зручності практичного застосування запропонований підхід супроводжується також довідковими матеріалами. Побудовано математичну модель для пошуку оптимальних пропорцій зелених при мінімізації трансмісійних тепловтрат будівель і відповідного значення коефіцієнта  $K_{113}$ .

Отримані результати можуть бути використані студентами архітектурних спеціальностей та проектними організаціями під час створення енергоефективних і екологічно збалансованих зелених об'єктів. Застосування запропонованого розрахункового інструментарію дозволяє оптимізувати проектні рішення та підвищити ресурсоефективність будівництва.

## Література

1. *Мартинов В.Л., Мартинюк О.Л., Поляк Ю.Ю., Банний Т.А.* Структуризація заходів щодо зменшення енергоспоживання зелених будівель з елементами оптимізації геометричних параметрів// Прикладна геометрія та інженерна графіка міжвід. науково-техніч. збірник. – Вип. 107. – К.: КНУБА, 2024 р. – С. 90–95
2. *Сергейчук О. В.* Геометричне моделювання фізичних процесів при оптимізації форми енергоефективних будинків: Автореферат дис. ... доктора техн. наук: 05.01.01 / Сергейчук Олег Васильович. – К., 2008. – 341 с.
3. *Мартинов В. Л.* Моделювання оптимальних геометричних параметрів енергоефективних будівель гранної форми : автореф. дис. докт. техн. наук : 05.01.01 / Київський національний університет будівництва і архітектури. Київ, 2015. 39 с.
4. *Natalia Bolharova.* Application of graph theory in the energy efficient architectural design // Motrol. Commission of motorization and energetics in agriculture: Lublin-Rzeszow, 2015. Vol. 17. No. 8. P. 75–82 .
5. *Болгарова Н.М.* Геометрична модель формування раціональної структури архітектурного об'єкту за параметрами енергоефективності. Автореферат дис. ... канд. техн. наук : 05.01.01 / Болгарова Наталія Михайлівна. – К., 2018. – 22 с.
6. *Кащенко Т. О.* Підвищення енергоефективності житлових будинків на основі оптимізації форми : дис. ... канд. архітектури : 18.00.02 / Кащенко Тетяна Олександрівна. – К., 2001. – 190 с.
7. *Фаренюк Г. Г.* Теплова надійність огорожувальних конструкцій та енергоефективність будинків при новому будівництві та реконструкції: дис. ... докт. техн. наук: 05.23.01 / Фаренюк Геннадій Григорович. – К., 2010. – 341 с.
8. *Фаренюк Г. Г.* О закономерностях теплопередачи через светопрозрачные конструкции / Г. Г. Фаренюк, Е. Г. Фаренюк // Оконные технологии. – К., 2001. – № 7. – С. 38–40.
9. *Козлов А. П.* Геометричне моделювання та аналіз деяких фізичних полів стосовно процесів масопереносу : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.01.01 «Прикл. геометрія, інж. графіка» / А. П. Козлов. – К., 2003. – 19 с.
10. *Плоский В. А.* Мгновенно-векторніе преобразования / В. А. Плоский // Прикл. геом. и инж. графика : респуб. межвед. научн.-техн. сб. – К. : Будівельник, 1990. – Вип. 50. – С. 75–77.
11. *Плоский В. О.* Системне уявлення та конструювання геометричної моделі задачі тепловологопереносу у вологонасиченій бетонній огорожуючій конструкції / О. В. Плоский, А. П. Козлов // Вісник Херсонського державного технічного університету. – Херсон: ХДТУ, 2003. – № 3 (19). – С. 351–353.

УДК 004.925.8:726.52

## СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧНЕ ФОРМОУТВОРЕННЯ ПРАВОСЛАВНИХ КАПЛИЦЬ

*Вірченко<sup>1</sup> Г.А., Терещук<sup>2</sup> М.О.*

<sup>1</sup>*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»*

<sup>2</sup>*Київський національний університет будівництва і архітектури*

Тема публікації обумовлена потребами подальшого розвитку методології структурно-параметричного геометричного моделювання [1] та поширення сфери її практичного застосування. У даному разі це певним чином також обумовлено важкою ситуацією в Україні, пов'язаною з війною, яка призводить до загибелі й каліцтва людей, руйнування міст та сіл, знищення архітектурної спадщини, культових споруд і т. д. Через зазначені трагічні обставини значна кількість громадян, серед яких переважну більшість становлять православні християни, звертається за духовною підтримкою до всевишніх сил. Обмежені матеріальні статки парафіян спричиняють у наш час популярність зведення не великих храмів, а маленьких каплиць. До цих об'єктів висуваються суворі релігійні канонічні вимоги [2, 3] стосовно структури та функціонального призначення її елементів. Головними компонентами є куполи, які уособлюють небесну святість. Суттєво сприяє забезпеченню необхідної індивідуальності, естетичної привабливості та технічної ефективності запропонований спосіб формоутворення куполів православних храмів [4]. Конкретні аспекти використання геометричного моделювання для збереження й відновлення архітектурної спадщини України розглянуті в дослідженні [5].

Мета даної праці полягає у висвітленні базових теоретичних засад структурно-параметричного формоутворення православних каплиць. Рис. 1 ілюструє створену на основі цієї методології відповідну модель. Склад її компонентів описується множиною

$$КПЛ = (кпл_i)_{i=1}^N = (кпл_i)_{i=1}^{10}, \quad (1)$$

де  $кпл_1$ =фундамент,  $кпл_2$ =колони,  $кпл_3$ =паперть,  $кпл_4$ =сходи,  $кпл_5$ =підлога,  $кпл_6$ =стіни,  $кпл_7$ =двері,  $кпл_8$ =вікна,  $кпл_9$ =дах,  $кпл_{10}$ =банне завершення.

Наведений граф дозволяє автоматизованим способом проєктувати потрібну множину варіантів

$$КПЛ = (КПЛ_n)_{n=1}^{N_{КПЛ}}, \quad (2)$$

де  $N_{КПЛ}$  – їхня кількість.

Дуги поданої моделі своїми довжинами характеризують певні досліджувані величини. Оптимальний, за необхідними критеріями, різновид православної каплиці визначається екстремальним (мінімальним або максимальним) шляхом у графі.

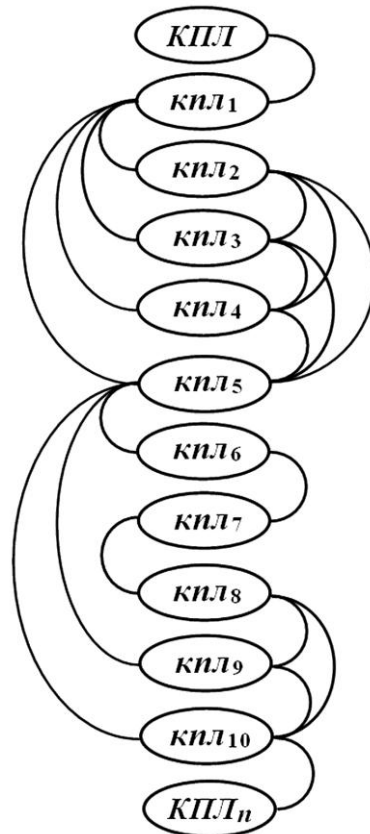


Рис. 1. Структурно-параметрична модель каплиці

На рис. 2 показано один із можливих варіантів даної будівлі на етапі ескізного проєктування.

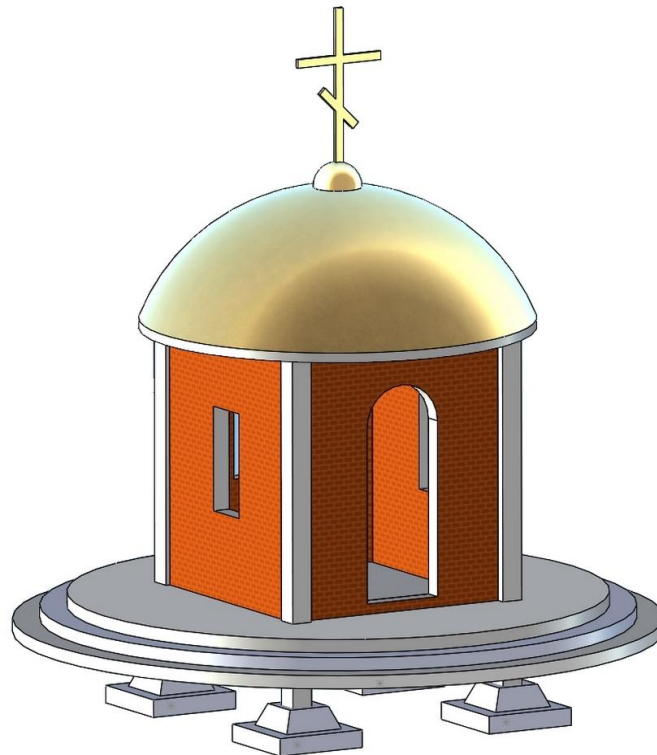


Рис. 2. Базові складові каплиці

Зауважимо, що на ньому зображено тільки базові архітектурні компоненти. Тобто, наприклад, ще не прийнято остаточні рішення стосовно конкретних застосовуваних дверей, вікон, декоративних та оздоблювальних елементів. Особливо варто акцентувати увагу на багатоваріантність православних каплиць, яку здатна реалізувати розроблена математична модель. Це стосується, зокрема, використовуваних фундаментів (стовпчастих, стрічкових, плитних), колон (квадратного, круглого та іншого поперечного перерізу, з цегли, залізобетону, дерева тощо), стін (несучих, самонесучих, огорожувальних, з різноманітного матеріалу), банних завершень (сферичних, яйцеподібних, цибульчастих і т. д. з шести-, семи- та восьмикінцевими хрестами).

Проаналізований підхід дозволяє долати наявну суперечність між потребою суворого дотримання існуючих релігійних архітектурних християнських канонів стосовно сакральних будівель і бажаною індивідуальністю та естетичною привабливістю останніх. При цьому також забезпечується дотримання належних будівельних норм і відповідна економічна ефективність зведення та подальшої експлуатації зазначених об'єктів.

Висновки. Представлена запропонована методологія структурно-параметричного формоутворення православних каплиць характеризується системним підходом до сучасного автоматизованого проектування. Завдяки своїм перевагам варта широкого впровадження в середовище нинішніх BIM (Building Information Modeling) технологій. Окреслена наукова тематика потребує проведення відповідних подальших досліджень.

### Література

1. Ванін В.В., Вірченко Г.А. Визначення та основні положення структурно-параметричного геометричного моделювання. Геометричне та комп'ютерне моделювання. 2009. Вип. 23. С. 42–48.
2. Куцевич В. Канонічна структура побудови православних храмів. Українська академія мистецтва. 2021. Вип. 30. С. 5–13.
3. Слепцов О.С. Архітектурне проектування і реконструкція православних храмів. Київ: А+С, 2014. 272 с.
4. Терешук М.О. Структурно-параметричний спосіб формоутворення куполів православних храмів. Прикладна геометрія та інженерна графіка. 2022. Вип. 103. С. 201–208. <https://www.doi.org/10.32347/0131-579x.2022.103.201-208>
5. Терешук М.О. Деякі аспекти застосування геометричного моделювання для збереження та відновлення архітектурної спадщини України. Прикладна геометрія та інженерна графіка. 2024. Вип. 107. С. 162–171. <https://doi.org/10.32347/0131-579X.2024.107.162-171>

УДК 514.18

## **БАГАТОПАРАМЕТРИЧНА ОПТИМІЗАЦІЯ ФОРМИ ЗЕЛЕНИХ БУДІВЕЛЬ ДЛЯ П'ЯТИ АРХІТЕКТУРНО-КЛІМАТИЧНИХ РАЙОНІВ УКРАЇНИ**

*Мартинів В.Л., Стаднійчук Д.М., Банний Т.А.*

*Київський національний університет будівництва і архітектури*

Актуальність проектування енергоефективних зелених будівель в Україні набуває все більшого значення. З 1 квітня 2025 року в Україні набули чинності нові вимоги до будівель з майже нульовим рівнем енергоспоживання (nZEB), які передбачають значне скорочення енерговикористання та обов'язкове застосування відновлюваних джерел енергії, що наближає національні стандарти до європейських. Також масштабні руйнування житлового фонду внаслідок військової агресії створили безпрецедентну потребу у відбудові з впровадженням принципів "зеленої" реконструкції та будівництва. Існуючий житловий фонд України, переважно збудований за радянських часів, характеризується низькою енергоефективністю: близько 80% житлових будинків не мають належної ізоляції, а середнє енергоспоживання українських будівель (163 кВт·год/м<sup>2</sup> на рік) майже вдвічі перевищує середньоєвропейський показник. Урядова програма термомодернізації до 2030 року, схвалена Кабінетом Міністрів України, передбачає скорочення енергоспоживання в житловому секторі щонайменше на 30%, що є важливим кроком до підвищення енергетичної незалежності країни та зменшення викидів парникових газів. Крім того, інтеграція України до європейського енергетичного простору зобов'язує впроваджувати директиви ЄС щодо енергоефективності будівель, що робить розвиток зеленого будівництва не лише екологічним імперативом, а й необхідною умовою євроінтеграції

При проектуванні зелених будівель у п'яти архітектурно-кліматичних районах України треба враховувати кліматичні особливості, відмінності температурних режимів, інсоляції та вітрових навантажень, що безпосередньо впливають на енергетичний баланс будівель. У будівлях треба використовувати оптимальну форму будівель для підвищення їх енергоефективності.

У зв'язку з цим була розроблена математична модель оптимізації форми зеленої будівлі що дозволяє враховувати регіональні кліматичні особливості при пошуку балансу між архітектурною формою та енергоефективністю. Застосування запропонованого підходу при проектуванні для різних кліматичних районів України сприятиме створенню не лише екологічно збалансованих, але й адаптованих до місцевих умов архітектурних об'єктів, що підвищує ресурсоефективність будівництва та відповідає сучасним вимогам сталого розвитку.

Для підвищення енергоефективності зелених будівель запропоновано спосіб одночасної оптимізації декількох геометричних параметрів гранних

енергоефективних будівель з метою мінімізації теплового балансу огорожувальних конструкцій з навколишнім середовищем.

Для цього створено математичну модель теплового балансу  $\Delta Q_{грi}$  кожної грані будівлі, що включає параметри її пропорцій (a, b, h, r<sub>Б</sub>, ω, α), опору теплопередачі непрозорих R<sub>сті</sub> і прозорих R<sub>ві</sub> конструкцій та площу світлопрозорих конструкцій S<sub>ві</sub>. Враховується орієнтація та енергетична освітленість конструкцій короткохвильовою радіацією.

При цьому площа вікон на грані будівлі за попереднім розрахунком знаходиться за формулою:

$$S_{ві} = f(S_{п} N_{пов} F \cdot P_i), \quad (1)$$

де  $S_{п} = f(a, b, r_{Б}, \alpha, \omega)$  – площа підлоги поверху, що залежить від параметрів пропорцій будівлі;  $N_{пов}$  – кількість поверхів будівлі;  $F$  – співвідношення площі вікон до площі поверху (від 0,2 до 0,125 при попередніх розрахунках), що необхідне для забезпечення нормативного рівня природного освітлення;  $P_i$  – коефіцієнт застосування стін будівлі (від 0 до 1).

Натомість площа непрозорої конструкції грані будівлі визначається так:

$$S_{сті} = f(a, b, r_{Б}, \alpha, \omega), \quad (2)$$

де змінними є параметри форми будівлі, а математичну модель теплового балансу її грані можна представити у вигляді цільової функції з декількома змінними:

$$\Delta Q_{грi} = \frac{S_{сті}}{R_{сті}} \cdot \left[ t_{ві} - \left( t_{зі} + \frac{r_i \cdot I_{спi}}{\alpha_{зсті}} \right) \right] \cdot N_{діб} + \frac{S_{ві} \cdot D_{di}}{R_{ві}} - Q_{спi} \cdot K_i \cdot \zeta_i \cdot \varepsilon_{oi} \cdot S_{ві}, \quad (3)$$

де  $t_{зі}$  – фактична температура зовнішнього повітря (град);  $t_{ві}$  – температура внутрішнього повітря (град);  $r_i$  – альbedo поверхні грані будівлі;  $I_{спi}$  – енергетична освітленість короткохвильовою радіацією (Вт/м<sup>2</sup>);  $\alpha_{зсті}$  – коефіцієнт теплообміну між зовнішньою поверхнею огорожувальної конструкції та зовнішнім повітрям, що враховує орієнтацію і напрямок вітру;  $R_{сті}$  – опір теплопередачі непрозорих огорожувальних конструкцій (м<sup>2</sup>·К/Вт);  $N_{діб}$  – кількість діб опалювального періоду;  $R_{ві}$  – опір теплопередачі градусо-діб опалювального періоду;  $S_{сті}$  або ( $S_{кі}$ ) – площа непрозорих конструкцій грані (м<sup>2</sup>);  $Q_{спi}$  – кількість тепла від сонячної радіації, що надходить протягом опалювального періоду (кВт·год/м<sup>2</sup>);  $K_i$  – коефіцієнт дійсних умов хмарності, що впливають на надходження сонячної радіації;  $\zeta_i$  – коефіцієнт, що враховує затінення віконного прорізу непрозорими елементами;  $\varepsilon_{oi}$  – коефіцієнт відносного надходження сонячної радіації для світлопрозорих конструкцій;  $g = \zeta_i \cdot \varepsilon_{oi}$  – фактор застосування вікон.

УДК 514.18:728.8

## ПОВЕРХНЯ ТОЧКИ РОСИ

*Зданевич В.А., Кундрат Т.М., Літницький С.І., Пугачов Є В.*

*Національний університет водного господарства та природокористування*

Точка роси  $\tau_p$  [1-4] – температура, ° С, за якої повітря досягає стану насиченості при даному вмісті водяної пари і атмосферному тиску, тобто відбувається конденсація водяної пари. Її можна визначити, користуючись таблицями для максимальної пружності водяної пари  $E$ , якщо відома реальна пружність водяної пари  $e$ . За значенням пружності водяної пари  $e$  в таблиці шукають відповідне значення температури повітря, яке і буде точкою роси.

Точку роси також можна обчислити за експериментальною формулою [4]

$$\tau_p = (\varphi/100)^{0,1247} \cdot (108,8 + t) - 109,8, \quad (1)$$

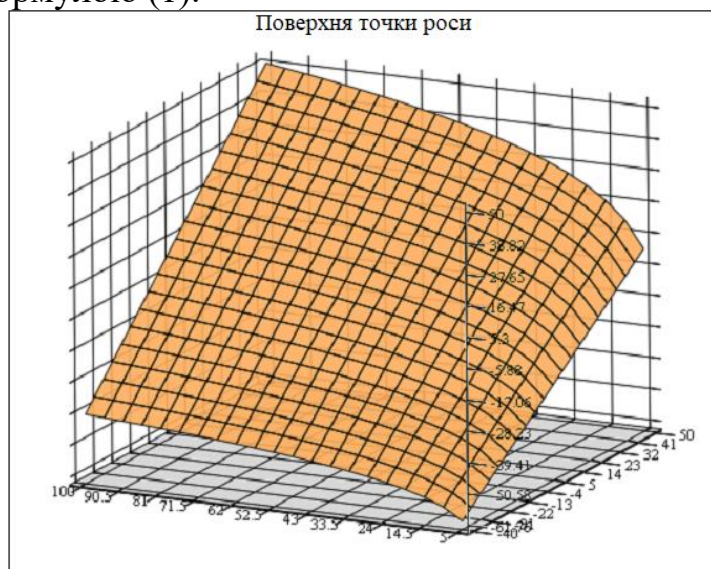
або теж експериментальною формулою Магнусена-Тетенса

$$\tau_p = b \cdot (a \cdot t / (b + t) + \ln(\varphi/100)) / (a - (a \cdot t / (b + t) + \ln(\varphi/100))), \quad (2)$$

де  $t$  – температура повітря, ° С;  $\varphi$  – його відносна вологість, %;  $a$  і  $b$  – коефіцієнти, що дорівнюють 17,27 та 237,7, відповідно.

Як видно з формул, температура точки роси за нормального атмосферного тиску залежить від двох параметрів – температури повітря  $t$  та його відносної вологості  $\varphi$  – і тому геометрично є поверхнею в тривимірному просторі.

Візуалізуємо та проаналізуємо спочатку поверхню, задану формулою (1). В середовище комп'ютерної математики MathCad була побудована поверхня (рис. 1), задана формулою (1).

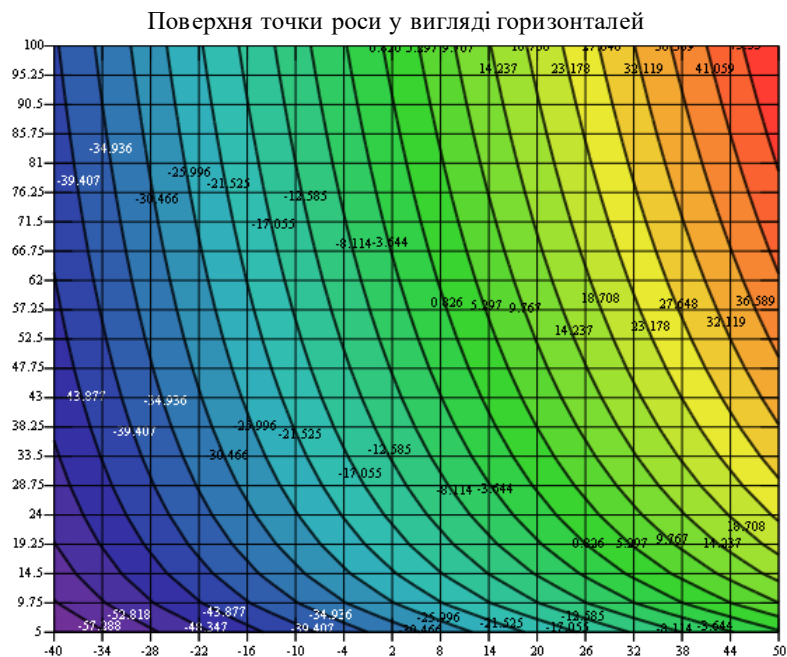


TR

Рис. 1. Поверхня точки роси, задана формулою (1)

При зміні температури повітря від -40 до 50 °С і відносної вологості від 5 до 100 % максимальне значення точки роси становило 50 °С (відповідає значенню параметрів  $t = 50$  °С і  $\varphi = 100$  %, тобто точка роси збігається з температурою повітря за 100-відсоткової його вологості).

На рис. 2 та ж поверхня представлена у вигляді пронумерованих горизонталей.



TR

Рис. 2. Поверхня точки роси, представлена у вигляді горизонталей

А на рисунках 3 і 4 маємо поверхню у вигляді перерізів площинами  $t = \text{const}$  і  $\phi = \text{const}$ .

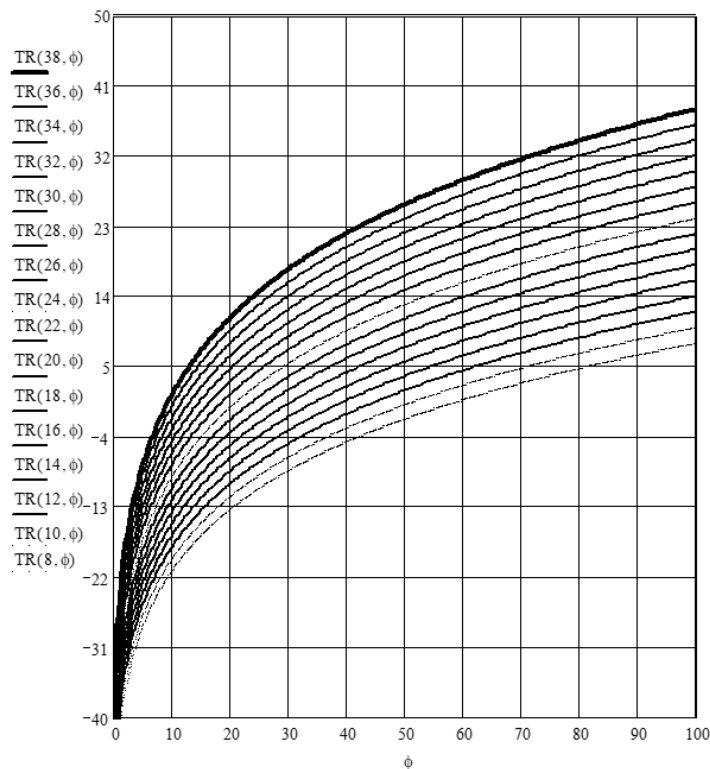


Рис. 3. Поверхня точки роси, представлена перерізами  $t = \text{const}$

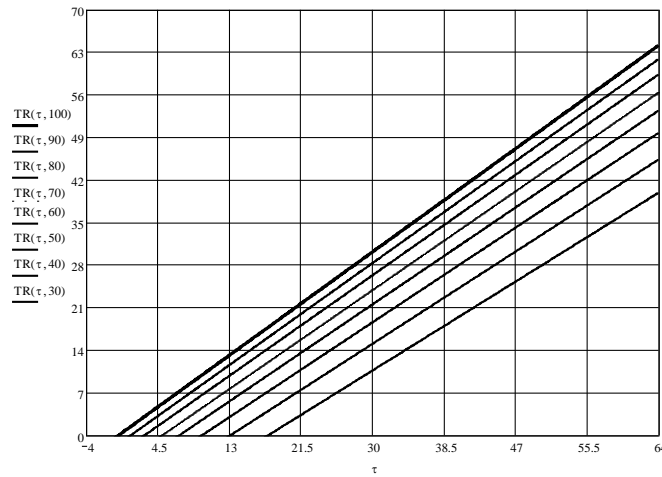
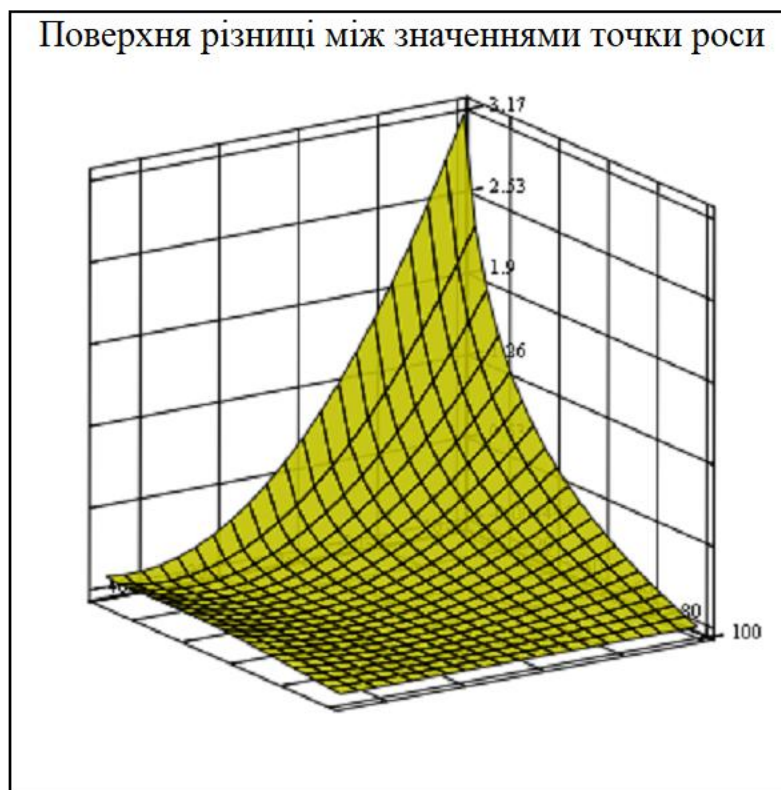


Рис. 4. Поверхня точки роси представлена перерізами  $\phi = \text{const}$

На рисунку 3 перерізи поверхні показані для температур повітря  $t = 8-38$  °C через 2 °C, а на рис. 4 – для значень відносної вологості повітря  $\phi = 30-100$  % через 10 %. З рисунків 1 і 4 зрозуміло, що поверхня точки роси є лінійчатою.

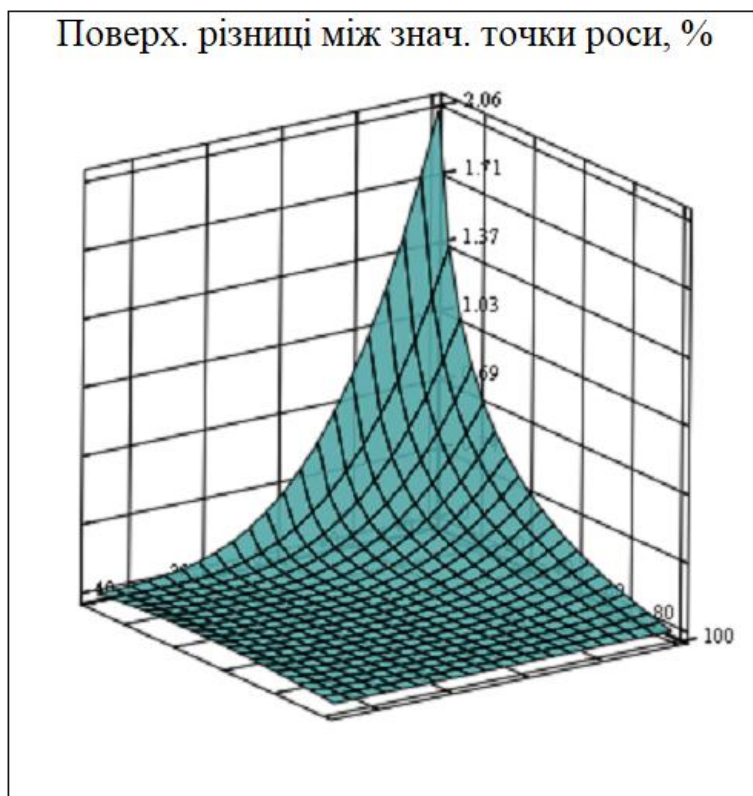
Поверхня, побудована за формулою 2, має приблизно таку ж форму, що й поверхня, показана на рис. 1, але значення точки роси трохи відрізняються. Для порівняння на рис. 5 показана поверхня різниці значень точки роси (від значень, отриманих за формулою 1, віднімалися значення, отримані за формулою 2).



$\Delta TR$

Рис. 5. Поверхня різниці значень точки роси

Як видно з рис. 5, максимальне значення різниці становить приблизно 3 °С. На рис. 6. маємо поверхню різниць значень точки роси у відсотках (за 100 відсотків приймалися значення, обчислені за формулою 1). Максимальна різниця у відсотках становить приблизно 2 %. Причому виникає вона в тій області параметрів, де температури повітря від'ємні, а відносна вологість мінімальна.



$\Delta TRPR$

Рис. 6. Поверхня різниці значень точки роси у відсотках.

Отже, поверхня точки роси як функція температури повітря і його вологості є лінійною, а максимальні значення точки роси відповідають максимальній відносній вологості і збігаються з температурою повітря.

### Література

1. Казаков Г. В. Архітектурна фізика: основні поняття і величини. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2012. 260 с.
2. Сергейчук О. В. Архітектурно-будівельна фізика. Теплотехніка огороджуючих конструкцій будинків. Київ: «Такі справи», 1992. 156 с.
3. Шмиг Р. А., Боярчук В. М., Добрянський І. М., Бараб В. М. Термінологічний словник-довідник з будівництва та архітектури. Львів, ПП «Арал», 2010. 222 с.
4. Bläsi W., Ferdinand S., Schlatter K. Bauphysik. Verlag Europa-Lehrmittel, 2022. 524 p.

УДК 514.18

## ДВОВИМІРНА ДИСКРЕТНА ІНТЕРПОЛЯЦІЯ СУПЕРПОЗИЦІЯМИ КООРДИНАТ ТРЬОХ ТОЧОК

*Воронцов О.В., Воронцова І.В.*

*Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка».  
Полтавський коледж нафти і газу Національного університету «Полтавська  
політехніка імені Юрія Кондратюка».*

**Твердження.** Координати довільної точки будь-якої двовимірної числової послідовності можна визначити як суперпозицію координат трьох довільних точок даної послідовності при відомій величині рекурентної залежності.

Запишемо систему рівнянь у вигляді:

$$\begin{cases} \sum_{s=1}^3 k_s = 1 \\ \sum_{s=1}^3 k_s V_s = V \\ \sum_{s=1}^3 k_s W_s = W \\ \sum_{s=1}^3 k_s T_s + P = T \end{cases}, \quad (1)$$

де невідомими величинами будуть  $k_1, k_2, k_3, T$ .

Дана система містить чотири рівняння і чотири невідомі величини, тому повинна мати розв'язок.

Визначники  $\Delta$  системи (1) матимуть вигляд:

$$\begin{aligned} \Delta &= -V_2 W_3 + V_1 W_3 + V_3 W_2 - V_1 W_2 - V_3 W_1 + V_2 W_1; \\ \Delta_1 &= -V_2 W_3 + V W_3 + V_3 W_2 - V W_2 - V_3 W + V_2 W; \\ \Delta_2 &= V_1 W_3 - V W_3 - V_3 W_1 + V W_1 + V_3 W - V_1 W; \\ \Delta_3 &= -V_1 W_2 + V W_2 + V_2 W_1 - V W_1 - V_2 W + V_1 W \\ \Delta_4 &= -V_1(T_3 W_2 - T_2 W_3) + V(T_3 W_2 - T_2 W_3) + V_2(T_3 W_1 - T_1 W_3) - \\ &\quad -V(T_3 W_1 - T_1 W_3) + V_2(-P W_3 - T_3 W) - V_1(-P W_3 - T_3 W) - \\ &\quad -V_3(T_2 W_1 - T_1 W_2) + V(T_2 W_1 - T_1 W_2) - V_3(-P W_2 - T_2 W) + \\ &\quad + V_1(-P W_2 - T_2 W) + V_3(-P W_1 - T_1 W) - V_2(-P W_1 - T_1 W). \end{aligned}$$

Коефіцієнти суперпозиції будуть обчислені за формулами:

$$k_s = \frac{\Delta_s}{\Delta}; s = \overline{1; 3}.$$

Якщо невідомими величинами будуть  $k_1, k_2, k_3, T$ , то вирази для визначення величин коефіцієнтів суперпозиції заданих вузлових точок дискретного каркаса та аплікати шуканої точки  $T$  матимуть вигляд:

$$\begin{aligned} k_1 &= \frac{\Delta_1}{\Delta} = \frac{-V_2 W_3 + V W_3 + V_3 W_2 - V W_2 - V_3 W + V_2 W}{-V_2 W_3 + V_1 W_3 + V_3 W_2 - V_1 W_2 - V_3 W_1 + V_2 W_1}; \\ k_2 &= \frac{\Delta_2}{\Delta} = \frac{V_1 W_3 - V W_3 - V_3 W_1 + V W_1 + V_3 W - V_1 W}{-V_2 W_3 + V_1 W_3 + V_3 W_2 - V_1 W_2 - V_3 W_1 + V_2 W_1}; \\ k_3 &= \frac{\Delta_3}{\Delta} = \frac{-V_1 W_2 + V W_2 + V_2 W_1 - V W_1 - V_2 W + V_1 W}{-V_2 W_3 + V_1 W_3 + V_3 W_2 - V_1 W_2 - V_3 W_1 + V_2 W_1}; \\ T &= \Delta_4 / \Delta = \\ &= -V_1(T_3 W_2 - T_2 W_3) + V(T_3 W_2 - T_2 W_3) + V_2(T_3 W_1 - T_1 W_3) - \\ &\quad -V(T_3 W_1 - T_1 W_3) + V_2(-P W_3 - T_3 W) - V_1(-P W_3 - T_3 W) - \\ &\quad -V_3(T_2 W_1 - T_1 W_2) + V(T_2 W_1 - T_1 W_2) - V_3(-P W_2 - T_2 W) + \\ &\quad + V_1(-P W_2 - T_2 W) + V_3(-P W_1 - T_1 W) - V_2(-P W_1 - T_1 W) \end{aligned}$$

$$-V_3(T_2W_1 - T_1W_2) + V(T_2W_1 - T_1W_2) - V_3(-PW_2 - T_2W) + \\ +V_1(-PW_2 - T_2W) + V_3(-PW_1 - T_1W) - V_2(-PW_1 - T_1W) / \\ / -V_2W_3 + V_1W_3 + V_3W_2 - V_1W_2 - V_3W_1 + V_2W_1 .$$

Таким чином, система рівнянь (1) має розв'язок, що доводить вірність Твердження.

Розглянемо другу постановку, де невідомими будуть  $k_1, k_2, k_3, P$ , а  $T$  вважається заданим.

Тоді величина рекурентної залежності визначиться із виразу:

$$P = \Delta_4 / \Delta = \\ ((T - T_1) \times (V_2 \times W_3 - V_3 \times W_2) + (T - T_2) \times (V_3 \times W_1 - V_1 \times W_3) + \\ + (T - T_3) \times (V_1 \times W_2 - V_2 \times W_1) + (T_1 - T_2) \times (V \times W_3 - V_3 \times W) + \\ + (T_1 - T_3) \times (V_2 \times W - V \times W_2) + (T_2 - T_3) \times (V \times W_1 - V_1 \times W)) / \\ / ((V_2 - V_1) \times W_3 + (V_1 - V_3) \times W_2 + (V_3 - V_2) \times W_1) .$$

Або, безпосередньо, із системи (1):

$$P = T - (k_1T_1 + k_2T_2 + k_3T_3) .$$

Результати даних досліджень можуть бути використані для проведення суцільної інтерполяції числовими послідовностями двох змінних складовими яких є будь-які одновимірні числові послідовності, що представляють нескінченні дискретні форми певних аналітичних функцій, із врахуванням заданої величини рекурентної залежності  $P$ , що тотожна величині зовнішнього формоутворюючого навантаження  $KP$  статико-геометричного методу.

Один і той самий дискретний каркас, будь-якої, двовимірної числової послідовності може бути сформований формулами (1) при різних величинах рекурентної залежності.

## Література

1. Воронцов О.В., Усенко В.Г., Воронцова І.В. Визначення коефіцієнтів суперпозиції для дискретного формування поліноміальних функціональних залежностей / О.В. Воронцов, В.Г. Усенко, І.В. Воронцова // Прикладна геометрія та інженерна графіка. – К.: КНУБА, 2025. – Вип. 107. – С. 42-53. Категорія Б. <https://doi.org/10.32347/0131-579x.2024.107>

2. Воронцов О.В., Воронцова І.В. Вплив коефіцієнтів суперпозиції на дискретне формування елементарних функціональних залежностей // О.В. Воронцов, І.В. Воронцова // Сучасні проблеми моделювання. Збірник наукових праць Мелітопольського державного педагогічного університету імені Богдана Хмельницького. Мелітополь: – МДПУ. Випуск 28. 2025. С. 44.— 53. <https://doi.org/10.33842/2313-125X-2025-30>

3 Воронцов, О.В., Воронцова І.В. Визначення величин коефіцієнтів суперпозиції координат чотирьох точок на прикладі поліномів двох змінних / О.В. Воронцов, І.В. Воронцова // Прикладна геометрія та інженерна графіка. – К.: КНУБА, 2024. – Вип. 106. – С. 67-81. DOI: <https://doi.org/10.32347/0131-579x.2024.106>

УДК 514.18

## ГЕОМЕТРИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДИФЕРЕНЦІАЛЬНИЙ АНАЛІЗ СІМЕЙСТВА ГАУСІВСЬКО-МОДИФІКОВАНИХ ЦИКЛОЇДАЛЬНИХ КРИВИХ

*Котляр Д.В.*

*Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова*

Характерною особливістю сучасних досліджень у прикладній геометрії є оперування складними аналітичними рівняннями для створення технічних форм із заданими властивостями. У задачах аеродинамічного проектування, зокрема при конструюванні носових конусів балістичних снарядів, критичне значення має не лише візуальна плавність обводу, а й характер розподілу його кривини. Класичні циклоїдальні криві мають жорстко визначену структуру, що обмежує можливості локальної корекції форми. У даній роботі запропоновано і запропоновано математичну модель циклоїди з гаусівською модифікацією, яка забезпечує цілеспрямований вплив на локальні та глобальні геометричні характеристики обводу.

**Математична модель.** Пропонована модель базується на модифікації радіус-функції циклоїди експоненціальним множником Гаусса. Векторно-параметричне рівняння кривої визначається як:

$$\begin{aligned} x(t) &= \lambda \cdot r(t) \cdot (t - \sin(t)) = \left(\frac{c}{\pi}\right) \cdot a(t) \cdot (t - \sin(t)), \\ y(t) &= r(t) \cdot (1 - \cos(t)) = \left(\frac{h}{2}\right) \cdot a(t) \cdot (1 - \cos(t)), \end{aligned} \quad (1)$$

де  $a(t) = 1 + \alpha \exp(-(t - \mu)^2 / 2\sigma^2)$  – функція модифікації Гаусса, а  $c$  та  $h$  – геометричні параметри, що задаються граничними умовами проектування.  $\lambda = c/(\pi R)$  – коефіцієнт масштабування,  $R = h/2$  – радіус циклоїди. Параметри  $\alpha$ ,  $\sigma$  та  $\mu$  визначають відповідно амплітуду, ширину та положення центру локального збурення форми.

**Аналітичне дослідження умови неспадності.** Для забезпечення геометричної коректності профілю необхідно, щоб ордината  $y(t)$  була монотонно неспадною на інтервалі  $t \in [0, \pi]$ . Будь-яка втрата монотонності призводить до появи локальних впадин, що є неприпустимим для обтічних поверхонь. Дослідження першої похідної  $y'(t)$  показало, що критичною ділянкою є проміжок  $t \in [0, \mu]$ , де похідна модифікації  $a'(t) < 0$ . Виявлено, що завдяки градієнтному домінуванню тригонометричного компонента у нерівності в околі початкової точки (при  $t \rightarrow 0$ ), монотонність ординати зберігається для всіх значень  $\alpha > -1$  дослідженого діапазону параметрів, що дозволяє формувати опуклі профілі.

$$a(t) \cdot \sin(t) \geq |\dot{a}(t)|(1 - \cos(t)). \quad (2)$$

**Аналіз розподілу кривини.** Для досягнення високих аеродинамічних якостей встановлено додаткову конструктивну вимогу – монотонне спадання кривини  $\kappa(t)$  від носової частини до виходу:

$$dk(t, \alpha, \sigma, \mu) / dt \leq 0, \forall t \in [0, \pi] \quad (3)$$

Через високу нелінійність виразу, що містить похідні функції Гауса, ідентифікація областей гладкості проведена чисельно-символьними методами.

**Результати та візуалізація.** У ході обчислювальних експериментів було вперше визначено топологію простору параметрів  $\alpha$ ,  $\sigma$ ,  $\mu$ , що забезпечує геометричну коректність обводів. Побудовані сімейства ізоліній (рис. 1) дозволяють здійснювати апріорний вибір коефіцієнтів модифікації для гарантування неспадності ординати  $y(t)$ . Встановлено, що межа зони неспадності визначається критичним станом  $y'(t) = 0$ , за яким виникають локальні самоперетини профілю.

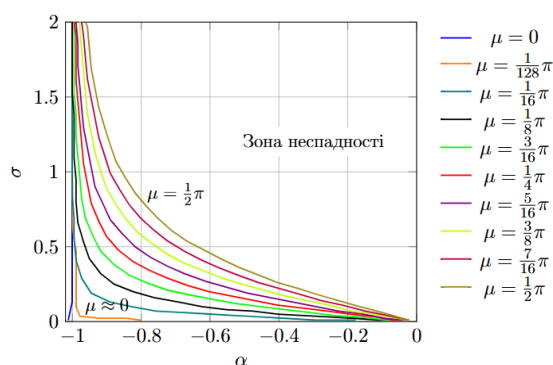


Рис.1. Контури залежності  $\alpha$  і  $\sigma$  для фіксованих  $\mu$ , що визначають межі зони неспадності по ізолінії  $y'(t) = 0$

Виявлено ефект «геометричного кармана» — вузької області в просторі параметрів (рис. 2), де при візуальній плавності кривої виникає порушення монотонності кривини. Це ідентифікується за ізолінією  $\text{MAX}_t (dk/dt) = 0$  і є

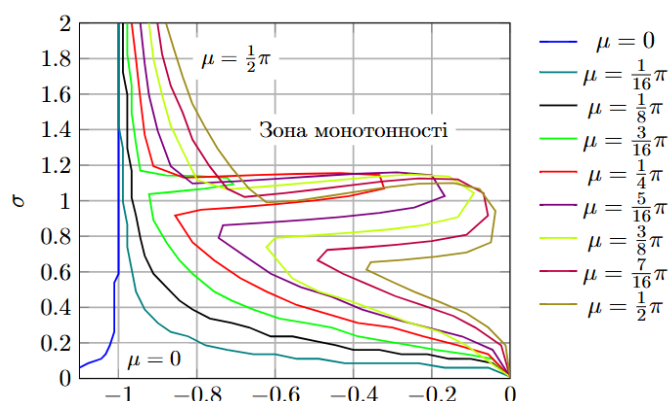
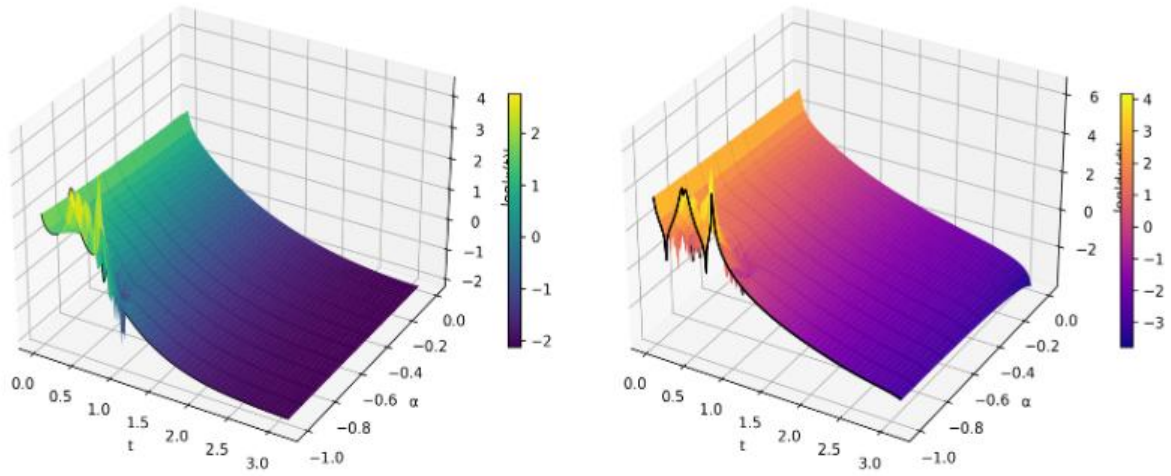


Рис.2. Контури залежності  $\alpha$  і  $\sigma$  для фіксованих  $\mu$ , що визначають межі зони немонотонності кривини по ізолінії  $\text{max}_t (dk/dt) = 0$

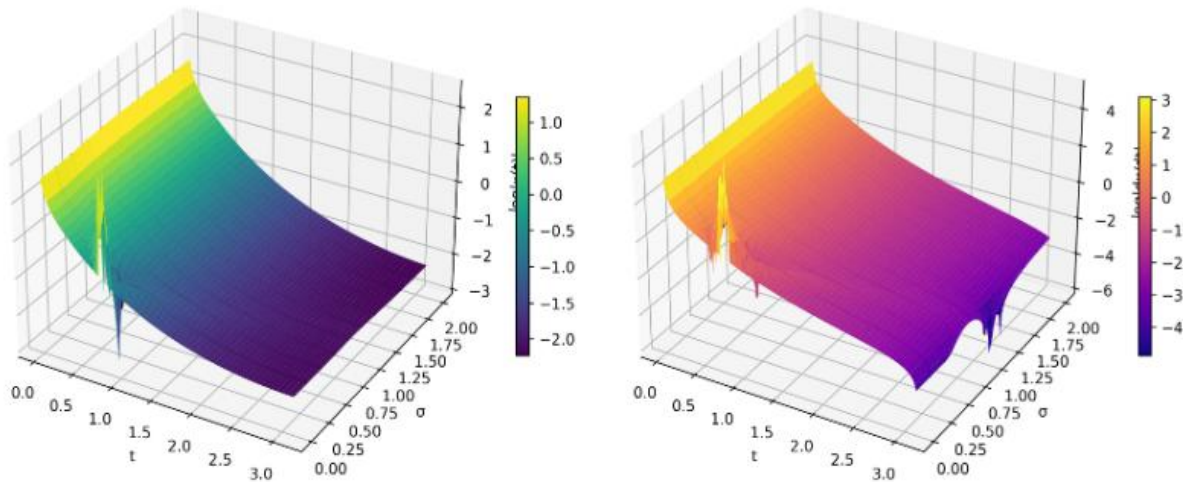
критичним для задач аеродинаміки, де немонотонність кривини спричиняє передчасний відрив пограничного шару.

Аналіз тривимірних ландшафтів диференціальних характеристик (рис. 3)

а) При змінному  $\alpha$  та фіксованих ( $\sigma = 0.8, \mu =$



б) При змінному  $\sigma$  та фіксованих ( $\alpha = -0.3, \mu = \pi/4$ )



в) При змінному  $\mu$  та фіксованих ( $\alpha = -0.3, \sigma = 0.8$ )

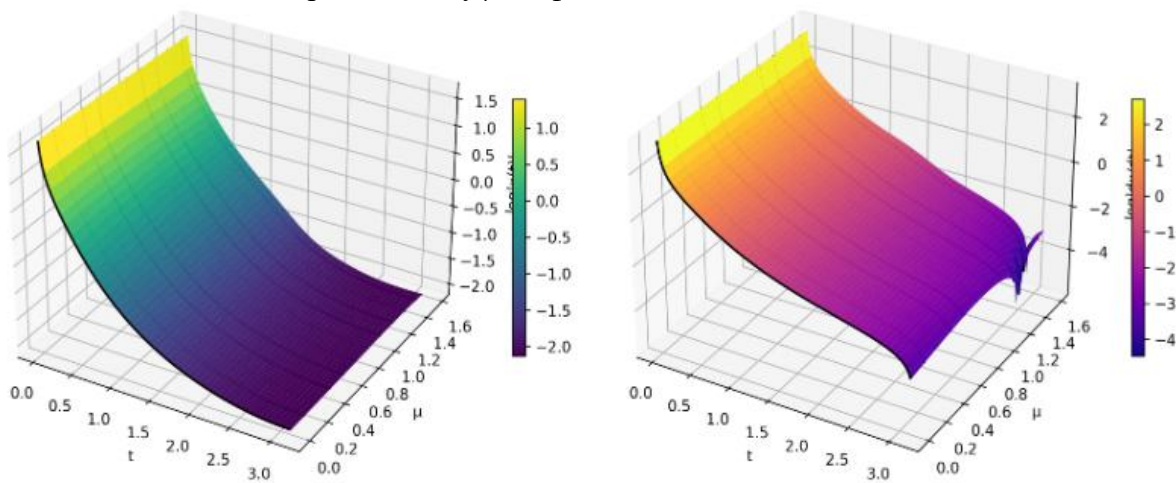


Рис.3. Диференціальні ландшафти гаусівсько-модифікованої циклоїди  $\log|\kappa(t)|$  (зліва) і  $\log|dk/dt|$  (справа)

дозволив встановити ступінь впливу кожного параметра на стійкість моделі.

Використання значень  $\log |k(t)|$  та  $\log |dk/dt|$  дозволило нівелювати значні розбіжності в порядках величин та чітко ідентифікувати зони екстремальної чутливості моделі до варіації параметрів Гаусса.

Аналіз впливу *амплітуди модифікації*  $\alpha$  (рис. 3, а) свідчить про прямо пропорційну залежність між глибиною збурення та піковими значеннями кривини. Встановлено, що при збільшенні  $\alpha$  відбувається локальне "загострення" профілю в околі точки модифікації, що критично для розрахунку локальних напружень або тиску потоку.

Дослідження *параметра локалізації*  $\sigma$  (рис. 3, б) дозволило виявити характер переходу від глобальної деформації циклоїдального обводу до вузькоспрямованої локальної корекції. При малих значеннях  $\sigma$  диференціальні характеристики змінюються стрибкоподібно, що підтверджує можливість прецизійного втручання в геометрію окремої ділянки профілю без суттєвого впливу на його загальну конфігурацію.

Особливий науковий інтерес становить *динаміка зміщення центру модифікації*  $\mu$  (рис. 3, в). Побудовані поверхні наочно ілюструють траєкторію переміщення максимуму кривини вздовж дуги обводу. Це доводить гнучкість запропонованої моделі у задачах оптимізації технічних форм, де положення критичної точки розподілу кривини має бути чітко синхронізоване з умовами експлуатації (наприклад, точкою переходу ламінарного потоку в турбулентний).»

Встановлено, що для забезпечення монотонності кривини параметри модифікації мають перебувати в межах:  $\alpha \in [-0.81, 0.00]$ ,  $\sigma \in [0.27, 0.95]$ ,  $\mu \in [0, \pi/2]$ .

**Висновки.** Запропоновано модель та досліджено геометричні властивості гаусівсько-модифікованої циклоїди з урахуванням габаритних параметрів довжини та висоти обводу. Отримана модель забезпечує формування гладких обводів із керованим розподілом кривини, що є теоретичним підґрунтям для створення високоефективних технічних форм.

### Література

1. Anderson J. D. Jr. Fundamentals of Aerodynamics. 3rd ed. New York: McGraw-Hill Science/Engineering/Math, 2001. 912 p.
2. Carlucci D. E. Ballistics: Theory and Design of Guns and Ammunition / D. E. Carlucci, S. S. Jacobson. 3rd ed. Boca Raton : CRC Press, 2018. 614 p.
3. Do Carmo M. P. Differential Geometry of Curves and Surfaces. 2nd ed. New York: Dover Publications, 2016. 512 p.
4. Fuentes H. E. Total generalization of the cycloid. International Journal of Mathematical Education in Science and Technology. 1997. Vol. 28, No. 2. P. 243–247.
5. Mortenson M. E. Geometric Modeling. 2nd ed. New York : John Wiley & Sons, 1997. 544 p.
6. Shah V. K. Determination of the optimum nose cone geometrical shape for supersonic missile / V. K. Shah, K. Ateeb, M. Razzaq et al. Materials Today: Proceedings. 2022. Vol. 64, No. 1. P. 749–754.

UDC 621.396:631.3-52

## ENERGY EFFICIENT NETWORKS FOR SWARMS OF AUTONOMOUS AGRICULTURAL DRONES

*Krushelnytskyi V.V., Skuriatin M.A.*

*National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine*

The modern paradigm of Smart Agriculture is rapidly evolving from the use of single automated machines to the implementation of complex robotic complexes, which may include swarms of uncrewed aerial vehicles. The integration of soft robotics technologies into drone design enables the manipulator's gripper to interact delicately with plants in agroforestry and horticultural [1].

Effective execution of operations, such as variable-rate fertilisation or autonomous harvesting, requires not only modern mechatronic solutions but also a reliable communication architecture.

The integration of cloud computing and the Internet of Things is a fundamental prerequisite for coordinating mobile agricultural robots [2]. Drone swarm control involves a combination of reactive and deterministic behaviours. Reliable communication is essential not only for avoiding collisions but also for the effective and standardised monitoring of the swarm by a human operator (Human–Robot Interaction) [3].

The key problem remains the energy dependence of UAVs. Traditional Wi-Fi and 4G protocols rapidly drain batteries. To mitigate this negative factor, the use of energy-efficient communication technologies, particularly LPWANs (e.g., LoRaWAN) and WPANs (e.g., Zigbee), provides an effective solution.

To perform precision application tasks, such as those of mineral fertilisers, which were conceptually studied for ground-based pneumatic agricultural robots [4], the swarm, in this case, requires a two-level communication architecture:

**Intra-swarm communication (Zigbee):** Based on the IEEE 802.15.4 standard [5], this protocol is suitable for short-range data exchange (up to 100 m) between drones. The use of a mesh topology enables drones to locally synchronise trajectories, allocate processing areas, and coordinate fruit capture without delays or the need to call a central server [6].

**Global Telemetry (LoRaWAN):** Comprehensive reviews of the development of LPWAN for the Internet of Things [4] confirm that the LoRaWAN architecture enables the deployment of low-power networks over large areas. This channel can be used to communicate between the swarm and the cloud server over distances of up to 15 km. It transmits task maps, global coordinates, and overall operation status.

The use of low-power networks directly affects the operating time of autonomous drones. The energy balance of each uncrewed vehicle in a swarm, for example, a UAV, can be described by the following expressions:

$$E_{total} = E_{flight} + E_{manip} + E_{com}$$

where  $E_{total}$  is the total available battery energy;  $E_{flight}$  is the energy consumption on flight;  $E_{manip}$  is the energy to perform agrotechnical operations (e.g., sprayer pumps, manipulator actuators);  $E_{com}$  is the energy spent on communication.

In turn, the energy consumption for data transmission ( $E_{com}$ ) is calculated using the following expressions:

$$E_{com} = P_{tx} \cdot \frac{L}{R} + P_{rx} \cdot t_{rx}$$

where  $P_{tx}$  and  $P_{rx}$  are the power consumption of the radio module in the transmit and receive modes;  $L$  is the data packet size (bit);  $R$  is the data transfer rate (bit/s);  $t_{rx}$  – duration in receive mode.

As LoRaWAN and Zigbee protocols significantly minimise  $P_{tx}$  and  $P_{rx}$  compared to broadband networks,  $E_{com}$  is reduced accordingly. This allows the battery capacity to be redistributed between  $E_{flight}$  and  $E_{manip}$ , thereby increasing the UAV's autonomous operating time.

The use of the LoRaWAN protocol for macro control and Zigbee for micro coordination protocols forms an optimal infrastructure for the operation of agricultural drones. This approach ensures the execution of agrotechnical operations while simultaneously reducing the energy consumption of robotic complexes.

## References

1. Chowdhary, G., Gazzola, M., Krishnan, G., Soman, C., & Lovell, S. (2019). Soft Robotics as an Enabling Technology for Agroforestry Practice and Research. *Sustainability*, 11(23), 6751. <https://doi.org/10.3390/su11236751>
2. Paul, P. K., Sinha, R. R., Aithal, P. S., Saavedra, R., Aremu, B., & Mewada, S. (2020). Agricultural Robots: The Applications of Robotics in Smart Agriculture: towards More Advanced Agro Informatics Practice. *Asian Review of Mechanical Engineering*, 9(1), 38–44. <https://doi.org/10.51983/arme-2020.9.1.2472>
3. Bonarini, A. (2020). Communication in human–robot interaction. *Current Robotics Reports*, 1(4), 279–285. <https://doi.org/10.1007/s43154-020-00026-1>
4. Lillerand, T., Liivapuu, O., Ihnatiev, Y., & Olt, J. (2025). Theoretical Study of a Pneumatic Device for Precise Application of Mineral Fertilizers by an Agro-Robot. *AgriEngineering*, 7(10), 320. <https://doi.org/10.3390/agriengineering7100320>
5. Ergen, S. C. (2004, September 10). ZigBee/IEEE 802.15.4 summary. University of California, Berkeley. <https://users.eecs.northwestern.edu/~peters/references/ZigtbeeIEEE802.pdf>
6. Haxhibeqiri, J., De Poorter, E., Moerman, I., & Hoebeke, J. (2018). A Survey of LoRaWAN for IoT: From Technology to Application. *Sensors*, 18(11), 3995. <https://doi.org/10.3390/s18113995>

UDC 504.064.4:628.4:69.059:330.15

**GREENING THE MANAGEMENT OF CONSTRUCTION WASTE  
GENERATED BY WAR-RELATED DESTRUCTION: SORTING,  
RECYCLING, AND THEIR ROLE IN ENSURING RESOURCE  
EFFICIENCY AND SUSTAINABLE RECOVERY IN UKRAINE**

*Melnyk Valentyna, Bastyllo Vladyslav*

*National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine*

Under conditions of large-scale destruction caused by military aggression, the issue of greening construction waste management acquires systemic importance for the recovery of the national economy and the reduction of anthropogenic pressure on the environment. The shortage of primary construction resources, limited logistical capacities, and rising material costs necessitate the active use of secondary raw materials obtained through the recycling of construction debris. According to analytical assessments of infrastructure damage, a significant share of destroyed assets consists of residential buildings, as well as transport, energy, and social infrastructure, which generates substantial flows of mixed construction waste [1].

The specificity of waste generated by explosive destruction lies in its heterogeneity and the high degree of mixing of materials of different origins. Unlike waste from planned demolition, such masses are characterized by deformed structures, contaminated fractions, and potentially hazardous components, which significantly complicate sorting and further processing [2]. Particular attention should be paid to asbestos-containing materials which, in the absence of selective removal, can render large volumes of waste hazardous and therefore require specialized handling in accordance with environmental safety requirements [3].

In accordance with the provisions of the Law of Ukraine «On Waste Management», priority is given to the implementation of the waste hierarchy, which предусматрює prevention of waste generation, preparation for reuse, recycling, other recovery operations, and only as a last resort – disposal. Additionally, the regulatory framework for waste classification is defined by the Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine No. 1102 «On Approval of the Procedure for Waste Classification», which ensures the identification of hazardous components and the selection of appropriate treatment technologies.

An analysis of the material structure of typical buildings indicates that the predominant share of waste consists of reinforced concrete and stone materials, construction mortars, metal elements, as well as wood and polymer-based thermal insulation materials [1]. In the context of destruction, these components are transformed into significant volumes of secondary raw materials suitable for reuse after appropriate processing. In particular, crushed concrete and reinforced concrete can be used as secondary aggregates, metals as feedstock for metallurgical recycling, and brick and ceramic materials in road construction or for manufacturing new building products.

The formation of an effective waste management system for such materials requires a phased organization of processes: from initial site clearance and transportation to treatment facilities, to sorting, temporary storage, preparation for reuse, and final recovery or disposal [2]. A key element of greening this system is the implementation of selective demolition, which minimizes material mixing and improves the quality of secondary resources.

Recycling of construction waste is implemented at several technological levels – from the direct reuse of homogeneous materials to complex processes of mechanical, chemical, and thermal treatment. In practice, the most widespread is secondary recycling, which includes sorting, crushing, and cleaning of materials, ensuring their further use in construction production [2]. At the same time, the development of advanced processing technologies opens up opportunities for deeper transformation of waste into new value-added materials.

The technological implementation of recycling processes requires the use of specialized equipment, including telescopic handlers, mobile and stationary crushing and screening plants, as well as separation and fractionation systems that ensure the production of standardized secondary materials [1]. A complicating factor in the operation of such equipment is its functioning under conditions of high dust pollution.

The application of these solutions contributes not only to reducing landfill volumes but also to the formation of local closed-loop material cycles within the construction sector. From a strategic perspective, the greening of construction waste management aligns with the principles of the circular economy and corresponds to the objectives of the European Green Deal. The transition from a linear «production–consumption–waste» model to a circular model reduces resource dependency, lowers greenhouse gas emissions, and minimizes landfill burdens. For Ukraine, this represents not only a solution to environmental challenges but also the creation of new economic opportunities in the recycling industry.

Thus, the sorting and recycling of construction waste generated as a result of military destruction serve as key instruments for the greening of reconstruction processes. Their systematic implementation ensures increased resource efficiency, reduced environmental risks, and the establishment of a foundation for the sustainable development of Ukraine in the post-war period.

## **REFERENCES**

1. Звіт про прямі збитки інфраструктури від руйнувань внаслідок військових дій станом на листопад 2024 року. – Київ: KSE Institute, 2024.
2. Управління відходами від руйнувань: аналітичний огляд та практичні рекомендації / за ред. міжнародних організацій. – Київ, 2023.
3. Закон України «Про управління відходами» від 20.06.2022 № 2320-IX.
4. Постанова Кабінету Міністрів України №1102 «Про затвердження Порядку класифікації відходів» від 20.12.2023.

УДК: 621.43.038:621.436:629.11

## **НАУКОВО-МЕТОДИЧНІ ЗАСАДИ ОЦІНЮВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ДВОСТУПЕНЕВИХ СИСТЕМ ОЧИЩЕННЯ ПОВІТРЯ ДВИГУНІВ ТЕЛЕСКОПІЧНИХ НАВАНТАЖУВАЧІВ**

*Новицький А.В., Новицький Ю.А., Підвисоцький В.М.*

*Національний університет біоресурсів і природокористування України*

Система очищення повітря двигунів телескопічних навантажувачів характеризується підвищеними вимогами до ефективності фільтрації, що обумовлено специфікою їх експлуатації у запилених умовах будівельного та аграрного виробництва. Для телескопічного навантажувача Manitou MLT-X735LSU застосовується двоступенева система очищення повітря, яка включає зовнішній (первинний) фільтр 563416 та внутрішній (вторинний) фільтр 563415. Така конструктивна схема забезпечує поетапне очищення повітряного потоку, що надходить до двигуна внутрішнього згорання, і є ефективним засобом підвищення його надійності [1].

Аналіз науково-технічних джерел свідчить, що сучасні системи очищення повітря базуються на використанні багатоступеневих фільтраційних елементів із високою ефективністю затримання частинок різного дисперсного складу [2, 3]. Первинні фільтри забезпечують затримання основної маси пилу та механічних домішок, тоді як вторинні виконують функцію доочищення та аварійного захисту двигуна у разі перевантаження або пошкодження основного фільтра. За даними досліджень у галузі експлуатації двигунів внутрішнього згорання, застосування двоступеневих систем дозволяє суттєво знизити інтенсивність абразивного зношування деталей циліндро-поршневої групи та підвищити ресурс двигуна.

В результаті проведеного аналізу встановлено, що зовнішній повітряний фільтр 563416 виконує основну функцію очищення повітря, забезпечуючи затримання до 99 – 99,9 % пилових частинок завдяки значній площі фільтрації та високій пиломісткості. Зовнішній повітряний фільтр 563416 є первинним елементом двоступеневої системи очищення повітря двигунів. Його функціональне призначення полягає у забезпеченні грубого та середнього очищення повітряного потоку, що надходить до двигуна, та сприйнятті основного пилового навантаження в умовах експлуатації. Він працює в умовах максимального пилового навантаження та визначає загальну ефективність системи очищення.

Внутрішній фільтр 563415, який розташований всередині корпусу, виконує функцію тонкого очищення повітря та слугує додатковим бар'єром для дрібнодисперсних частинок, запобігаючи їх проникненню до двигуна, особливо у випадках пошкодження або несвоєчасної заміни первинного елемента. Тип фільтрувального матеріалу: синтетичний або комбінований (високоєфективний). Конструкція передбачає встановлення фільтра всередині первинного елемента, що забезпечує компактність і ефективну взаємодію обох ступенів очищення. Він

виконує такі основні функції: тонке очищення повітря від дрібнодисперсних частинок (до 1–5 мкм); аварійний захист двигуна у разі пошкодження або прориву первинного фільтра; забезпечення стабільності повітряного потоку у впускній системі; зниження інтенсивності абразивного зношування деталей двигуна.

Ефективність функціонування системи визначається рядом параметрів, серед яких ключовими є перепад тиску на фільтрах, ступінь їх забруднення, коефіцієнт очищення повітря, герметичність ущільнень та відповідність геометричних параметрів конструктивним вимогам [3]. Оцінювання технічного стану фільтрів доцільно здійснювати із застосуванням комплексного підходу, що включає інструментальні методи (вимірювання перепаду тиску), аналітичні методи (контроль вмісту механічних домішок у повітрі або мастильному середовищі), а також візуально-діагностичні методи. Важливим є також дотримання регламентів технічного обслуговування з урахуванням реальних умов експлуатації.

Встановлено, що у складних умовах роботи, зокрема за високого рівня запиленості, ресурс первинного фільтра суттєво зменшується, що призводить до підвищеного навантаження на вторинний фільтр і збільшує ризик проникнення абразивних частинок у двигун. Це обумовлює необхідність коригування періодичності технічного обслуговування та впровадження методів діагностування, орієнтованих на фактичний технічний стан фільтрувальних елементів.

Автори наукової роботи [4] зазначають, що система технічного обслуговування і ремонту транспортних машин за фактичним технічним станом дає можливість знизити недовикористаний ресурс фільтрів. Представлена стратегія може бути використаною для реалізації повного ресурсу повітряних фільтрів двигунів та зменшити витрати на технічне обслуговування і ремонт [5].

Таким чином, двоступенева система очищення повітря двигуна телескопічного навантажувача Manitou MLT-X735LSU, реалізована із застосуванням фільтрів 563416 та 563415, забезпечує високий рівень його захисту від забруднень. Рациональна організація технічного обслуговування, що базується на поєднанні регламентного та діагностичного підходів, є визначальним чинником забезпечення надійності та довговічності роботи двигуна.

### Література

1. Новицький А., Ружи́ло З., Карабиньош С., Новицький Ю. Повітряні фільтри для двигунів внутрішнього згорання та особливості їх обслуговування. Agroexpert. 2018. №1 (114). С. 64–67.
2. Manitou Group. Operator's Manual and Maintenance Guidelines for MLT-X735 LSU Telehandler. Ancenis, France, 2020. 150 p.
3. Новицький, Ю. А. Дослідження надійності та періодичності заміни повітряних фільтрів двигунів. Центральнoукраїнський науковий вісник. Технічні науки : наук. зб. - Кропивницький : ЦНТУ, 2025. - Вип. 12(43), ч. 2. - С. 188-195.

4. Аулін В. В. та ін. Оптимальний комплекс операцій технічного обслуговування і ремонту для підвищення надійності вузлів, систем та агрегатів мобільних машин. Центральнoукраїнський науковий вісник. Технічні науки. 2023. Вип. 8(39)\_II. С. 175–189. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8\(39\).2.175-189](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8(39).2.175-189).

5. [Novytskyi A. V.](#), [Bannyi O. O.](#) Statistical analysis of functioning of repair service of Ukraine. Machinery and Energetics. 2021. № 12 (2), pp. 39–47. <https://doi.org/10.31548/machenergy2021.02.039>

УДК 371/378

## **THE COPILOT PROJECT AS AN INNOVATIVE MODEL FOR MODERN HIGHER EDUCATION**

*Romasevych Yuriy, Tsyvenkova Nataliya*

*National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine*

The COPILOT project is a European initiative aimed at transforming higher education institutions into innovation-driven ecosystems, particularly in the field of Sustainable Energy and Clean Technologies (SECT). Its main objective is to strengthen the capacity of universities to support deep-tech entrepreneurship, bridge the skills gap, and foster collaboration between education, research, and industry. The project focuses on training approximately 1,500 students and 550 academic staff, while also contributing to startup creation and the development of green technologies aligned with the EU Green Deal.

The implementation of the COPILOT project is based on a comprehensive approach that integrates education, innovation, and entrepreneurship. One of the key mechanisms is the development of innovation-oriented curricula co-created by partner universities and aligned with real market needs. Additionally, the project introduces a capacity-building framework that includes staff training, mentoring, and the modernization of institutional infrastructure. Another important component is the establishment of strong links with industry through internships, networking, and startup support programs, enabling students and researchers to apply their knowledge in real-world contexts.

Within the framework of the project, a wide range of disciplines is taught, especially at the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine. These courses cover both technological and pedagogical aspects of innovation. For example, courses related to artificial intelligence focus on machine learning, natural language processing, and intelligent systems, as well as their application in education and engineering. Other disciplines include innovative teaching approaches, robotics systems, additive manufacturing, 3D technologies, modern technical systems, and digital twins. These courses provide both theoretical knowledge and practical skills necessary for designing advanced technological solutions and implementing them in professional practice.

The courses are designed for a broad target audience, including students, academic staff, researchers, and industry representatives. Such an inclusive and multidisciplinary approach ensures the development of relevant competencies required by the modern labor market, particularly in the fields of sustainable energy, digital transformation, and innovation-driven entrepreneurship.

The results achieved by the COPILOT project demonstrate its significant impact on higher education and innovation ecosystems. Among the key outcomes are the development of new educational programs, modernization of teaching methods, strengthening cooperation between universities and industry, and the creation of innovation-oriented learning environments. Furthermore, these results are not limited to the duration of the project: they will be actively integrated into existing educational programs, leading to the modernization of their content and structure. This integration will ensure that curricula remain relevant to current technological trends and labor market demands, ultimately enhancing the quality of education.

As a result, the implementation of COPILOT outcomes will elevate educational activities to a higher level by promoting innovation, interdisciplinarity, and practical orientation in teaching and learning processes. It will also contribute to the long-term sustainability of educational reforms and strengthen the role of universities as key drivers of technological progress and socio-economic development.

In conclusion, the COPILOT project represents an effective model for modernizing higher education through the integration of innovation, technology, and entrepreneurship. By combining advanced curricula, practical training, and international cooperation, it prepares a new generation of specialists capable of addressing global challenges in sustainable development and driving technological progress.

УДК 614.82

## **ДОСЛІДЖЕННЯ ІНТЕНСИВНОСТІ НАКОПИЧЕННЯ ВТОМНОГО ПОШКОДЖЕННЯ У ЗРАЗКАХ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ НА ОСНОВІ СТАТИСТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЯСКРАВОСТІ СПЕКЛОГРАМ**

*Войналович<sup>1</sup>О.В., Писаренко<sup>2</sup>Г.Г., Майло<sup>2</sup>А.М., Бялонович<sup>2</sup>А.В.*

*<sup>1</sup>Національний університет біоресурсів і природокористування України*

*<sup>2</sup>Інститут проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН України*

На інтенсивність накопичення пошкодження у деталях мобільної сільськогосподарської техніки визначально впливають умови її експлуатації (силове нерегулярне навантаження, температурні режими роботи деталей, корозійний вплив тощо), то ж прогнозування довговічності (залишкового ресурсу) техніки є складним науково-технічним завданням. Щоб оцінити залишковий ресурс металоконструкції після неконтрольованого накопичення втомного пошкодження інженерної поверхні, запропоновано використовувати критерії, який пов'язує стан поверхні за еволюції циклічної повзучості (нановимірного масштабу) металоконструкції з її експлуатаційною навантаженістю [1].

Щоб контролювати ступінь пошкодження конструкційного матеріалу, відстежують кінетику пошкодження на різних структурних рівнях, застосовуючи структурно-чутливі методи дослідження [2]. Розвиваються нестандартні підходи для дослідження деформаційного рельєфу поверхні, накопиченого під час циклічного навантажування, що створюють нові можливості комплексно досліджувати деформаційну поведінку конструкційних матеріалів [3].

У цій роботі для аналізу кінетики параметрів розсіяної пошкоженості зразків металоконструкцій було використано метод когерентно-оптичного сканування мікрореформованої поверхні зразків [2]. Щоб оцінити зміни параметрів поверхні мікрорельєфу розвинених смуг ковзання (мікропластичних деформацій), сформованого на поверхні зразків для окремих етапів циклічного навантажування, аналізували зміни яскравості спеклограм відбитого від поверхні когерентного проміння, які реєструють на фотодіодній матриці спеціального вимірювального пристрою. Для аналізу кількісних характеристик розподілу спеклів яскравості використовували стандартні програми цифрового оброблення статистичних даних, застосовуючи методичні підходи щодо шорсткості інженерної поверхні згідно з вимогами ISO 25178: Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface texture: areal.

Для дослідження кінетики втомного пошкодження у цій роботі випробовували плоскі сталеві зразки циклічним згином з частотою навантажування 13 кГц у діапазоні  $1 \cdot 10^5 - 5 \cdot 10^7$  циклів. Амплітуду коливань зразків під час циклічного навантажування підтримували сталою на частоті резонансу коливальної системи до моменту зниження частоти резонансу на 3 % від початкової частоти втомного випробування.

Ступінь локалізації втомного пошкодження оцінювали за змінами зображення спеклограм здеформованої поверхні, що корелюють з характеристикою розподілу середньоквадратичного значення амплітуди виміряного значення локальних максимумів (мінімумів) рельєфу поверхні у зоні максимальних деформацій зразка.

Кореляційні залежності ступеню накопичення циклічної пошкоженості досліджуваних зразків з екстремумами здеформованого рельєфу поверхні було побудовано за результатами визначення статистичних характеристик розподілу яскравості зображення спеклструктури здеформованої поверхні зразків.

Зміни мікрорельєфності поверхні оцінювали за параметрами спеклограм, які корелюють зі змінами амплітуд розмаху локальних максимумів мікрорельєфу поверхні зразка у зоні максимальних амплітуд циклічних напружень. Контурні топограми комп'ютерно оброблених спеклограм, що відображають відносну зміну площі локальних піків та впадин рельєфу поверхні зразка на різних стадіях навантажування, показано на рис. 1.

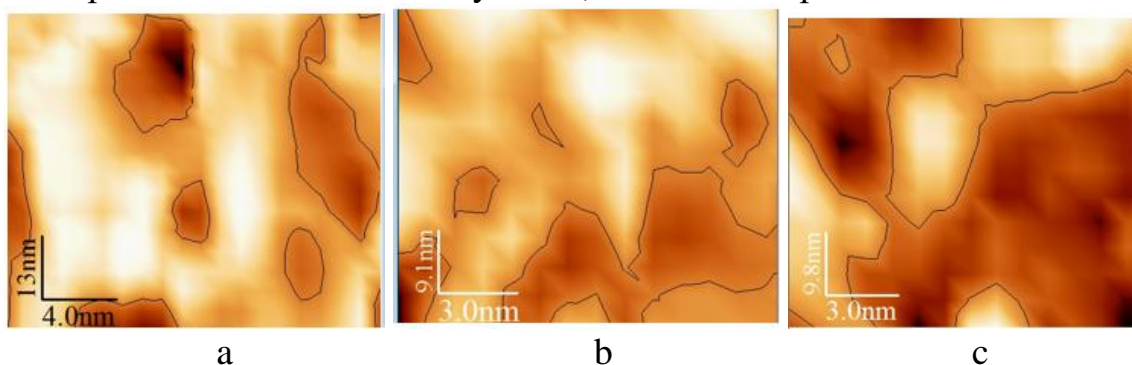


Рис. 1. Комп'ютерно оброблені спеклові зображення поверхні зразка за різної кількості циклів навантажування з позначенням ліній контуру рельєфу однакових амплітуд (світла область відповідає області піків рельєфу, темна – області впадин рельєфу; площу світлої області  $S$  оцінено у відсотках щодо площі загальної вибірки спеклів):  $a - N = 10^3$  цикл,  $S = 72,9\%$ ;  $b - N = 10^5$  цикл,  $S = 70,7\%$ ;  $c - N = 10^6$  цикл,  $S = 39,31\%$ .

Для оцінення кількісного впливу тривалості навантажування на кінетику пошкоженості запропоновано використовувати індекс деформування  $K$ , який визначають за формулою

$$K = [-I_{min}/I_{max}] \cdot 100\%.$$

де  $I_{max}$  – амплітуда локального максимуму,  $I_{min}$  – амплітуда локального мінімуму на спеклових зображеннях.

На рис. 2 у координатах: вісь абсцис – поточна довговічність у відсотках (до моменту зниження частоти резонансу на 3% від початкової частоти втомного випробування зразка); вісь ординат – індекс деформування поверхні зразка металоконструкції щодо початкового стану поверхні, представлено графіки, які характеризують змінення площі окреслених на топограмах зон піків та впадин рельєфу мікропластичного деформування, у разі збільшення тривалості циклічного навантажування до виникнення макротріщини.

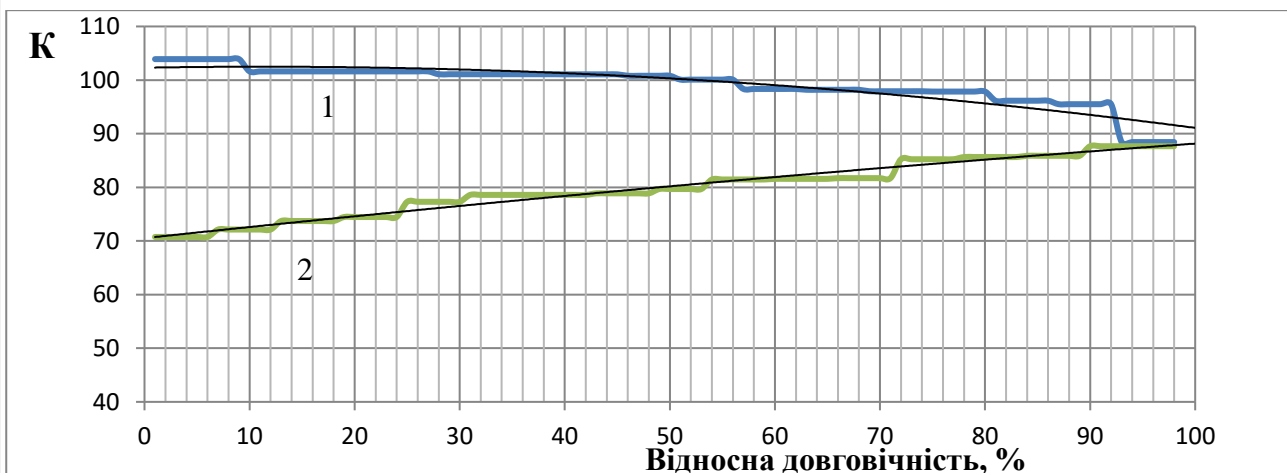


Рис. 2. Кінетичні залежності параметрів деформаційного рельєфу зразків аустенітної сталі за циклічного навантажування у разі досягнення кількості циклів  $N = 2 \cdot 10^6$  цикл (графік 1 – відповідає пікам рельєфу, графік 2 – впадинам)

Точка перетину графіків 1 і 2 на рис. 2 відповідає тривалості циклічного навантажування  $N_{lim}$ , коли сумарні площі піків і впадин топограм (площі екструзій та інтрузій zdeформованого рельєфу) досягають співмірних розмірів, що характеризує кількісно стан пластичності елементів поверхні, zdeформованих у взаємно-протилежних напрямках щодо площини інженерної поверхні. Вказана точка є межею вичерпання мікропластичного деформування поверхні, що свідчить про вичерпання пластичності zdeформованих елементів поверхні та про перехід мікропластичного деформування поверхні металоконструкції до наступної стадії поширення втомної макротріщини.

### Література

1. Писаренко Г.Г., Поліщук В.М., Войналович О.В. та ін. Методологічні засади сучасних підходів до оцінення опору втомі конструкційних матеріалів за дискретної природи втомного навантажування: монографія. Київ: НУБіП України, 2025. 122 с.
2. Georgy Pysarenko, Oleksandr Voinalovych, Andriy Mailo, Stepan Pysarenko. A methodical approach to determining the damage characteristics of cyclically loaded samples of metal structures. *Machinery & Energetics*. 2022. Vol. 13, No. 4. pp. 28-37.
3. Писаренко Г.Г., Войналович О.В., Бялонович А.В. та ін. Характеристика пошкодженості конструкційної сталі за багатоциклової втоми на межі непружного деформування. *Проблеми міцності*, 2024. № 6. С. 11-20.

УДК 656

## **ТРАНСПОРТНІ СИСТЕМИ ЯК СКЛАДНІ ДИНАМІЧНІ СИСТЕМИ: АДАПТАЦІЯ ДО ЗОВНІШНІХ ЗБУРЕНЬ ТА ОСВІТНІ ІМПЛІКАЦІЇ**

*Мацюк Н.О.*

*Національний університет біоресурсів і природокористування України*

Транспортна система є однією з ключових складових економіки будь-якої країни. Неможливо уявити сучасну розвинену державу без належного рівня розвитку транспортної інфраструктури. У зв'язку з цим вивчення теорії транспорту, транспортних процесів і технологій функціонування транспортних систем виступає не лише базовою навчальною дисципліною, а й важливим професійно формувальним чинником для здобувачів освіти за спеціальностями J8 «Автомобільний транспорт» та «Транспортні технології (за видами)».

В умовах воєнного стану Україна продовжує забезпечувати функціонування та розвиток усіх галузей економіки, зокрема транспортної. Сучасний транспорт являє собою складну динамічну систему, що об'єднує різні види магістрального транспорту з притаманними їм технологічними процесами. Така система чутливо реагує як на внутрішні зміни, так і, передусім, на впливи зовнішнього середовища [1], [2].

Навчальна дисципліна «Основи теорії транспортних процесів і систем» відображає динамічний характер розвитку транспортної галузі, її здатність до адаптації в умовах нових викликів, зокрема пов'язаних із пошкодженням транспортної інфраструктури внаслідок воєнних дій.

У процесі викладання дисципліни виникають певні труднощі, зумовлені швидкою зміною зовнішніх умов та трансформацією реальних транспортних процесів. Транспортна система перебуває у постійному розвитку, оперативно реагує на виклики та адаптується до них у режимі реального часу. Це зумовлює необхідність поєднання класичних академічних підходів із актуалізацією навчального матеріалу відповідно до сучасних умов функціонування транспортної системи [3], [4], [5].

Суттєві трансформації спостерігаються як у пасажирських [6], [7], [8], [9], так і у вантажних перевезеннях [3], [10], [11], [12]. Транспортна система України демонструє високий рівень адаптивності в умовах війни, що проявляється у швидкому переплануванні маршрутів, використанні альтернативних логістичних шляхів, підвищенні мобільності складських рішень, а також активному впровадженні цифрових технологій. Зокрема, застосування штучного інтелекту та технологій Big Data сприяє підвищенню якості обслуговування, оптимізації витрат і зростанню ефективності транспортних процесів.

Інтеграція сучасних цифрових інструментів у навчальний процес сприяє формуванню компетентного фахівця, здатного ефективно реагувати на внутрішні та зовнішні виклики транспортної системи та застосовувати набуті знання на практиці.

Таким чином, сучасні умови відкривають для викладачів можливості не лише здійснювати навчальний процес, а й проводити прикладні дослідження на основі реальних кейсів, формувати альтернативні сценарії розвитку транспортної галузі та обґрунтовувати перспективні управлінські рішення.

### Література

1. V. Matsiuk, “A study of the technological reliability of railway stations by an example of transit trains processing,” *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 1, no. 3–85, pp. 18–24, 2017, doi: 10.15587/1729-4061.2017.91074.

2. V. Matsiuk, V. Opalko, L. Savchenko, O. Zagurskiy, and N. Matsiuk, “Optimisation of transport and technological system parameters of an agricultural enterprise in conditions of partial uncertainty,” *Naukovij žurnal «Tehnika ta energetika»*, vol. 14, no. 3, pp. 61–71, Jul. 2023, doi: 10.31548/machinery/3.2023.61.

3. V. Matsiuk, O. Galan, A. Prokhorchenko, and V. Tverdomed, “An Agent-Based Simulation for Optimizing the Parameters of a Railway Transport System,” in *ICTERI-2021, : Main Conference, PhD Symposium, Posters and Demonstrations, 2021*. [Online]. Available: <https://ceur-ws.org/Vol-3013/20210121.pdf>

4. O. Zagurskiy, L. Savchenko, I. Makhmudov, and V. Matsiuk, “ASSESSMENT OF SOCIO-ECOLOGICAL EFFICIENCY OF TRANSPORT AND LOGISTICS ACTIVITY,” *Engineering for Rural Development*, vol. 21, pp. 543–550, 2022, doi: 10.22616/ERDEV.2022.21.TF182.

5. . Zaporozhets, M. Katsman, V. Matsiuk, and V. Myronenko, “STUDY OF THE FUNCTIONING OF A MULTI-COMPONENT AND MULTI-PHASE QUEUING SYSTEM UNDER THE CONDITIONS OF THE IMPLEMENTATION OF DISRUPTIVE TECHNOLOGIES IN AIR TRANSPORTATION,” *Reliability: Theory and Applications*, vol. 19, no. 2, pp. 576–593, Jun. 2024, doi: 10.24412/1932-2321-2024-278-576-593.

6. W. Zhou, W. Fan, X. You, and L. Deng, “Demand-Oriented Train Timetabling Integrated with Passenger Train-Booking Decisions,” *Sustainability 2019*, Vol. 11, Page 4932, vol. 11, no. 18, p. 4932, Sep. 2019, doi: 10.3390/su11184932.

7. J. F. Due, “The evolution of suburban and radial rail passenger transportation in the United States,” *The Quarterly Review of Economics and Finance*, vol. 37, no. 2, pp. 469–489, Jun. 1997, doi: 10.1016/S1062-9769(97)90038-7.

8. M. Patel, S. B. Patel, D. Swain, and R. Mallagundla, “Enhancing Accuracy in Hourly Passenger Flow Forecasting for Urban Transit Using TBATS Boosting,” *Modelling 2025*, Vol. 6, Page 32, vol. 6, no. 2, p. 32, Apr. 2025, doi: 10.3390/MODELLING6020032.

9. Y. Kirillova and Y. Meleshenko, “Development of an economic and mathematical model of loading a freight and passenger ferry,” *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 3, no. 4–81, pp. 28–37, 2016, doi: 10.15587/1729-4061.2016.71215.

10. V. Matsiuk and H. Vasilova, “Rational areas of combined transport technologies application for container delivery on the Caspian-Black sea route of the

new Silk Road,” *Transport Economics and Logistics*, 2018, doi: 10.26881/etil.2018.76.10.

11. V. Myronenko and V. Matsiuk, “Rational distribution of the high-speed railway capacity between trains of various categories,” *Transport Economics and Logistics*, 2018, doi: 10.26881/etil.2018.76.07.

12. Y. Khomenko, V. Matsiuk, A. Okorokov, and O. Gorobchenko, “Development of a simulation model of grain delivery in global supply chains,” *Naukovì dopovidì Nacional'nogo unìversitetu bìoresursiv ì prirodozoristuvannâ Ukraïni*, vol. 20, no. 5, pp. 21–35, Oct. 2024, doi: 10.31548/DOPOVIDI/5.2024.21.

UDK 631.33:629.113:621.43:658.7

## **MODERN ASPECTS OF RELIABILITY AND SERVICE LIFE OF OIL FILTERS IN INTERNAL COMBUSTION ENGINES**

*Melnyk Valentyna, Novitskiy Andriy, Lisetskyi Vitalii*

*National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine*

Oil filters play a crucial role in ensuring the stable operation of internal combustion engines by removing abrasive particles, wear products, and chemical contaminants, which directly affects the durability and efficiency of engine assemblies. Their hydraulic function contributes to pressure stabilization and the prevention of erosive processes in the lubrication system [1, 2].

Contamination of lubricating oil with particles sized 5–25  $\mu\text{m}$  may account for up to 70% of wear in the crank-and-connecting-rod mechanism. Exceeding cleanliness standards increases bearing wear intensity by 1.8–2.3 times. Experimental data indicate a reduction in engine service life by 12–18% when contaminated oil passes through a defective filter [1, 2, 5].

Abrasive wear arises from the circulation of solid particles, adhesive wear results from the breakdown of the lubricating film under pressure drop conditions, and corrosion-mechanical wear is caused by the accumulation of acidic by-products. According to standards, an increase of one contamination class level raises bearing

wear rates by 1.5 times, while the use of filters with a low particle retention coefficient increases wear of the cylinder–piston group by 25–40% [1, 4, 6].

The main sources of contamination include fuel combustion products, wear particles, atmospheric dust, and residues of oxidized oil, with a limiting concentration of mechanical impurities of 0.02–0.04%. Deterioration of the oil cleanliness class leads to a multiple increase in wear, as demonstrated by empirical data on the relative wear rate of bearings [6, 7].

Filter service life depends on design factors (type, surface area, material), operational conditions (load regime, temperature, material quality), and logistical factors (maintenance intervals, forecasting). Temperatures above 120 °C cause material degradation, while a pressure drop exceeding 0.15–0.25 MPa activates bypass valves, allowing unfiltered oil to enter the system [3, 4, 7].

The main failure modes include clogging (46–52%), element destruction (18–24%), valve failures (12–16%), and loss of tightness (6–10%), which leads to up to 30% of premature bearing failures. Monitoring is performed through differential pressure control, contamination analysis, ferrography, and vibroacoustic diagnostics, with a transition toward condition-based maintenance in accordance with standards [3, 4, 6, 7].

Key challenges include the use of non-certified filters, violations of maintenance regulations, lack of monitoring, and logistical disruptions. The transition to logistics-based resource management grounded in residual service life diagnostics enables optimization of engine reliability [3, 7].

## References

1. Mang T., Dresel W. *Lubricants and Lubrication*. 2nd ed. Weinheim : Wiley-VCH, 2007. 827 p.
2. Wakeman R. J., Tarleton E. S. *Solid/Liquid Separation: Principles of Industrial Filtration*. 2nd ed. Oxford : Elsevier, 2005. 539 p.
3. Wang X., Li Y. Prediction of remaining useful life of filters based on pressure drop. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2018. Vol. 101. P. 326–339. DOI: 10.1016/j.ymssp.2017.09.016.
4. Zhang L., Zhang J. Study on clogging characteristics of oil filters. *Tribology International*. 2019. Vol. 134. P. 290–298. DOI: 10.1016/j.triboint.2019.02.017.
5. Jardine A. K. S., Lin D., Banjevic D. A review on machinery diagnostics and prognostics. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2006. Vol. 20. P. 1483–1510. DOI: 10.1016/j.ymssp.2005.09.012.
6. Mobley R. K. *An Introduction to Predictive Maintenance*. 2nd ed. Oxford : Elsevier, 2002. 440 p.
7. ISO 17359:2018 *Condition monitoring and diagnostics of machines – General guidelines*. Geneva : ISO, 2018.

УДК 621.873.3:531.3:001.891.5

## **ПЛАНУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ДИНАМІКИ РУХ ЕЛЕМЕНТІВ ЛАБОРАТОРНОЇ УСТАНОВКИ БАШТОВОГО КРАНА**

*Ромасевич Ю.О., Великоіваненко Д.І.*

*Національний університет біоресурсів і природокористування України*

Ефективне керування баштовим краном потребує точного планування траєкторії переміщення вантажу з мінімізацією його розгойдування. Для верифікації алгоритмів керування та оцінки динамічних характеристик системи розроблено програму фізичного експерименту на лабораторній моделі крана. Метою є перевірка алгоритму планування траєкторії, дослідження поведінки системи при різних масах вантажу та оцінка амплітуди коливань вантажу у процесі руху.

Реєстрація даних здійснюється за допомогою 8-канальної вимірювальної системи. Вимірювані величини охоплюють: положення (координати) візка на стрілі – 2 канали (енкодери); кут повороту стріли – 2 канали; кут відхилення вантажу від вертикалі у двох площинах (у площині стріли та перпендикулярно до неї) – 2 канали; струм електродвигуна приводу – 1 канал. Сукупність цих параметрів дозволяє відтворити повну кінематичну картину руху вантажу та оцінити енергетичні витрати приводу.

Як незалежні фактори обрано довжину підвісу вантажу (1,0 м та 1,5 м) і масу вантажу (13 кг та 24 кг). Рух візка обмежено половиною довжини стріли ( $150 \pm 10$  см). Повний план включає 4 сценарії руху, кожен з яких реалізується при 4 комбінаціях факторів, що у сукупності дає 16 дослідів. Для підвищення надійності результатів кожен дослід повторюється 4 рази – загалом 64 реалізації.

Кожен дослід виконується в такій послідовності: встановлення заданої довжини канату та підвішування відповідної ваги; розстановка перешкод; позиціонування візка у початкову точку; запуск системи керування через шафу з частотним перетворювачем; виконання руху за заданою траєкторією. У процесі руху безперервно реєструються положення візка, кути відхилення вантажу і струм двигуна. Після завершення дослідів дані зберігаються для подальшої обробки в середовищі Wolfram Cloud.

Таким чином, отримані експериментальні дані дадуть змогу кількісно оцінити ефективність алгоритму придушення коливань вантажу, встановити залежність динамічних характеристик системи від маси вантажу та довжини підвісу, а також верифікувати математичну модель крана для подальшого вдосконалення алгоритмів оптимального керування.

УДК 331.45 (075.8)

## **ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ «ДЕРЕВО ВІДМОВ» ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ ДОКОРІННИХ ПРИЧИН ТРАВМАТИЗМУ СЕРЕД ПРАЦІВНИКІВ СІЛЬСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА**

*Марчишина Є.І., Зубок Т.О.*

*Національний університет біоресурсів і природокористування України*

Сільське господарство належить до галузей економіки з підвищеним рівнем професійного ризику. За даними міжнародної статистики, щорічно у світі в аграрному секторі працює понад 1,3 млрд осіб, при цьому рівень виробничого травматизму у цій сфері стабільно перевищує середні показники промисловості. За оцінками International Labour Organization, близько 170 тис. смертельних випадків на виробництві щороку припадає саме на сільське господарство.

В Україні, відповідно до статистичних звітів State Labor Service of Ukraine, аграрний сектор входить до п'ятірки найтравмонебезпечніших галузей, де частка нещасних випадків становить приблизно 9–12 % від загальної кількості виробничих травм. Серед основних причин травматизму фіксуються експлуатація технічно несправної сільськогосподарської техніки, недостатній рівень підготовки працівників, порушення технологічних процесів та недосконалість системи управління охороною праці.

Для ідентифікації докорінних причин виробничого травматизму ефективним інструментом є метод «Дерево відмов» (Fault Tree Analysis, FTA), який належить до аналітичних методів системної безпеки. Метод було розроблено у 1960-х роках у межах досліджень надійності складних технічних систем, зокрема в компанії Bell Telephone Laboratories, і згодом він набув широкого застосування у різних галузях, включаючи енергетику, транспорт та аграрне виробництво. Суть методу полягає у побудові логічної ієрархічної моделі подій, що призводять до небажаного результату, де кожна подія пов'язується логічними операторами «І» та «АБО» з іншими подіями нижчого рівня. Такий підхід дозволяє системно дослідити взаємозв'язки між технічними, організаційними та людськими чинниками.

Застосування методу «Дерево відмов» у сфері охорони праці в аграрному виробництві передбачає визначення верхньої події, тобто небажаного результату. У контексті дослідження такою подією може виступати травмування працівника під час виконання польових робіт. На основі статистичних даних було встановлено, що приблизно 38 % нещасних випадків у сільському господарстві пов'язані з використанням мобільної техніки, зокрема тракторів та комбайнів. Ще 24 % випадків виникають під час роботи з навісним обладнанням, а близько 18 % - унаслідок падіння або контакту з рухомими механізмами. Інші 20 % пов'язані з впливом зовнішніх факторів, включаючи погодні умови, втому працівників або порушення організації виробничого процесу.

Побудова «дерева відмов» дозволяє деталізувати структуру причинності травматичних подій. Наприклад, травмування оператора трактора може бути

результатом перекидання машини, яке, у свою чергу, зумовлюється низкою факторів: перевищенням швидкості руху, нерівністю рельєфу, несправністю гальмівної системи або недостатньою кваліфікацією оператора. Імовірнісний аналіз показує, що при відсутності системи технічного контролю ризик відмови окремих вузлів техніки може зрости до 0,12, тоді як регулярне технічне обслуговування здатне знизити цей показник до 0,03. Аналогічно людський фактор відіграє значну роль у формуванні небезпечних ситуацій: дослідження свідчать, що до 45 % нещасних випадків відбуваються через порушення інструкцій з охорони праці або недостатній рівень навчання персоналу.

Використання методу «Дерево відмов» також дає змогу проводити кількісну оцінку ризику. Якщо ймовірність відмови технічного елемента становить 0,05, а ймовірність помилки оператора - 0,08, то сумарна ймовірність виникнення небезпечної події при логічному операторі «АБО» може досягати 0,126. Таким чином, системний аналіз дозволяє визначити критичні елементи, усунення або модернізація яких найефективніше знижує ризик травматизму. У практиці управління охороною праці результати такого аналізу можуть використовуватись для оптимізації програм навчання працівників, удосконалення технічного обслуговування машинно-тракторного парку та впровадження сучасних систем моніторингу безпеки.

Ефективність застосування методу підтверджується результатами досліджень у галузі управління ризиками. У господарствах, де впроваджено системний аналіз причин аварій із використанням ФТА, рівень виробничого травматизму знижується в середньому на 20–30 % протягом перших трьох років. Це пов'язано з можливістю ідентифікації прихованих організаційних недоліків, які часто залишаються поза увагою під час традиційного розслідування нещасних випадків.

Отже, метод «Дерево відмов» є ефективним інструментом аналізу причин виробничого травматизму у сільському господарстві. Його використання дозволяє системно дослідити взаємозв'язок між технічними, організаційними та людськими факторами, визначити найкритичніші елементи виробничого процесу та здійснити кількісну оцінку ризиків. Впровадження такого підходу в практику управління охороною праці сприятиме зниженню рівня травматизму, підвищенню безпеки працівників та ефективності аграрного виробництва.

### Література

1. Ericson C. Fault Tree Analysis Primer. CreateSpace Independent Publishing Platform, 2011.
2. Dhillon B. Engineering Safety: Fundamentals, Techniques and Applications. CRC Press, 2015.
3. Mannan S. Lees' Loss Prevention in the Process Industries. Elsevier, 2012.
4. Статистичний звіт про виробничий травматизм в Україні. State Labor Service of Ukraine, 2023.
5. Safety and health in agriculture. International Labour Organization, Geneva, 2022.

UDC 631.365.22

## INVESTIGATION OF OPERATING MODES OF AN AEROTROUGH GRAIN DRYER

*Kotov B.I.<sup>1</sup>, Stepanenko S.P.<sup>2</sup>, Kalinichenko R.A.<sup>3</sup>, Popadyuk I.S.<sup>2</sup>*

*<sup>1</sup>Educational Institution "Podillia State University"*

*<sup>2</sup>Institute of Mechanics and Automation of Agroindustrial Production, NAAS of Ukraine;*

*<sup>3</sup>Separated Subdivision of NUBiP of Ukraine "Nizhyn Agrotechnical Institute."*

One of the primary directions for improving seed quality is the optimization of drying technology in a suspended state [1, 2]. The use of aerodynamic devices in this process has demonstrated its efficiency [3].

We have developed an aerotrough dryer [4] operating as follows. At the first drying stage, seeds with an initial moisture content of 27 - 30 % are fed into the shaft through a loading hopper onto the gas-distribution grate of the air-supply box. The material layer height, specific load on the grate, and drying agent velocity are selected to form a gravitationally moving layer chamber. Within this chamber, seeds are dried to a moisture content of 25 - 27 % under the influence of a heat carrier stream at 65 - 75 °C supplied through the gas-distribution grate of the upper channel of the box, and then conveyed via a chute to the second drying stage - a chamber with alternating pseudo-fluidized and falling layers.

At the second stage, the drying material is positioned between the gas-distribution grates of oppositely arranged boxes. Exposure to converging streams of the heat carrier forms an alternating pseudo-fluidized and falling layer that moves toward the discharge hopper along a trajectory approximating a sinusoid with straight extremal segments. When the grain flow transitions from one air-supply box to another, layer inversion and uniform mixing of seeds occur.

To determine the operating modes of the shaft for drying seed, food, and fodder grains, the dryer was integrated into a conventional grain cleaning and drying line. The line comprised a receiving section with aerotroughs and bucket elevators, a bulk cleaner, a shaft-aerotrough grain dryer, a grain cleaning machine, storage bins, a universal furnace unit TAU-0.75, and a cyclone.

During experiments, the temperature of the drying agent ( $t$ , °C) was regulated by adjusting the fuel consumption in the TAU-0.75 unit. The performance of the discharge device was varied by changing the rotor speed of the rotary valve ( $n$ ,  $\text{min}^{-1}$ ). Through the cut-off method, the throughput of the installation was measured and converted to the nominal dryer capacity ( $W$ , planned, t/h). The flow rate of the drying agent ( $G$ ,  $\text{m}^3/\text{s}$ ) was set using inlet dampers in each channel and monitored via dynamic pressure. Specific energy consumption ( $q_e$ , MJ/kg of evaporated moisture) was determined in accordance with industry standard recommendations.

The results demonstrated that, depending on the selected operating parameters, the actual heat consumption for evaporating 1 kg of moisture in the shaft-aerotrough dryer module ranged from 11 to 57 MJ.

An analysis of the causes of high specific energy consumption indicated unsatisfactory operation of the dryer's gas-distribution system. A significant portion of unused heat was lost from the shaft along with the drying agent through the lower grates of the integrated aerotroughs. Consequently, solid partitions were installed to replace the perforated grates, and an active overflow threshold was introduced at the end of each drying box to remove spilled grain [5-7].

To reduce aerodynamic resistance, gas-exhaust boxes replaced the perforated shaft walls. These structural modifications significantly improved the reliability of the technological process and reduced specific energy consumption.

The determination of optimal operating modes for drying seed, food, and fodder grains in the modernized aerotrough dryer shaft was performed using a graph-analytical method. Two-dimensional response surface sections, reflecting changes in actual specific energy consumption and seed germination in response to technological factors, were generated using a PC and superimposed in corresponding scales and coordinates [8, 9].

The selection of boundary values for technological factors during seed drying was guided by national standards for sowing quality (germination and moisture content). For soft wheat (winter and spring), a reduction in germination of up to 90 % is acceptable, and final moisture should be 14 - 17 %. These criteria correspond to the following operational parameters:  $G = 0.76 - 0.82$  m/s;  $t = 58.0 - 64.4$  °C;  $n = 2.5 - 3.2$  min<sup>-1</sup>.

Under this mode for a single shaft: specific energy consumption  $q_e = 18 - 22$  MJ/kg of evaporated moisture; possible germination change  $\Delta G = 0 - 10$  %; planned productivity = 0.6 - 0.7 t/h.

For food (fodder) grain drying:  $G = 0.97 - 1.03$  m/s;  $t = 58.0 - 64.4$  °C;  $n = 1.8 - 2.08$  min<sup>-1</sup>. Minimum specific energy consumption  $q_e = 14 - 18$  MJ/kg of evaporated moisture; germination variation  $\Delta G = 0 - 15$  %; planned productivity = 0.70 - 1.1 t/h.

It should be noted that gluten quality during drying under these regimes remains unaffected since the grain does not heat above 70 °C.

Analysis of the operation of a single shaft of the aerotrough dryer demonstrated that the requirements for drying quality were met. The uniformity of wheat drying in the seed regime was  $-0.60\% \pm 1.74\%$ , and in the food regime  $-0.02\% \pm 1.58\%$ . No reduction in seed germination or gluten content was observed after storage.

The heat required to evaporate 1 kg of moisture was 5591 kJ. Fuel consumption was 13.6 kg/t in the seed regime and 10.1 kg/t in the food regime, with corresponding productivity of 2.18 t/h and 3.9 t/h.

## References

1. Kotov B., Stepanenko S., Tsurkan O., Hryshchenko V., Pantsyr Y., Garasymchuk I., Spirin A, & Kupchuk I. (2023) Fractioning of grain materials in the vertical ring air channel during electric field imposition, *Przełąd Elektrotechniczny* 1 (2023), 100-104. <https://doi:10.15199/48.2023.01.19>
2. Kaletnik H., Solona O., Kotov B., Stepanenko S., Shvidia V., Kalinichenko R., Tverdokhlib I., & Polievoda Y. (2024) The usage of the elemental base of the

vibratory mill with the spatial circulation movement of material to create drying rig. *Przeglad Elektrotechniczny*. 2024. Vol. 100, № 3. P. 232-237. <https://doi.org/10.15199/48.2024.03.41>

3. B. Kotov, R. Kalinichenko, S. Stepanenko, V. Lukach, V. Hryshchenko, A. Kuzmych, Y. Pantsyr, I. Garasymchuk, & V. Vasylyuk. (2025) Implementation of energy-saving modes for electro-radiation drying of oil-containing material using automation tools. *Informatyka, Automatyka, Pomiarzy W Gospodarce I Ochronie Środowiska*, 15(3), 29–32. <https://doi.org/10.35784/iapgos.6986>

4. V. Shvydia, S. Stepanenko, A. Kuzmych, & I. Popadiuk. (2025) Justification of vacuum parameters for drying wet seed. *ENGINEERING FOR RURAL DEVELOPMENT*. Proceedings, Volume 24, May 21-23, 2025 Jelgava, Latvia. p. 1112-1118. <https://doi.org/10.22616/ERDev.2025.24.TF284>

5. Shvidia, V.O., Stepanenko, S.P., Kotov B.I., Spirin A.V., & Kucheruk V.Yu. (2022) Influence of vacuum on drying of seeds of grain crops *Herald of Karaganda University*. "Physics" series. № 3(107)/2022– p. 90-98. <https://doi:10.31489/2022PH3/90-98>

6. B. Kotov, R. Kalinichenko, Y. Pantsyr, & S. Stepanenko. (2023) Mathematical modeling of the grain cooling process in installations with radial air supply. *Bulletin of Lviv National Environmental University. Series Agroengineering Research*, 2023 (27), 101–107. <https://doi.org/10.31734/agroengineering2023.27.101>

7. Aneliak M., Kuzmych A., Stepanenko S., & Lysaniuk V. (2023) Study of the process of threshing leguminous grass seeds with a drum-type threshing device. *INMATEH - Agricultural Engineering*, 71 (2023), No. 3, 83-92. <https://doi.org/10.35633/inmateh71-06>

8. S. Stepanenko, B. Kotov, A. Kuzmych, M. Aneliak, D. Volyk, V. Melnyk, & R. Kalinichenko. (2025) Mathematical modeling of grain movement dynamics in the processes of air-centrifugal separation of grain material. *Journal of Central European Agriculture*, 2025, 26(2), p.383-393. <https://doi.org/10.5513/JCEA01/26.2.4301>

9. Stepanenko, S., Kuzmych, A., Borys, A., Dnes, V., Kharchenko, S., Rogovskii, I., Golub, G., Berezovyi, M., & Lutsiuk, A. (2025). Substantiating the YOLO11 architecture for determining the fractional composition of winter wheat grain mixtures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(2 (136), 81–92. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.338124>

УДК 624.072.2 : 534.1

## МОДЕЛЮВАННЯ КОЛИВАНЬ НЕСКІНЧЕННИХ ПЕРІОДИЧНИХ БАЛОК ПІД ДІЄЮ ГАРМОНІЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ АЛЬТЕРНАТИВНИМ ДО ТЕОРІЇ ФЛОКЕ МЕТОДОМ

*Куценко<sup>1</sup> А.Г., Куценко<sup>2</sup> О.Г., Бондар<sup>1</sup> М.М.*

*Національний університет біоресурсів і природокористування України  
Київський національний університет імені Тараса Шевченка*

У представленій роботі замість аналізу напруженого стану окремого періоду, як це зазвичай робиться за теорією Флоке [1], розглядається вся область нескінченної однорідної балки з періодичними шарнірними опорами. Математична постановка задачі базується на застосуванні функції впливу гармонічно змінної у часі зосередженої поперечної сили одиничної амплітуди:

$$w^*(x) = \frac{1}{4p^3 EJ} \left( e^{-p|x|} - ie^{ip|x|} \right), \quad (1)$$

де  $p = \sqrt{\omega/c}$ ,  $c = \sqrt{EJ/\rho A}$  —  $E$ ,  $\rho$  — відповідно модуль пружності та густина матеріалу балки,  $A$ ,  $J$  — відповідно площа та момент інерції поперечного перерізу балки,  $\omega$  — колова частота коливань балки.

Задача зводиться до знаходження амплітуд реакцій  $P_n$ ,  $n \in Z$  у шарнірах, що визначаються з умови відсутності у них прогинів. У якості навантаження виступає гармонічно змінна у часі поперечна сила амплітудою  $P$ , прикладена посередині першого прольоту ( $n=1$ ). На основі принципу суперпозиції умови в шарнірах записуються у вигляді нескінченної системи лінійних алгебраїчних рівнянь різницевого типу.

$$\sum_{k=-\infty}^{\infty} P_k \left( e^{-|n-k|pa} - e^{i|n-k|pa} \right) = -P \left( e^{-(n+1/2)pa} - e^{i(n+1/2)pa} \right), \quad n \in Z, \quad (2)$$

де  $a$  — довжина періоду балки (відстань між сусідніми шарнірами).

Система (2) відноситься до різницевих, тобто таких, індекси  $k$  та  $n$  у коефіцієнтах якої входять лише у вигляді різниці  $n-k$ . Для забезпечення збіжності відповідних рядів частотний параметр  $p$  розглядається як комплексне число з малою уявною частиною, яка фізично відповідає силам внутрішнього тертя у матеріалі балки.

Для знаходження розв'язку систем типу (2) застосовують перетворення Лорана [2]. Розв'язок системи шукається через перехід у простір образів на одиничному колі комплексної площини, де згортка послідовностей перетворюється на добуток їх образів.

Застосовуючи перетворення Лорана

$$A(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} a_k t^k, \quad C(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_k t^k, \quad P(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} P_k t^k, \quad (3)$$

де  $a_n = e^{-|n|pa} - e^{i|n|pa}$ ,  $c_n = -P(e^{-(n+1/2)pa} - e^{i(n+1/2)pa})$ , у комплексній площині  $t$  отримуємо функціональне рівняння на одиничному колі:

$$A(t)P(t) = C(t), \quad |t| = 1. \quad (4)$$

Провівши нескладні перетворення, в основу яких покладено формулу для суми членів геометричної прогресії, для коефіцієнта та правої частини рівняння (4) знайдемо явні вирази:

$$A(t) = \frac{2t \sin(pa)}{1 - 2t \cos(pa) + t^2} - \frac{2t \operatorname{sh}(pa)}{1 - 2t \operatorname{ch}(pa) + t^2}, \quad (5)$$

$$C(t) = -2P \left[ \frac{(1+t) \sin(pa/2)}{1 - 2t \cos(pa) + t^2} - \frac{(1+t) \operatorname{sh}(pa/2)}{1 - 2t \operatorname{ch}(pa) + t^2} \right].$$

Остаточні значення амплітуд реакцій отримують за допомогою оберненого перетворення Лорана, що зводиться до обчислення визначених інтегралів:

$$P_n = \frac{1}{2} \int_{|t|=1} \frac{P(t)}{t^{n+1}} dt = \frac{1}{2\pi} \int_{|t|=1} \frac{C(t)}{A(t)t^{n+1}} dt, \quad n \in \mathbb{Z}. \quad (6)$$

Отримані вирази для амплітуд реакцій ідентичні результатам, що дає теорія Флоке, проте виведені без її прямого застосування. Спираючись на теорію функцій комплексної змінної, доведено, що отримане поле прогинів є єдиним обмеженим розв'язком задачі на нескінченності. Запропонований підхід дозволяє розраховувати реакції не лише від сили, прикладеної в середньому перерізі деякого прольоту, а й від довільної сили в будь-якому перерізі або розподіленого навантаження на прольотах. Підтверджено, що відразу за межами навантаженої ділянки поле прогинів завжди набуває вигляду квазіперіодичної хвилі.

### Література

1. Mead D. J. Wave propagation in continuous periodic structures: research contributions from Southampton, 1964–1995. Journal of Sound and Vibration. 1996. Vol. 190, Iss. 3. P. 495–524.

2. Мельник Т. А. Комплексний аналіз: підручник. Київ : ВПЦ «Київський університет», 2015. 192 с.

УДК: 631.171:004.94:636

## **ЦИФРОВІЗАЦІЯ СИСТЕМ ТЕХНІЧНОГО СЕРВІСУ ОБЛАДНАННЯ ГОДІВЛІ ТВАРИН У КОНТЕКСТІ ТОЧНОГО ТВАРИННИЦТВА**

*Новицький А.В.*

*Національний університет біоресурсів і природокористування України*

Аналіз сучасного стану експлуатації обладнання для годівлі ВРХ, а також узагальнення результатів наукових досліджень в тваринницькій галузі, дозволяють виокремити низку ключових передумов, що обґрунтовують необхідність розробки та цифровізації системи технічного обслуговування і ремонту (СТОР) обладнання для приготування і годівлі тварин (ЗПРК) у контексті точного тваринництва [1].

Передусім, встановлено, що традиційні підходи до організації технічного обслуговування, які базуються на планово-попереджувальних регламентах, не забезпечують належного рівня адаптивності до змінних умов експлуатації/ Варіація фізико-механічних властивостей кормових матеріалів, нерівномірність навантажень на робочі органи, вплив людського фактору та змінність технологічних режимів призводять до стохастичного характеру відмов, що ускладнює прогнозування технічного стану машин і знижує ефективність регламентного обслуговування [2].

Важливою передумовою є також зростання складності конструкцій сучасних ЗПРК, які поєднують механічні, гідравлічні та електронні системи [3, 4]. Інтеграція систем зважування, автоматизованого управління раціоном і цифрових модулів контролю створює передумови для переходу до кіберфізичних систем, у яких відмова одного елемента може призводити до порушення функціонування всієї технологічної лінії. Це зумовлює необхідність застосування комплексного підходу до забезпечення надійності на основі безперервного моніторингу та аналітики даних. Дослідження показують, що значна частка відмов обладнання годівлі тварин пов'язана із зношуванням робочих органів, деградацією підшипникових вузлів, порушенням роботи приводів і неточністю систем дозування [5, 6]. При цьому ранні стадії розвитку дефектів часто залишаються невиявленими в межах традиційних методів технічного контролю. Це обумовлює необхідність впровадження сенсорних систем діагностики, здатних фіксувати зміни параметрів у реальному часі.

Система ТОР у середовищі точного тваринництва формується як багатокомпонентний комплекс організаційно-технічних заходів, спрямованих на підтримання працездатності, відновлення ресурсу та забезпечення безвідмовності функціонування ЗПРК [7, 8]. До її структури входять не лише традиційні механічні та електромеханічні системи, а й цифрові платформи управління, сенсорні комплекси моніторингу, автоматизовані системи дозування кормів і роботизовані комплекси.

Ключовою особливістю сучасної СТОР є інтеграція класичних регламентних підходів до обслуговування з технологіями цифрового

моніторингу технічного стану обладнання. Використання сенсорних систем дає змогу здійснювати безперервний контроль параметрів роботи машин, що створює передумови для впровадження концепції прогнозного технічного обслуговування (Predictive Maintenance). У структурі СТОР засобів для приготування і роздавання кормів доцільно виділяти три функціональні рівні: експлуатаційний, спеціалізований сервісний та інженерно-технологічний.

Експлуатаційний рівень реалізується безпосередньо персоналом господарства і включає виконання щоденних та періодичних операцій технічного обслуговування, зокрема контроль робочих параметрів, візуальний огляд вузлів, очищення робочих органів, перевірку приводів, транспортерів і дозувальних систем. Важливою складовою цього рівня є також контроль функціонування сенсорних систем і програмного забезпечення, що забезпечує раннє виявлення відхилень у роботі обладнання.

Спеціалізований сервісний рівень передбачає залучення сервісних підрозділів або дилерських центрів виробників техніки. На цьому рівні здійснюється поглиблена діагностика технічного стану, калібрування сенсорів, оновлення програмного забезпечення, налаштування алгоритмів управління та виконання поточного ремонту. Важливою складовою є використання систем дистанційного моніторингу, які дозволяють аналізувати телеметричні дані та своєчасно планувати профілактичні заходи.

Інженерно-технологічний рівень охоплює виконання складних ремонтних і модернізаційних робіт із залученням виробників обладнання або спеціалізованих інженерних центрів. На цьому рівні здійснюється капітальний ремонт, відновлення ресурсу вузлів, модернізація програмно-апаратних комплексів та інтеграція нових цифрових технологій. Крім того, проводиться аналіз статистики відмов з метою підвищення надійності конструкцій і оптимізації режимів експлуатації [7, 8]. Суттєву роль у підвищенні ефективності СТОР відіграють цифрові платформи управління технічним станом обладнання. Вони забезпечують збір і обробку даних у режимі реального часу, автоматичне виявлення відхилень, формування сигналів про необхідність обслуговування та прогнозування залишкового ресурсу елементів [7]. Реалізація концепції Smart Maintenance дозволяє інтегрувати діагностику, аналітику великих даних і інтелектуальні алгоритми прийняття рішень.

Важливим напрямом розвитку є також підвищення ремонтпридатності обладнання, що досягається завдяки модульності конструкцій, стандартизації вузлів, використанню дистанційної діагностики та автоматизації сервісних процесів [8]. Це сприяє скороченню часу простою техніки, зниженню витрат на її експлуатацію та підвищенню загальної ефективності виробництва.

Отже, СТОР обладнання годівлі тварин у межах концепції точного тваринництва трансформується у високотехнологічну інтелектуалізовану систему, що базується на використанні цифрових технологій, сенсорних мереж та методів прогносної аналітики [9]. Її ефективне функціонування є необхідною умовою забезпечення надійності ЗПРК, стабільності виробничих процесів і підвищення конкурентоспроможності тваринницьких підприємств.

Використання цифрових платформ управління технічним станом сприяє зменшенню простоїв та підвищенню надійності обладнання.

### Література

1. Berckmans, D. (2017). General introduction to precision livestock farming. *Animal Frontiers*, 7(1), pp. 6–11. DOI:10.2527/af.2017.0102
2. Novitskiy, A., Banniy, O., & Novitskiy, Yu. (2023). Logical-probabilistic model of the reliability of means for preparing and distributing fodder. *Machinery & Energetics*, 14(1). <https://doi.org/10.31548/machinery/1.2023.57>.
3. Бойко А. І., Новицький А. В., Морозовська З. А. (2014). Аналіз конструктивних рішень решіт зернодробарок, направлених на підвищення їх довговічності. *Науковий вісник НУБіП України. Серія: техніка та енергетика АПК*. К.: НУБіП України. Вип. 196, ч. 2. С. 165–172.
4. Revenko Ivan, Khmelovskyi Vasyl, Revenko Yulii, Rebenko Victor, Potapova Svitlana (2023). Justification of parameters affecting increase of hammer crusher productivity. *Engineering for rural development*. 24-26.05.2023 Jelgava. pp. 714-720.
5. Pascuzzi S., Bulgakov V., Adamchuk V., Ruzhilo Z., Trokhaniak O., Nowak J., Rucins A., Paciolla F. (2024). Improved Design of the Working Body of a Flexible Sectional Screw Conveyor Q42024 *Lecture Notes in Civil Engineering*, pp. 367 – 377. DOI: 10.1007/978-3-031-70955-5\_40
6. Pylypaka S., Volina T.M., Mukvich M., Efremova G., Kozlova O. (2020). Gravitational Relief with Spiral Gutters, Formed by the Screw Movement of the Sinusoid. In: Ivanov V., Pavlenko I., Liaposhchenko O., Machado J., Edl M. (eds) *Advances in Design, Simulation and Manufacturing III. DSMIE 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham, pp. 63–73. doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-50491-5\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-030-50491-5_7).
7. Novitskiy, A., Banniy, O., Novitskiy, Yu., Kharkovskyi, I., & Antal, M. (2024). Examination of maintainability indicators of feed preparation and distribution products. *Machinery & Energetics*, 15(4), pp. 47–57. <https://doi.org/10.31548/machinery/4.2024.47>.
8. Novitskiy, A., Banniy, O., Novitskiy, Yu., & Antal, M. (2023). A study of mixer-feeder equipment operational reliability. *Machinery & Energetics*, 14(4), pp. 101-110. <https://doi.org/10.31548/machinery/4.2023.101>.
9. Norton T., Chen C., Larsen M., Berckmans D. Review: Precision livestock farming: Building 'digital representations' to bring the animals closer to the farmer. September. 019. *animal* 13(12): pp. 1-9. DOI:10.1017/S175173111900199X

УДК 665.112

## **РАЦІОНАЛЬНИЙ КОМПЛЕКС ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ОЛІЇ В УМОВАХ ФЕРМЕРСЬКИХ ГОСПОДАРСТВ**

*Єременко О.І., Загородний Н.Б., Гринюк В.С.*

*Національний університет біоресурсів і природокористування України*

Головні технологічні процеси машинної переробки олійного насіння на олію такі: очищення від рослинних решток та механічних домішок, сортування і обрушування, сушіння, пресування (екстрагування), фільтрація, вінтеризація, гідратація, нейтралізація, дезодорація, вибілювання олії [1, 2].

Найбільш розповсюдженими, як в Україні, так і за кордоном є переробка олійної сировини за технологіями «гарячого» або «холодного» пресування. В недавньому минулому найбільш поширений був спосіб гарячого пресування з попередньою підготовкою насіння. Зараз все більшої популярності набуває спосіб холодного пресування безпосередньо з насіння на прес-екструдерах [2-4].

Видобуток олії на теперішній час - це дуже затребувана галузь, тому в кожному населеному пункті є хоча б одна або дві олійниці. Холодне пресування олії є найкориснішим, тому що при температурі менше 80°C не можуть втратитися корисні амінокислоти, вітаміни і мінерали. Олійний прес холодного пресування підігріває в межах 60-80°C і віджимає насіння соняшнику, ріпаку, льону тощо. Внаслідок чого виходить свіжа олія. Люди, які мають свої паї і своє зерно, вважають за краще здавати соняшник в олійницю, де працює маслопрес холодного пресування, так як при гарячому відтисканні олія виходить з менш високими органолептичними властивостями та харчовою цінністю.

Аналіз роботи лінії за схемою гарячого пресування [1, 2, 4] свідчить про значну енерго- та металоємність виробництва олії, окрім того, використання обладнання для нагрівання м'ятки призводить до зниження якості олії і збільшення собівартості кінцевого продукту. Впровадження такого технологічного процесу в умовах господарств з невеликими обсягами виробництва сировини недоцільне через розгалуженість операцій, що призводить до значних витрат.

Технологічна схема виробництва олії методом холодного одноразового пресування відрізняється відсутністю обладнання для теплової обробки м'ятки, що дещо спрощує технологію, але має достатньо велику кількість одиниць комплектного обладнання, що, в свою чергу, веде до великої металоємності.

Здійснення більш глибокого аналізу відомих способів переробки олійної сировини вимагало дослідження рішень, виконаних на рівні винаходів [1, 3, 4].

Для сучасного олійного виробництва в умовах фермерських господарств з одержанням олії при відносно невеликих енерговитратах (100-150 Вт/кг) і високому відсотку виходу готового продукту (35-40%), при вмісту у сировині ліпідів 42-49%, доцільно використовувати технологічну лінію з продуктивністю по насінню соняшника до 190 кг/год із займаною площею 32 м<sup>2</sup> [1, 4].

Насіння перевозиться від сховищ зернового елеватора за допомогою вантажних транспортних засобів 2 і розміщується у приймальному бункері 1 (рис. 1). Далі за допомогою норії 3 сировина подається у проміжний бункер 5, звідки транспортером 4 направляється в зерноочисний сепаратор 6, де насіння очищається від органічних і мінеральних домішок. Потім похилий 7 і горизонтальний 8 транспортери подають олійне зерно у прес-екструдер 9 марки ЕК-75/1200, де відбувається первинне холодне (50-80°C) пресування. Отримана в екструдері сиро-давлена олія за допомогою насоса 10 перекачується у проміжну ємність 11. За технологічним регламентом сира олія очищається від фузу пластинчастим фільтром 12 марки ВНП-3 і далі прямує за допомогою насоса в ємність очищеної олії 13. В ємностях 11 і 13 рівень олії регулюється автоматично за допомогою спеціальних датчиків і насоса.

Макуха після екструдера 9 подається на прес остаточного віджимання ЕК-ПД-120/820 11 для витягу залишків олії. Далі макуха подається транспортером 14 в бункер 15 для подальшого використання за призначенням.

Обслуговують всю лінію з двох ділянок три кваліфікованих оператора.

Подальший аналіз дозволяє зробити припущення, що для проектування рекомендованого олійного підприємства доцільно застосувати ефективну технологічну лінію з устаткуванням вітчизняного виробника.

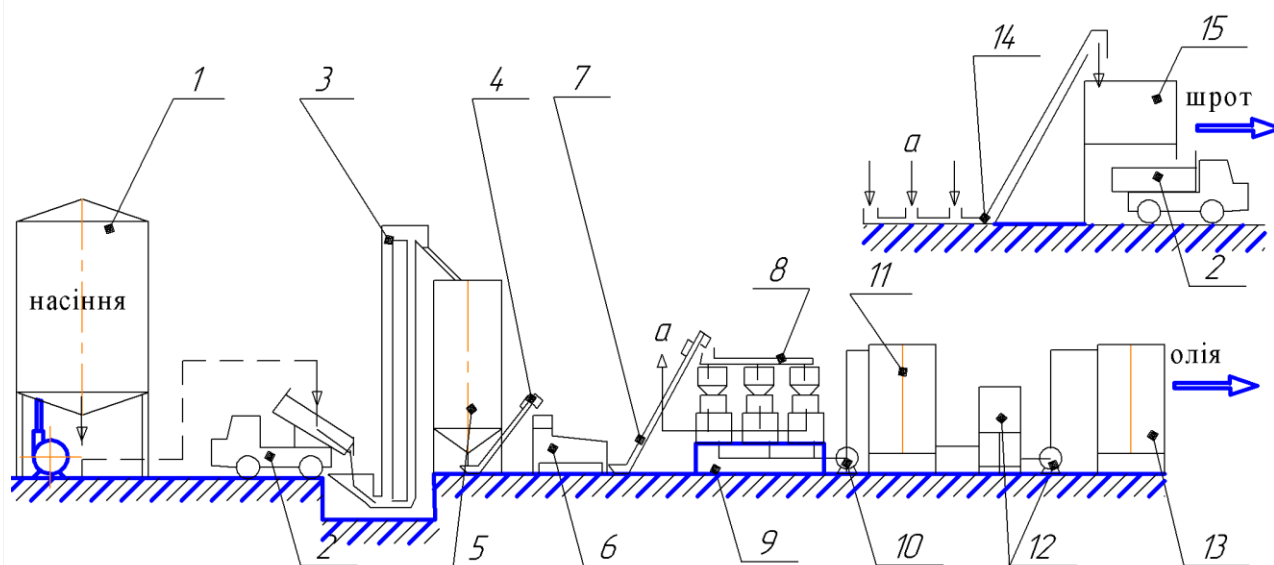


Рис. 1. Функціональна схема олійниці в умовах фермерського господарства: 1 – сховище олійного зерна; 2 – транспортний засіб; 3 – норія; 4, 7 – шнекові транспортери; 5 – проміжний бункер; 6 – сепаратор олійного зерна; 8 і 14 – скребкові транспортери; 9 – прес-екструдер; 10 – насос; 11 – ємність сирової олії; 12 – фільтр; 13 – ємність очищеної олії; 15 – бункер для макухи

Технологічна лінія складається з двох виробничих ділянок, а саме: ділянка очищення насіння олійних культур від сторонніх домішок та отримання способом холодного пресування сиро-давненої олії; ЛВРО-ЕКО-БІО (табл. 1), ділянка очищення олії шляхом фільтрації ЛФРО-ЕКО-БІО (табл. 2).

Ділянка Виробництва Рослинних Олій ЛВРО-ЕКО-БІО призначені для, що після очищення також використовується як сировина для виробництва дизельного біопалива.

Таблиця 1. Технічні характеристики ділянки ЛВРО-ЕКО-БІО

№	Назва параметра	Значення
1	Продуктивність, т/доб.	1000
2	Площа лінії, м <sup>2</sup>	8
3	Висота лінії, м	2,8
4	Маса лінії, кг	1800
5	Загальна потужність електроустаткування лінії, кВт	20
6	Обслуговуючий персонал, люд.	2

Рекомендована комплектність обладнання ділянки:

1. Рушка насіння БАРС-1044	1
2. Комплекс очищення зерна К-Б 01-00	1
3. Конвеєр пружинний L= 6 м	1
4. Прес-екструдер ЕК-75/1200	1
5. Прес шнековий дотискання ЕК-ПД-120/820	1
6. Транспортёр шнековий L=6	2

Таблиця 2. Технічні характеристики ділянки **фільтрації** ЛФРО-ЕКО-БІО

№	Назва параметра	Значення
1	Продуктивність, кг/доб.	1000
2	Площа лінії, м <sup>2</sup>	24
3	Висота лінії, м	3,35
4	Маса лінії, кг	1800
5	Загальна потужність електроустаткування лінії, кВт	18,5
6	Обслуговуючий персонал, люд.	1

Рекомендована комплектність обладнання ділянки ЛФРО-ЕКО-БІО:

1. Фільтр ВВП-3 ТУ У 29.2-14247520-004:2007	1
2. Ємність сирої олії	1
3. Ємність намівання	1

4. Ємність холодоагента	1
5. Кристалізатор	1
6. Ємність чистої олії	1
7. Фільтр контрольний (поліцейський)	1

**Висновки.** Метод «холодного відтискання» (до 100°C пресової олії) на сьогодні набуває все більшого поширення у фермерських господарствах. Одночасно впроваджуються технологічні удосконалення процесу фільтрації олії, наприклад, вакуумні фільтри замість відстійників.

Результати аналізу технологій виробництва олії свідчать про доцільність впровадження на малих олійних і біодизельних підприємствах технологічні лінії за холодним способом відтискання насіння, оснащені вітчизняним обладнанням.

Переробка насіння та отримання олії холодним пресуванням є перспективним і невід'ємним етапом олійних технологій, але виробничо-методичні положення, класифікації обладнання, характеристики процесів та технічних засобів часто є неповними або суперечливими. Тому проведений аналіз та узагальнення отриманих матеріалів, а також класифікація техніко-технологічних об'єктів має бути підґрунтям для вибору перспективних виробничих ліній переробки насіння олійних культур на сільськогосподарських переробних підприємствах малої і середньої потужності.

### Література

1. Поліщук В. Технології виробництва рослинної олії для використання в енергетичних цілях. Зб. наук. праць Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для с.-г. України. Дослідницьке: 2010. Вип. 14 (22), кн. 1. С. 377-384.

2. Єременко О.І., Гудзенко М.М., Лук'янець В.О. До питання техніко-технологічного оснащення переробки насіння ріпаку в Україні. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК. Київ: НУБіПУ, 2010. Вип.144, ч. 3. С. 173-182.

3. Gudzenko M. M., Vasylyv V. P., Mushtruk M. M., Zheplinska M. M., Palamarchuk I. P., Burova Z. A., Sarana V. V. Parameters of screw nozzles of twin-screw extruder-press on oil yield. Animal Science and Food Technology. 2021. Vol. 12(3). P. 5–17. <https://doi.org/10.31548/animal2021.03.001>

4. Єременко О.І., Гудзенко М.М. Перспективна лінія фільтрування олії для виробництв малої потужності. Зб. наук. праць Вінницького національного аграрного університету. Серія: технічні науки. Вінниця: ВНАУ, 2012. № 10, т. 2(59). С.138–141.

УДК 331.45 (075.8)

## **ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В ОЦІНЦІ РИЗИКІВ ТРАВМУВАННЯ ПРАЦІВНИКІВ НА МЕХАНІЗОВАНИХ ПРОЦЕСАХ В АГРАРНІЙ СФЕРІ**

*Марчишина Є.І., Дідиченко М.*

*Національний університет біоресурсів і природокористування України*

Сучасний розвиток аграрного сектору характеризується високим рівнем механізації та автоматизації виробничих процесів, що, з одного боку, підвищує продуктивність праці, а з іншого - супроводжується зростанням потенційних ризиків травмування працівників. Особливо це стосується експлуатації складної сільськогосподарської техніки, взаємодії людини з автоматизованими системами та роботи в умовах підвищеної небезпеки. У цьому контексті актуальним є застосування технологій штучного інтелекту для підвищення рівня безпеки праці шляхом прогнозування, аналізу та запобігання виробничим травмам.

Штучний інтелект являє собою сукупність методів і алгоритмів, здатних аналізувати великі обсяги даних, виявляти закономірності та формувати прогностичні моделі. У сфері охорони праці ці технології дозволяють перейти від реактивного підходу до управління ризиками до проактивного, що базується на попередженні небезпечних ситуацій. Зокрема, використання алгоритмів машинного навчання дає змогу обробляти дані про попередні інциденти, технічний стан обладнання, поведінкові фактори працівників і зовнішні умови для оцінки ймовірності виникнення травм.

У механізованих процесах аграрного виробництва значну роль відіграють системи моніторингу на основі сенсорних технологій та Інтернету речей. Вони забезпечують безперервний збір інформації про роботу техніки, параметри навколишнього середовища та дії оператора. На основі цих даних штучний інтелект здатен виявляти відхилення від нормальних режимів функціонування та сигналізувати про потенційно небезпечні ситуації. Такі підходи вже активно застосовуються у концепції точного землеробства, де цифрові системи підтримки прийняття рішень сприяють оптимізації процесів і підвищенню безпеки.

Особливу увагу слід приділити використанню моделей прогнозування травматизму. Аналіз великих масивів історичних даних дозволяє визначати ключові фактори ризику, такі як перевантаження техніки, недотримання технологічних регламентів, втома працівників або несприятливі погодні умови. Подібно до досліджень у промислових галузях, де моделі машинного навчання демонструють здатність прогнозувати аварійні ситуації з високою точністю, у сільському господарстві також можливе створення ефективних систем раннього попередження, що знижують імовірність травмування персоналу.

Водночас впровадження штучного інтелекту в систему оцінки ризиків супроводжується низкою викликів. Серед них — проблема якості та репрезентативності даних, від яких залежить точність моделей, а також ризики алгоритмічної упередженості, що можуть призводити до помилкових висновків. Крім того, необхідно враховувати організаційні та економічні аспекти впровадження таких технологій, включаючи витрати на обладнання, інтеграцію систем і підготовку персоналу.

Не менш важливим є питання взаємодії людини та інтелектуальних систем. Штучний інтелект повинен розглядатися як інструмент підтримки прийняття рішень, а не як повна заміна людського контролю. Ефективність його використання значною мірою залежить від рівня цифрової грамотності працівників та їх здатності правильно інтерпретувати результати аналітики. Тому впровадження таких технологій має супроводжуватися відповідною підготовкою кадрів і формуванням культури безпеки.

Таким чином, використання штучного інтелекту в оцінці ризиків травмування працівників на механізованих процесах в аграрній сфері є перспективним напрямом, що дозволяє суттєво підвищити рівень безпеки праці. Завдяки можливостям аналізу великих даних, прогнозування небезпечних ситуацій та автоматизованого моніторингу, ці технології сприяють зниженню виробничого травматизму та оптимізації управління ризиками. Подальші дослідження повинні бути спрямовані на вдосконалення моделей штучного інтелекту, підвищення їх надійності та адаптацію до специфіки аграрного виробництва.

### **Література**

1. Заплатинський В. М. Застосування штучного інтелекту для оцінки ризиків в охороні праці. 2025.
2. Лиховид П., Вожегова Р., Грановська Л. та ін. Штучний інтелект і можливості його застосування в сучасному сільському господарстві. 2024.
3. Марценюк Є. В., Партика А. І., Крет Т. Б. Дослідження вразливостей штучного інтелекту та побудова комплексної моделі безпеки організації. 2025.
4. Трикуліч П. Ризики впровадження штучного інтелекту у підприємницьку діяльність. 2025.
5. Шевцов І. AI Risk: як штучний інтелект формує нові горизонти корпоративної безпеки. 2024.

УДК 331.45 (075.8)

## **ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ «5 WHY?» В ОЦІНЮВАННІ КОРЕНЕВИХ ПРИЧИН ВИРОБНИЧОГО ТРАВМАТИЗМУ МЕХАНІЗАТОРІВ**

*Марчишина Є.І., Зубок Т.О.*

*Національний університет біоресурсів і природокористування України*

Виробничий травматизм у сільськогосподарському секторі залишається однією з найсерйозніших проблем безпеки праці. За даними міжнародних організацій, аграрна галузь входить до трійки найбільш небезпечних сфер економічної діяльності. Значна частина нещасних випадків припадає на механізаторів, які працюють із тракторами, комбайнами та іншою складною технікою. Висока інтенсивність польових робіт, використання потужних машин та вплив людського фактора спричиняють підвищений рівень ризику травмування. За статистичними оцінками, у структурі виробничого травматизму в аграрному секторі частка механізаторів становить близько 35–45 %. При цьому понад 60 % нещасних випадків пов'язані з експлуатацією машинно-тракторного парку, а приблизно 25 % травм виникають унаслідок порушення вимог безпеки під час технічного обслуговування техніки.

Ефективне запобігання виробничому травматизму потребує не лише фіксації подій, але й глибокого аналізу причин їх виникнення. Одним із простих і водночас результативних інструментів аналізу кореневих причин є метод «5 Why?» («П'ять чому?»), який широко використовується у системах управління якістю та безпекою. Суть методу полягає у послідовному встановленні причинно-наслідкових зв'язків шляхом багаторазового формулювання запитання «чому?» до кожного попереднього пояснення події. У середньому застосовується п'ять ітерацій запитання, що дозволяє перейти від поверхневих факторів до глибинних системних причин.

У сфері охорони праці механізаторів метод «5 Why?» дає можливість не лише визначити безпосередню причину травмування, але й встановити організаційні, технічні та поведінкові фактори. Наприклад, під час аналізу нещасного випадку, пов'язаного з травмуванням оператора під час ремонту жатки зернозбирального комбайна, перше пояснення може звучати так: працівник отримав травму руки через раптове обертання механізму. Наступне запитання «чому це сталося?» може показати, що механізм не був знеструмлений. Подальший аналіз може встановити, що працівник не виконав процедуру блокування обладнання. Наступний рівень причин може бути пов'язаний із відсутністю чітких інструкцій або контролю з боку керівництва. На фінальному етапі може виявитися системна проблема, наприклад недостатній рівень навчання або відсутність впровадженої системи управління ризиками.

Практичні дослідження показують, що застосування методу «5 Why?» дозволяє виявити глибинні причини у 70–80 % випадків виробничих інцидентів. У процесі аналізу травматизму механізаторів часто встановлюється, що

безпосередня технічна причина становить лише приблизно 20–30 % від усіх факторів, тоді як близько 50 % випадків пов'язані з організаційними недоліками, а ще 20–30 % – із людським фактором. Наприклад, дослідження причин перекидання тракторів показують, що приблизно у 40 % випадків основною причиною є експлуатація техніки на схилах без належних захисних систем, у 35 % випадків – недостатня підготовка оператора, а ще у 25 % – незадовільний технічний стан машин.

Важливою перевагою методу «5 Why?» є його простота та можливість застосування без складних аналітичних інструментів. Для проведення аналізу достатньо сформувати робочу групу з 3–5 фахівців, які володіють інформацією про обставини події. У середньому аналіз одного інциденту за допомогою методу займає від 30 до 60 хвилин. При цьому результати аналізу можуть бути використані для розроблення коригувальних заходів, спрямованих на усунення системних причин небезпеки. Досвід підприємств аграрного сектору свідчить, що впровадження системного аналізу інцидентів із використанням методу «5 Why?» може знизити рівень травматизму на 15–25 % протягом перших двох років застосування.

Разом із тим метод має певні обмеження. Його ефективність значною мірою залежить від компетентності експертів та повноти вихідної інформації. У складних виробничих системах, де події мають багатофакторний характер, п'яти ітерацій може бути недостатньо для виявлення всіх причинних зв'язків. Тому доцільно поєднувати цей підхід з іншими методами аналізу, зокрема з побудовою причинно-наслідкових діаграм або методами оцінювання ризиків.

Таким чином, застосування методу «5 Why?» у дослідженні виробничого травматизму механізаторів є ефективним інструментом виявлення кореневих причин нещасних випадків. Метод дозволяє перейти від поверхневого аналізу до системного розуміння факторів ризику, що сприяє розробленню більш результативних профілактичних заходів. Його використання у поєднанні з іншими методами аналізу безпеки може суттєво підвищити ефективність управління охороною праці в аграрному секторі та сприяти зниженню рівня травматизму серед працівників механізованих процесів.

### **Література**

1. Heinrich H. W., Petersen D., Roos N. Industrial Accident Prevention: A Safety Management Approach. New York: McGraw-Hill, 1980.
2. Imai M. Kaizen: The Key to Japan's Competitive Success. New York: McGraw-Hill, 1986.
3. Hollnagel E. Safety-I and Safety-II: The Past and Future of Safety Management. Farnham: Ashgate Publishing, 2014.
4. International Labour Organization. Safety and Health in Agriculture. Geneva: ILO, 2011.
5. ISO 45001:2018 Occupational health and safety management systems — Requirements with guidance for use. Geneva: International Organization for Standardization, 2018.

УДК 331.45 (075.8)

## **ОСОБЛИВОСТІ ПРОВЕДЕННЯ АТЕСТАЦІЇ РОБОЧИХ МІСЦЬ ЗА УМОВАМИ ПРАЦІ У ВОЄННИЙ ПЕРІОД**

*Марчишина Є.І., Кузьменко В.М.*

*Національний університет біоресурсів і природокористування України*

Особливості проведення атестації робочих місць за умовами праці у воєнний період зумовлені суттєвими трансформаціями виробничого середовища, підвищеним рівнем ризиків та обмеженнями організаційного характеру. Атестація робочих місць традиційно спрямована на комплексну оцінку факторів виробничого середовища і трудового процесу з метою визначення їх впливу на здоров'я працівників, встановлення пільг і компенсацій, а також розроблення заходів щодо поліпшення умов праці. У воєнний період ці завдання зберігають свою актуальність, однак їх реалізація відбувається в умовах підвищеної невизначеності та динамічних змін.

По-перше, значна кількість підприємств змінює місце розташування або режим функціонування. За оцінками, понад 30–40% підприємств зазнали релокації або часткової зупинки діяльності, що безпосередньо впливає на організацію проведення атестації. Нові виробничі приміщення часто не відповідають попереднім стандартам безпеки, що потребує позачергової оцінки умов праці. У таких випадках допускається спрощення окремих процедур, однак не може бути знижено рівень вимог до безпеки працівників.

По-друге, суттєво змінюється структура шкідливих і небезпечних факторів. Зростає вплив фізичних факторів (шум, вібрація, пил), психоемоційного напруження, а також ризиків, пов'язаних із можливими надзвичайними ситуаціями (обстріли, перебої електропостачання). За даними окремих досліджень, рівень психофізіологічного навантаження працівників у воєнний період може зростати на 20-50%, що вимагає включення додаткових критеріїв оцінювання до процедури атестації.

По-третє, обмежений доступ до акредитованих лабораторій та спеціалізованих організацій ускладнює проведення інструментальних вимірювань. У таких умовах застосовуються альтернативні підходи, зокрема використання наявних архівних даних, експертних оцінок, а також дистанційних методів аналізу. Водночас законодавство допускає відтермінування проведення атестації у випадках, коли її виконання є неможливим з об'єктивних причин, проте роботодавець зобов'язаний документально обґрунтувати такі обставини.

По-четверте, кадровий фактор відіграє значну роль. Внаслідок мобілізації та міграції спостерігається дефіцит кваліфікованих спеціалістів з охорони праці. Це призводить до зниження якості підготовки матеріалів атестації та потребує підвищення ролі внутрішнього контролю на підприємствах. У деяких випадках функції спеціалістів можуть виконувати працівники, які пройшли прискорене навчання, що, однак, не завжди забезпечує належний рівень експертності.

По-п'яте, важливим аспектом є цифровізація процесів. У воєнний період активізується використання електронного документообігу, дистанційних консультацій та онлайн-інструментів оцінки ризиків. Це дозволяє скоротити час проведення атестації та забезпечити безперервність процесу навіть за умов обмеженого доступу до робочих місць.

Якщо строк проведення атестації робочих місць за умовами праці настав у період воєнного стану, роботодавець може ухвалити рішення провести її протягом шести місяців з дня припинення чи скасування воєнного стану в Україні. Це рішення роботодавець погоджує з профспілкою.

Таким чином, проведення атестації робочих місць у воєнний період характеризується адаптивністю, спрощенням окремих процедур та одночасним посиленням уваги до безпеки працівників. Основним завданням залишається забезпечення балансу між дотриманням нормативних вимог і реальними можливостями підприємств. У перспективі доцільним є вдосконалення нормативної бази з урахуванням кризових умов, а також розвиток гнучких підходів до оцінки умов праці.

### **Література**

1. Постанова Кабінету Міністрів України №442 «Про порядок проведення атестації робочих місць за умовами праці».
2. ДСТУ 2293:2014 «Охорона праці. Терміни та визначення основних понять».
3. Методичні рекомендації щодо проведення атестації робочих місць за умовами праці.

УДК 535.2

## СТАНДАРТИЗАЦІЯ ТА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЇ БІОГАЗОВИХ УСТАНОВОК

*Дев'ятко О., Денисенко М.*

*Національний університет біоресурсів і природокористування України*

Стандартизація передбачає формування положень, можливостей щодо впорядкованості використання наявних завдань. Для агропромислового комплексу відносно технічних засобів, які забезпечують впорядкованість передбачається, що це є працездатність під час експлуатації.

На сьогодні використання біогазових установок в господарствах акцентується залежно від соціально-економічних змін. Їхнє основне призначення передбачає отримання біогазу, який використовується для формації електроенергії, тепла або біометану з перспективою переробки відходів на органічні добрива. Їх застосування, як бачимо, є знаряддям, що дозволяє мати додатковий напрям забезпечення працездатності техніки з позиції сполучної (додаткової) ланки і це надає їм пріоритетне місце в потребі за відсутності прямих джерел використання.

Задоволення потреб з використанням альтернативних видів енергії в Україні на основі біогазових установок, на сьогодні, згідно [1], складається з біогазових заводів та біометанових установок загальною потужністю 41 млн. кубометрів на рік. Відновлювальна енергетика є перспективним напрямком, який надає можливість вирішення проблем для приватних господарств (одиночних будинків) а також покращення питання екології.

Вагомим складовим елементом при використанні біогазових установок є фактори, які впливають на їх технічний стан, а саме:

- обслуговування;
- поточний ремонт;
- кваліфікований обслуговуючий персонал;
- зберігання техніки і запасних частин.

Оцінення технічного стану виконують за рівнями від високого до дуже низького. Технологічна частина використання біогазових установок містить виконання підготовчих робіт, що входять до складу технічної експлуатації. Виконання їх буває різноманітним і іноді не підпадає під одну технологічну схему через мінливість операцій.

Таким чином, застосування біогазових установок у складі технологічних операцій передбачає спроможність широкого вибору сировинного матеріалу, його переробка в установці та налаштування останньої щодо технічного контролю, вимірювання і оперативне керування технічним станом виконується згідно функціонального завдання за експлуатаційними показниками.

### Література

1. Біометан в Україні: можливості та розвиток — матеріали події та тези спікерів. *UABIO*. URL: <https://uabio.org/news/17950/>.

УДК 535.2

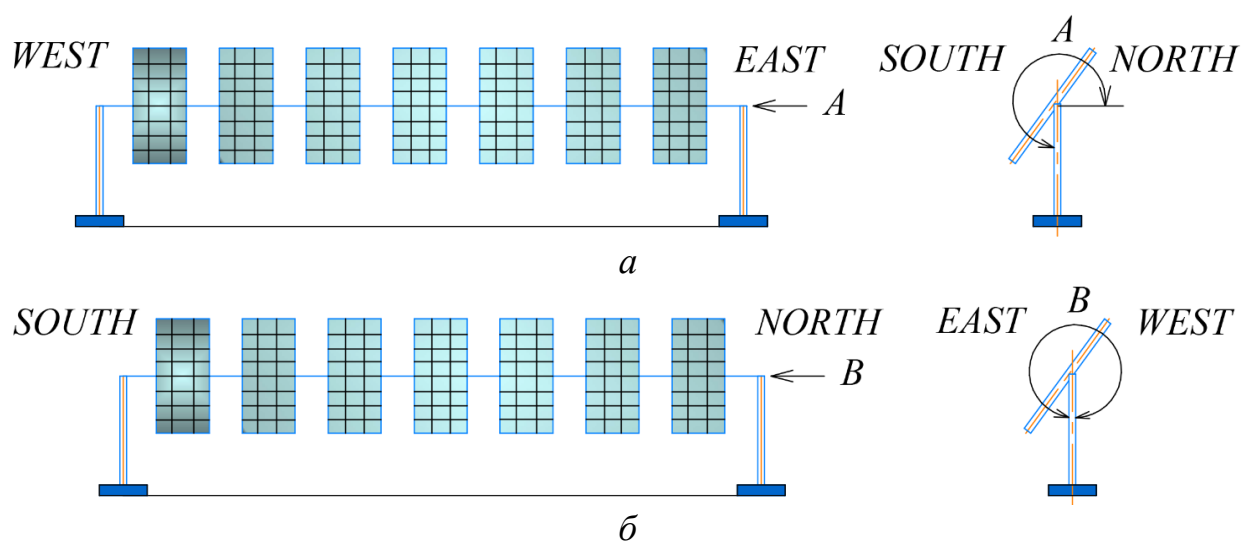
**КОНСТРУКТИВНІ ОСОБЛИВОСТІ СИСТЕМ АГРОВОЛЬТАЇКИ***Голуб Г.А., Цивенкова Н.М., Rogovskiy I.L., Марус О.А.**Національний університет біоресурсів і природокористування України*

Вагомим чинником зниження ефективності систем агровольтаїки при збільшенні їх розмірів є відсутність раціональних монтажних конструкцій. Слід також згадати про кліматичні та екологічні чинники, які, з одного боку, є причиною зниження стійкості конструкцій систем агровольтаїки, а з іншого – погіршують умови ведення аграрного виробництва. Отже, сучасні системи агровольтаїки потребують удосконалення, що пов'язано в вирішенням низки конструктивних задач.

Метою дослідження є визначення показників ефективності трекінгу систем агровольтаїки в залежності від їх конструктивних особливостей. Це дасть можливість вибору найбільш прийнятних конструкцій систем агровольтаїки для забезпечення їх ефективного функціонування у конкретних умовах застосування.

Об'єктом дослідження є системи агровольтаїки. Предметом дослідження є залежність ефективності трекінгу систем агровольтаїки від їх конструктивних особливостей та залежність ефективності покриття площі фотоелектричними панелями від відстані між масивами системи агровольтаїки під час найбільшої сонячної активності. Основна гіпотеза дослідження полягала в тому, що шляхом ускладнення конструкції системи агровольтаїки можна досягти підвищення її ефективності трекінгу аж до досягнення максимального значення.

Загальний вигляд досліджуваних конструкцій систем агровольтаїки приведено на рис. 1.



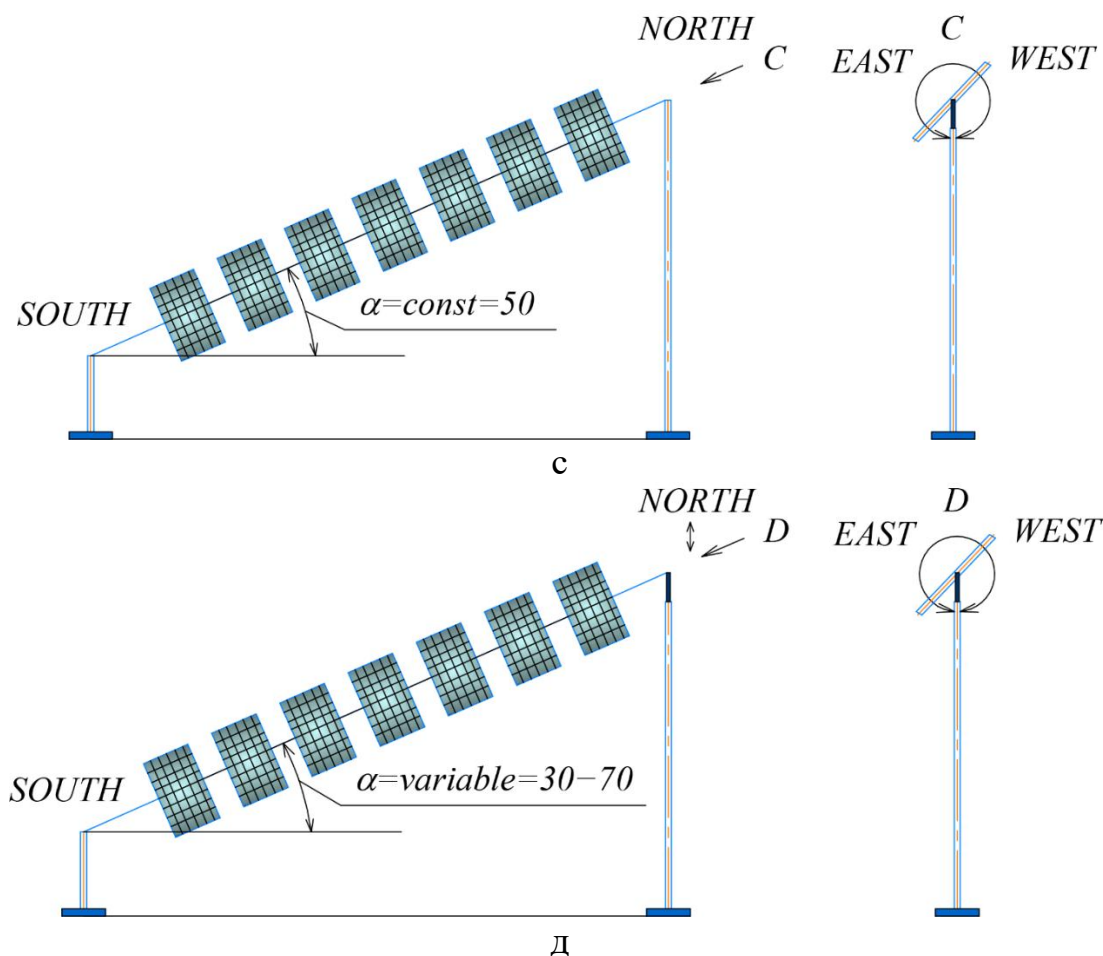


Рис. 1. Схеми досліджуваних конструкцій систем агровольтаїки в залежності від орієнтації осі обертання фотоелектричних модулів: *a* – вісь горизонтальна, напрямом «Схід-Захід»; *b* – вісь горизонтальна, напрямом «Північ-Південь»; *c* – вісь встановлена під кутом широти, напрямом «Північ-Південь»; *d* – вісь встановлена з можливістю регулювання у вертикальній площині, напрямом «Північ-Південь»

Для визначення ефективності покриття площі фотоелектричними панелями під час найбільшої сонячної активності використана розрахункова схема приведена на рис. 2.

Результати моделювання зміни кута нахилу фотоелектричних модулів відносно площини їх осі обертання в системі агровольтаїки «Північ-Південь» із віссю обертання встановленою під кутом широти приведена на рис. 3.

Отримані результати дозволяють визначити основні показники ефективності трекінгу систем агровольтаїки.

Подальший розвиток даного дослідження має полягати у розробці конструкції масиву системи агровольтаїки та проведення експериментальних досліджень різних конструктивних рішень.

Практичне значення результатів досліджень полягає в тому, що вони можуть бути використані для розробки конструкції системи агровольтаїки.

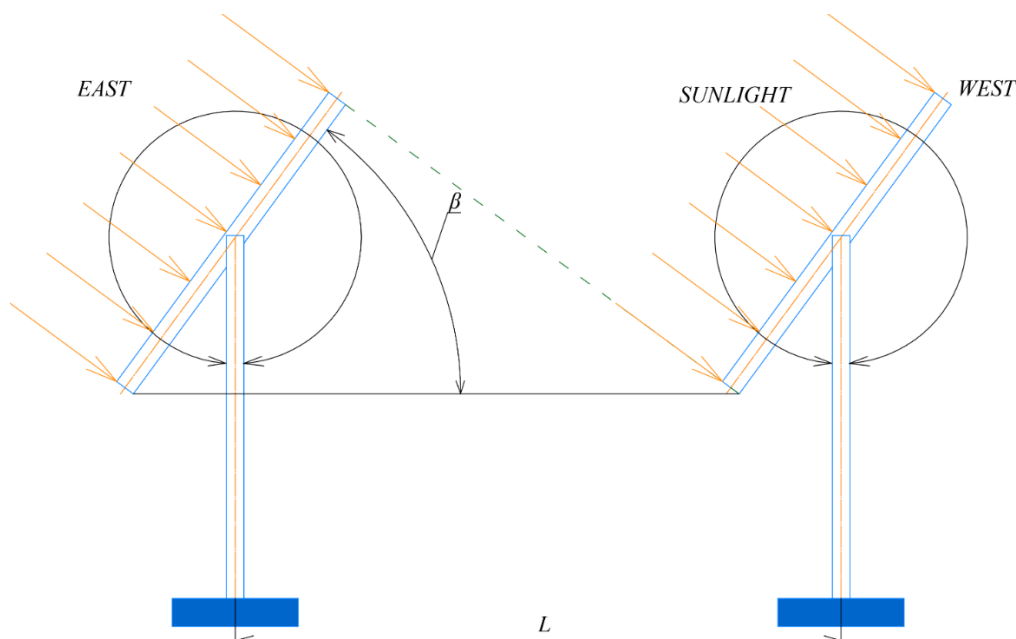


Рис. 2. Розрахункова схема для визначення ефективності покриття площі фотоелектричними панелями в системі агровольтаїки

Було встановлено, що значення ефективності трекінгу системи агровольтаїки із горизонтальною віссю обертання та орієнтацією осі обертання «Схід-Захід» становить 34,75 %; для системи агровольтаїки із орієнтацією «Північ-Південь» – 52,89 %. Значення ефективності трекінгу системи агровольтаїки із орієнтацією «Північ-Південь» та віссю обертання встановленою під кутом широти ( $50^\circ$ ) становить 67,95 %, а при осі обертання встановленою таким чином, щоб фотоелектричні модулі відслідковували потік сонячних променів також у вертикальній площині – 69,5 %. Протяжність дня під час роботи системи агровольтаїки змінюється від 12 годин 21 березня та 21 вересня до 16 годин 21 червня. Така комбінація часу увімкнення-вимкнення системи агровольтаїки в роботу та протяжності дня призводить до того, що кут нахилу фотоелектричних модулів відносно площини їх осі обертання становить  $45^\circ$ . Отримане значення кута нахилу модулів відносно площини осі обертання в системі агровольтаїки дозволило визначити відстань між масивами агровольтаїки, яка становила 3,79 м, а ефективність покриття площі фотоелектричними панелями під час найвищої сонячної активності – 52,8 %.

Дослідження було виконано в рамках реалізації проєкту HEI-COPILOT у межах ініціативи EIT HEI Initiative «Розвиток інноваційної спроможності вищої освіти», що фінансується Європейським Союзом.

### Література

1. G. Golub, N. Tsyvenkova, I. Rogovskii, V. Chuba, V. Nadykto, I. Omarov, Y. Yarosh, I Chuba. Determining the influence of design features in agrivoltaics systems on tracking efficiency. – Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2025, 3/8 (135), Energy-saving technologies and equipment, 14-22. DOI: 10.15587/1729-4061.2025.329837

УДК 631.363

## УДОСКОНАЛЕНА КОНСТРУКЦІЯ ПОДРІБНЮВАЧА КОНЦЕНТРОВАНИХ КОРМІВ

*Монько Р.В., Потапова С.Є.*

*Національний університет біоресурсів і природокористування України,*

Одним з основних чинників, що визначають ефективність виробництва продуктів тваринництва, є приготування кормів. Проте цей процес є дуже енергоємним і вимагає застосування спеціальних технічних засобів. Найпоширенішим способом підготовки зернових кормів до згодовування є подрібнення.

Нині в сільському господарстві найбільш широкого розповсюдження набули молоткові дробарки. Їх робочими органами є шарнірно закріплені на барабані молотки, за допомогою яких відбуваються численні удари подрібнюваного матеріалу. Основними недоліками цих машин є переподрібнення матеріалу та швидке зношування молотків.

Тому необхідно розробляти нові конструкції дробарок, що дозволяють ефективніше подрібнювати і своєчасно вивантажувати подрібнюваний матеріал за рахунок застосування удосконалених робочих органів.

Для подрібнення концентрованих кормів нами запропонована конструкція дробарки ударно-перетираючої дії (рис. 1), в якій в процесі подрібнення матеріал піддається ударній дії жорстко-закріплених бил і одночасно перетирається об сепаруючу поверхню решіт.

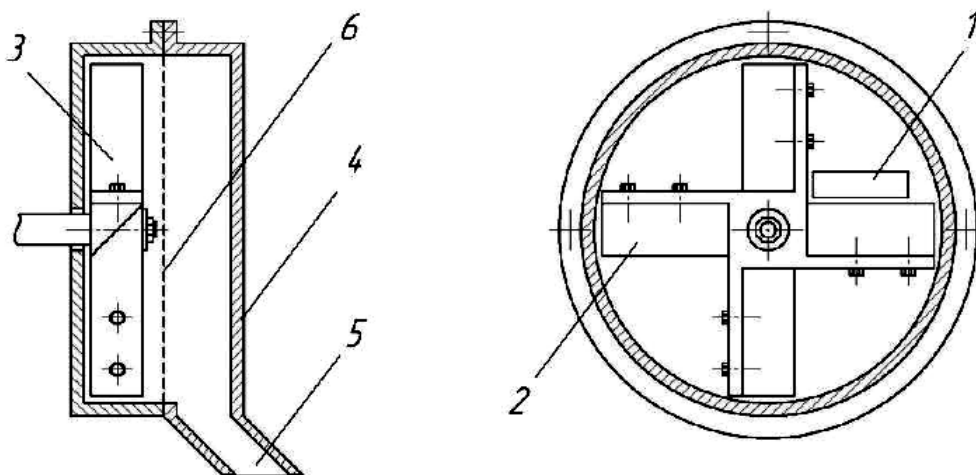


Рис. 1. Схема дробарки зерна ударно-перетираючої дії:

1 – завантажувальне вікно; 2 – біла; 3 – ротор; 4 – кожух 5 – вивантажувальний патрубок; 6 – торцеве решето.

Робочий процес розробленої дробарки зерна відрізняється наступним:

- в якості робочого органу використовуються не шарнірно підвішені молотки, а жорстко встановлені на роторі біла;

- подрібнюваний матеріал надходить в камеру подрібнення не через отвір у верхній частині робочої камери, а через отвір в торцевій стінці;
- подрібнюваний матеріал піддається не прямому удару молотків, а взаємодіє з поверхнею бил, розгорнутої на певний кут відносно їх поздовжньої осі;
- після взаємодії з поверхнею бил подрібнюваний матеріал спрямовується переважно не до периферійного решета, а розподіляється між периферійним і торцевим решетами.

Дробарка зерна ударно-перетираючої дії працює таким чином: зерно, що підлягає подрібненню із бункера 1 через завантажувальне вікно 2 надходить в дробильну камеру, де потрапляє під удари обертових бил ротора 3, в результаті чого відкидається на протилежну плиту, подрібнюється і відводиться з камери подрібнення через решето 4 і вивантажувальний отвір 5.

Запропонована конструкція забезпечує отримання продукту вищої якості порівняно з молотковими дробарками (менше пиловидної фракції, більш рівномірний гранулометричний склад) при нижчих енергозатратах.

### Література

1. Myhailovych Y., Potapova S., Achkevych O., Achkevych V. Increasing efficiency of grinding process in single-roller grain mill. "Engineering for Rural Development". Volume 20. Jelgava, Latvia University of Agriculture. 2021. Pp. 712-717. doi.org/10.22616/ERDev.2021.20.TF156

2. Revenko I., Khmelovskyi V., Revenko Y., Rebenko V., Potapova S. Justification of parameters affecting increase of hammer crusher productivity. "Engineering for Rural Development". Volume 22. Jelgava, Latvia University of Agriculture. 2023. Pp. 714-720. doi.org/10.22616/ERDev.2023.22.TF142

3. Машини та обладнання для тваринництва. Навчальний посібник /В.С. Хмельовський, В.В. Братішко, В.І. Ребенко, О.О. Заболотько, С.Є. Потапова., О.М. Ачкєвич, В.І. Ачкєвич, М.І. Ікальчик. Київ: Редакційно-видавничий відділ НУБіП України, 2024. – 235 с.

УДК 621.87

## **МЕТОДИ ТА ПІДХОДИ ОПТИМІЗАЦІЇ РЕЖИМУ РУХУ РОБОТА З ОДНІЄЮ ПОСТУПАЛЬНОЮ ТА ДВОМА ОБЕРТАЛЬНИМИ ЛАНКАМИ**

*Ловейкін В.С., Кадикало І.О., Балюк Ю.А.*

*Національний університет біоресурсів і природокористування України*

Сучасний розвиток промислової робототехніки вимагає постійного вдосконалення систем керування для забезпечення максимальної продуктивності та енергоефективності. Роботи-маніпулятори, що мають комбіновану кінематичну структуру з однією поступальною та двома обертальними ланками, є специфічним класом механізмів, які часто використовуються в операціях сортування, палетування та обслуговування верстатів. Оптимізація режимів руху таких систем є складним науково-технічним завданням, оскільки поєднання різних типів з'єднань створює нелінійні динамічні ефекти, що впливають на точність та стабільність маніпуляцій. Дослідження методів оптимізації дозволяє не лише знизити енергетичні витрати, а й суттєво зменшити динамічні навантаження на приводи, що подовжує термін експлуатації обладнання.

Конструкція робота з однією поступальною та двома обертальними ланками зазвичай реалізується у вигляді циліндричної або сферичної конфігурації. Поступальна ланка забезпечує зміну вильоту стріли або висоти підйому, тоді як обертальні ланки відповідають за орієнтацію та кутове позиціонування робочого органа. Така структура дозволяє обслуговувати значні об'єми робочого простору при відносно невеликій площі основи. Основними сферами використання таких маніпуляторів є автоматизовані склади, де необхідна вертикальна подача вантажів, та складальні лінії в машинобудуванні. Вони можуть виконувати роботу з точного встановлення деталей у глибокі пази, завантаження заготовок у преси та пакування готової продукції. Перевагою такої конструкції є висока жорсткість поступальної пари у поєднанні з гнучкістю обертальних суглобів, проте недоліком залишається складність динамічного балансування при швидких змінах конфігурації.

Оптимізація режиму руху починається з побудови точної математичної моделі динаміки системи. Для робота з комбінованими ланками використовується рівняння Лагранжа другого роду, що дозволяє врахувати сили інерції, центробіжні сили та сили Коріоліса. Особливістю є те, що при русі поступальної ланки момент інерції обертальних ланок змінюється нелінійно, що створює додаткові збурення в системі керування. Першим підходом до оптимізації є планування траєкторії за критерієм мінімального часу. Це передбачає розв'язання варіаційної задачі, де обмеженнями виступають максимальні швидкості та прискорення приводів. Такий метод дозволяє досягти пікової продуктивності конвеєрних ліній, але часто призводить до виникнення вібрацій наприкінці руху.

Другим важливим підходом є оптимізація за критерієм енергоефективності. У цьому випадку траєкторія будується таким чином, щоб інтеграл квадрата напруги або моменту на двигунах був мінімальним. Для систем із поступальними ланками це означає вибір таких шляхів переміщення, де зміна радіуса обертання відбувається плавно, що дозволяє уникнути різких стрибків споживання енергії. Такий підхід особливо актуальний для автономних мобільних маніпуляторів або великих індустріальних систем, де витрати на електроенергію складають значну частину собівартості продукції.

Третім напрямком є впровадження адаптивних алгоритмів керування та інтелектуальних методів на основі нейронних мереж. Традиційні ПД-регулятори не завжди можуть ефективно компенсувати змінні параметри інерції, особливо коли маса вантажу заздалегідь невідома. Адаптивне керування дозволяє системі підлаштовувати коефіцієнти підсилення в реальному часі, забезпечуючи плавність руху без перерегулювання. Використання нечіткої логіки дозволяє ефективно боротися з люфтами в механічних передачах обертальних ланок та тертям у поступальній парі. Це забезпечує високу точність позиціонування, яка необхідна для виконання надточних операцій у біомедичній інженерії або мікроелектроніці.

Для успішної реалізації оптимізації також застосовуються методи сенсорної інтеграції. Використання акселерометрів на кінцевому ефекті та датчиків зусилля у вузлах дозволяє реалізувати зворотний зв'язок за станом. Це дає змогу вчасно демпфувати коливання, що виникають при швидкому висуванні поступальної ланки. Моделювання методом кінцевих елементів допомагає ще на етапі проектування виявити резонансні частоти конструкції, що є критичним для стабільної роботи при високих швидкостях.

Отже, оптимізація режимів руху роботів із комбінованою кінематикою є мультидисциплінарним завданням, що поєднує класичну механіку, теорію автоматичного керування та сучасні інформаційні технології. Використання розглянутих методів дозволяє підвищити точність маніпуляцій, знизити енергоспоживання та забезпечити надійність роботи систем у складних виробничих умовах. Подальші дослідження у цій галузі спрямовані на створення самонавчальних систем, які зможуть автоматично вибирати оптимальні режими руху залежно від поточного технологічного завдання.

### **Література**

1. Luo, Sha & Li, Qingdang. (2024). A review of the trajectory planning of Industrial robots. *Transactions on Engineering and Technology Research*. 2. 203-207. 10.62051/4dte6t19.
2. Siciliano, B., & Khatib, O. (2016). *Springer handbook of robotics*. SpringerLink.
3. Zhang, Y., & Chen, S. (2023). Intelligent control methods for robotic systems with variable inertia. *IEEE Xplore Open Access*.

УДК 621.87

## **АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЇ ТА ОСОБЛИВОСТЕЙ РОБОТИ СТРІЧКОВИХ КОНВЕЄРІВ**

*Ловейкін В.С., Кадикало І.О., Музика Н.С.*

*Національний університет біоресурсів і природокористування України*

Стрічкові конвеєри є найбільш поширеним та ефективним видом транспорту безперервної дії, який використовується для переміщення сипучих, кускових та штучних вантажів. Популярність цього обладнання зумовлена відносною простотою конструкції, високою продуктивністю та можливістю автоматизації процесів транспортування на великі відстані. У сучасних умовах промислового виробництва, сільського господарства та логістики стрічкові конвеєри виконують роль основної сполучної ланки між окремими технологічними операціями.

Конструкція типового стрічкового конвеєра складається з декількох основних вузлів, кожен з яких виконує специфічну функцію. Основним робочим та тяговим органом є нескінченна гнучка стрічка, яка огинає приводний та натяжний барабани. Стрічка підтримується по всій довжині спеціальними роликоопорами, які запобігають її провисанню під вагою вантажу. Приводна станція, що включає електродвигун та редуктор, передає обертальний момент на приводний барабан, який завдяки силам тертя приводить стрічку в рух. Для забезпечення необхідного натягу стрічки та компенсації її витягування в процесі експлуатації використовується натяжний пристрій, який може бути гвинтовим або вантажним. Вся конструкція базується на жорсткій металевій станині, що забезпечує стабільність роботи системи.

Стрічкові конвеєри мають надзвичайно широку сферу використання. У гірничодобувній промисловості вони незамінні для транспортування вугілля, руди та щебеню з кар'єрів на збагачувальні фабрики. В агропромисловому комплексі їх застосовують для переміщення зерна на елеваторах, подачі кормів або транспортування готової продукції на складах. Логістичні центри використовують конвеєри для автоматизованого сортування посилок та багажу. Крім того, стрічкові конвеєри є базовим елементом складальних ліній у машинобудуванні, де вони забезпечують плавне переміщення вузлів від одного робочого місця до іншого. Можливість встановлення конвеєрів під кутом до тридцяти градусів дозволяє ефективно використовувати їх для підйому вантажів на різні рівні виробничих будівель.

Робота стрічкового конвеєра полягає у безперервному переміщенні потоку матеріалу з точки завантаження до точки розвантаження. Завдяки високій швидкості руху стрічки, яка може досягати декількох метрів на секунду, забезпечується величезна пропускна здатність, недоступна для циклічних видів транспорту. Конвеєри можуть виконувати не лише транспортні, а й технологічні операції, такі як дозування матеріалів, їх охолодження або сушіння під час руху, а також зважування вантажу за допомогою вбудованих конвеєрних ваг.

Використання сучасних полімерних та гумовотканинних стрічок дозволяє працювати з агресивними матеріалами та при екстремальних температурах.

Переваги стрічкових конвеєрів роблять їх пріоритетним вибором для багатьох підприємств. По-перше, це висока продуктивність, яка забезпечується безперервністю процесу. По-друге, конвеєри мають низьку питому енергоємність на одиницю транспортованого вантажу порівняно з автомобільним транспортом. По-третє, конструкція дозволяє створювати траси великої протяжності шляхом послідовного встановлення декількох конвеєрів, що мінімізує кількість перевантажувальних вузлів. Також варто відзначити високий рівень безпеки праці, оскільки процес повністю автоматизований і не потребує постійної присутності персоналу безпосередньо біля рухомих частин.

Незважаючи на численні переваги, стрічкові конвеєри мають і певні недоліки. Основним з них є обмежений кут нахилу траси, що при транспортуванні сипучих вантажів зазвичай не перевищує двадцяти градусів, інакше матеріал починає сповзати назад. Стрічка є найбільш дорогим і вразливим елементом конструкції, вона схильна до швидкого зносу, особливо при роботі з абразивними або гарячими матеріалами. Крім того, стрічкові конвеєри чутливі до налипання вологого матеріалу на барабани та ролики, що вимагає встановлення спеціальних очисних пристроїв. Також вони мають обмежену придатність для транспортування дуже липких або надто пилоподібних вантажів без додаткових захисних кожухів.

Висновок: аналіз конструкції та експлуатаційних характеристик стрічкових конвеєрів підтверджує їхню високу ефективність у сучасній індустрії. Подальший розвиток цього обладнання пов'язаний із застосуванням нових надміцних матеріалів для стрічок, впровадженням інтелектуальних систем моніторингу стану підшипників та натягу стрічки, а також оптимізацією приводів для зниження пускових навантажень. Правильний вибір типу конвеєра та режимів його роботи дозволяє значно знизити експлуатаційні витрати та підвищити загальну рентабельність виробництва.

### **Література**

1. Metal Conveyor Belts - China Metal Conveyor Belts Manufacturers Suppliers Factory
2. He, D., Pang, Y., Lodewijks, G., & Liu, X. (2017). Determination of resistance to motion of belt conveyors. *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering*, 11(5), 903-911.
3. Lauhoff, H.. (2005). Speed control on belt conveyors - Does it really save energy?. *Bulk Solids Handling*. 25. 368-377.

УДК 621.87

## МЕТОДИ ТА ПІДХОДИ ОПТИМІЗАЦІЇ РЕЖИМУ РУХУ РОБОТА З ТРЬОМА ПОСТУПАЛЬНИМИ ЛАНКАМИ

*Ловейкін В.С., Кадикало І.О., М'язко М.В.*

*Національний університет біоресурсів і природокористування України*

Розвиток сучасної індустрії та перехід до концепції розумного виробництва вимагають впровадження високоточних механізмів, здатних виконувати складні маніпуляційні завдання з мінімальними похибками. Серед великого розмаїття роботизованих систем особливе місце посідають роботи з трьома поступальними ланками, що працюють у декартовій системі координат. Завдяки своїй конструктивній жорсткості, лінійності переміщень та відносній простоті алгоритмів керування, такі маніпулятори стали основою для систем 3D-друку, фрезерних верстатів із числовим програмним керуванням, а також автоматизованих ліній сортування. Проте зростання вимог до швидкодії та енергоефективності ставить перед інженерами нові виклики, пов'язані з необхідністю глибокої оптимізації їхніх режимів руху.

Конструкція маніпулятора з трьома поступальними ланками базується на послідовному або паралельному з'єднанні лінійних приводів, що забезпечують рух вздовж осей X, Y та Z. Така архітектура дозволяє формувати робочу зону у формі паралелепіпеда, що є найбільш зручним для більшості промислових операцій. Сфера використання таких роботів охоплює електронну промисловість, де необхідна надточна розстановка компонентів на плати, харчову галузь для пакування продукції та медичну сферу для лабораторних досліджень. Вони можуть виконувати роботу з переміщення важких заготовок, нанесення клею або герметика за складною траєкторією, а також прецизійне вимірювання геометрії виробів. Головною перевагою декартової конструкції є відсутність складних тригонометричних перетворень у системі координат, що забезпечує стабільну точність у будь-якій точці робочого простору. Водночас недоліком є значна металомісткість та інерційність масивних ланок, що обмежує граничні прискорення.

Оптимізація режиму руху таких систем базується на комплексному аналізі динамічних характеристик. Першочерговим підходом є розробка законів руху, що забезпечують мінімізацію «ривка» (похідної прискорення). Використання S-подібних профілів швидкості замість традиційних трапецієподібних дозволяє суттєво зменшити вібрації конструкції та навантаження на механічні передачі. Це критично важливо для роботів із трьома поступальними ланками, оскільки різка зміна напрямку руху однієї з масивних осей може спричинити деформацію всієї рами, що призведе до втрати точності позиціонування кінцевого ефектора.

Важливим аспектом є енергетична оптимізація. Оскільки кожна ланка робота приводиться в дію окремим електродвигуном, сумарне енергоспоживання залежить від узгодженості їхньої роботи. Методи динамічного програмування дозволяють розраховувати такі траєкторії, при яких

прискорення розподіляються рівномірно між осями, уникаючи пікових навантажень на окремі приводи. У декартових системах це часто реалізується через згладжування кутів при переході між лінійними сегментами шляхом впровадження кривих Безьє або сплайнів. Такий підхід не лише економить електроенергію, а й дозволяє підтримувати вищу середню швидкість руху робочого органа.

Адаптивні методи керування складають третій рівень оптимізації. Попри те, що кінематика декартового робота лінійна, динамічні параметри можуть змінюватися залежно від маси вантажу, який переміщується. Впровадження алгоритмів із самоналаштуванням дозволяє системі автоматично корегувати коефіцієнти регуляторів у разі зміни інерції. Це забезпечує однаковий рівень динамічної точності як при роботі з легким інструментом, так і при транспортуванні масивних об'єктів. Сучасні підходи також передбачають використання методів машинного навчання для прогнозування зносу напрямних та компенсації сил тертя, що виникають у поступальних парах.

Крім того, оптимізація включає вибір раціональних геометричних параметрів конструкції. Використання легких композитних матеріалів для рухомих ланок при збереженні жорсткості станини дозволяє підвищити власні частоти системи. Моделювання методом кінцевих елементів дає змогу визначити зони найбільших напружень та полегшити конструкцію там, де це не зашкодить точності. Комбінація механічної досконалості з інтелектуальними алгоритмами планування траєкторій робить декартові роботи з трьома поступальними ланками максимально ефективними.

Підсумовуючи, можна стверджувати, що методи оптимізації режиму руху є ключовим інструментом підвищення конкурентоспроможності роботизованих систем. Впровадження комплексних підходів, що включають кінематичне згладжування, енергоефективне планування та адаптивне керування, дозволяє досягти нового рівня продуктивності. Це забезпечує надійну роботу маніпуляторів у складних промислових умовах, зменшує експлуатаційні витрати та відкриває нові можливості для автоматизації високотехнологічних процесів.

### **Література**

1. Munasinghe, R. & Nakamura, Masatoshi. (2006). Trajectory Planning and Control of Industrial Robot Manipulators. 10.5772/5032.
2. Siciliano, B., & Khatib, O. (2016). Springer handbook of robotics. SpringerLink.

УДК 621.87

## МЕТОДИ ТА ПІДХОДИ ОПТИМІЗАЦІЇ РУХОМ МЕХАНІЗМУ ПОВОРОТУ РОБОТА

*Ловейкін В.С., Кадикало І.О., Олексієнко Д.В.*

*Національний університет біоресурсів і природокористування України*

Сучасний розвиток автоматизованих систем керування висуває жорсткі вимоги до динамічних характеристик поворотних механізмів роботизованих пристроїв. Механізм повороту є фундаментальним вузлом більшості промислових маніпуляторів, мобільних роботів та антропоморфних систем, оскільки він забезпечує кутову орієнтацію робочого органа або всієї платформи в просторі. Ефективність функціонування такого вузла безпосередньо залежить від обраного режиму руху, який впливає на енергоспоживання, точність позиціонування та тривалість безвідмовної роботи приводів. Оптимізація процесу повороту є складним завданням, що потребує врахування нелінійних ефектів, таких як зміна моменту інерції, тертя в підшипниках та пружні деформації елементів передачі.

Конструкція механізму повороту зазвичай базується на використанні електромеханічного або гідравлічного привода, з'єданого з вихідною ланкою через редуктор (хвильовий, планетарний або черв'ячний). Такі механізми широко використовуються в зварювальних роботах, де необхідна висока кутова точність, у логістичних роботах для зміни напрямку руху платформи, а також у системах спостереження для панорамування камер. Можливості механізму дозволяють здійснювати як швидкісні переміщення на великі кути, так і прецизійне мікрокрокове регулювання. Головною перевагою сучасних поворотних модулів є їхня висока інтегрованість та здатність нести великі осьові та радіальні навантаження. Проте основним недоліком залишається виникнення динамічних автоколивань при різкій зупинці, що потребує спеціальних методів демпфування та оптимізації траєкторій.

Одним із базових підходів до оптимізації є використання поліноміальних законів руху. Традиційні методи, що базуються на постійних швидкостях, призводять до ударних навантажень у моменти пуску та гальмування. Застосування поліномів п'ятого або сьомого ступеня дозволяє сформувати плавні профілі кутового прискорення, що мінімізує зношення зубчастих зачеплень та запобігає збудженню резонансних частот конструкції. Це особливо актуально для маніпуляторів із великим вильотом стріли, де навіть незначні вібрації в основі повороту призводять до значних амплітуд коливань кінцевого ефектора. Оптимізація за критерієм мінімального часу при заданих обмеженнях на потужність двигуна дозволяє максимально використовувати потенціал обладнання на швидкісних складальних лініях.

Іншим важливим напрямком є енергетична оптимізація режиму повороту. Оскільки значна частина енергії витрачається на подолання сил інерції під час розгону, актуальним є застосування методів динамічного програмування для

розрахунку енергоефективних траєкторій. Впровадження алгоритмів, що використовують рекуперативне гальмування або оптимізують кутове переміщення таким чином, щоб уникнути пікових значень струму в обмотках двигуна, дозволяє знизити теплові втрати та підвищити ККД системи. У роботах із мобільним живленням це безпосередньо впливає на тривалість автономної роботи без підзарядки.

Сучасні підходи до керування поворотом також включають інтелектуальну компенсацію сил тертя та люфтів. Оскільки в механічних передачах завжди присутні зазори, під час реверсивного руху виникають помилки позиціонування. Оптимізація в цьому випадку полягає у розробці спостерігачів стану та викоренні алгоритмів адаптивного керування, які в реальному часі оцінюють момент опору та вносять відповідні корективи в керуючий сигнал. Використання нечіткої логіки та нейромережових моделей дозволяє системі «навчатися» під час виконання повторюваних операцій, поступово зменшуючи відхилення від заданої кутової координати.

Окрему увагу слід приділити методам модального керування та активного придушення вібрацій. Завдяки встановленню додаткових датчиків (гіроскопів або акселерометрів) на рухомій ланці, стає можливим реалізувати алгоритми зворотного зв'язку, які миттєво реагують на виникнення пружних коливань. Це дозволяє здійснювати поворот із вищими швидкостями без втрати якості виконання технологічної операції. Оптимізація жорсткості механізму у поєднанні з програмною компенсацією забезпечує синергетичний ефект для досягнення прецизійних показників точності.

Підсумовуючи, можна стверджувати, що оптимізація режиму руху механізму повороту є ключовою умовою створення конкурентоспроможної робототехніки. Поєднання методів плавного планування траєкторій, енергетичної ефективності та інтелектуальної адаптації дозволяє створювати системи, що відповідають найвищим стандартам сучасної автоматизації. Подальші дослідження у цій сфері мають бути спрямовані на розробку універсальних алгоритмів, здатних автоматично підлаштовуватися під змінні умови навантаження та динамічні характеристики довкілля.

### **Література**

1. Munasinghe, R. & Nakamura, Masatoshi. (2006). Trajectory Planning and Control of Industrial Robot Manipulators. 10.5772/5032.
2. Siciliano, B., & Khatib, O. (Eds.). (2016). Springer Handbook of Robotics (2nd ed.). Springer International Publishing.
3. Dzedzickis, Andrius & Subaciute-Zemaitiene, Jurga & Šutinys, Ernestas & Prentice, Urte & Bučinskas, Vytautas. (2021). Advanced Applications of Industrial Robotics: New Trends and Possibilities. Applied Sciences. 12. 135. 10.3390/app12010135.

УДК 621.87

## **ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ МЕХАНІЗМУ ПОВОРОТУ СТІЛОВОГО КРАНА З ПОДВІЙНИМ МАЯТНИКОВИМ ПІДВІСОМ**

*Ловейкін В.С., Кадикало І.О., Чмуль О.А.*

*Національний університет біоресурсів і природокористування України*

Під час виконання монтажних робіт стріловими кранами при встановленні складних конструкцій широко застосовуються захватні пристрої, маса яких є співмірною або близькою до маси вантажу. У таких умовах система «вантаж – захватний пристрій – підвіс» характеризується складною динамічною поведінкою, що ускладнює процес керування та підвищує вимоги до точності розрахунків. Для адекватного опису такої системи гнучкий підвіс вантажу доцільно представляти у вигляді моделі подвійного математичного маятника, яка дозволяє врахувати взаємозв'язок між окремими ланками системи.

У даній роботі розглянуто динаміку механізму повороту стрілового крана з гнучким підвісом вантажу, що моделюється, як подвійний маятник. Актуальність дослідження обумовлена необхідністю підвищення точності роботи кранів при виконанні монтажних операцій та зменшення динамічних навантажень у конструкції. Основною метою дослідження є побудова математичної моделі та проведення динамічного аналізу руху механізму повороту з урахуванням впливу різних факторів на характер коливальних процесів. Механізм повороту крана представлено у вигляді динамічної системи з чотирма ступенями вільності, що дозволяє врахувати, як основний рух приводу, так і коливальні процеси у підвісній системі.

На основі прийнятої динамічної моделі з використанням рівнянь Лагранжа другого роду побудовано математичну модель механізму повороту, яка описується системою нелінійних диференціальних рівнянь другого порядку. У даній моделі враховано динамічну механічну характеристику електродвигуна приводу, що дозволяє більш точно відобразити реальні умови роботи механізму. Розв'язання системи рівнянь здійснювалося чисельним методом із застосуванням спеціалізованої комп'ютерної програми, що забезпечило отримання повної картини руху системи.

У результаті чисельного аналізу визначено кінематичні, динамічні та енергетичні характеристики механізму повороту стрілового крана. Проведене дослідження показало, що у системі виникають, як високочастотні коливання елементів передавального механізму приводу, так і низькочастотні маятникові коливання вантажу та захватного пристрою. При цьому встановлено, що низькочастотні коливання практично не затухають і зберігаються протягом усього періоду руху, що негативно впливає на стійкість, точність позиціонування та якість виконання технологічних операцій.

Додатково виявлено, що такі коливальні процеси ускладнюють керування рухом крана, особливо при виконанні точних монтажних робіт. Особливу увагу приділено впливу характеру зміни рушійного моменту приводу на динаміку

системи. Встановлено, що різка зміна моменту електродвигуна призводить до виникнення інтенсивних коливальних процесів, які характеризуються значною амплітудою та тривалим часом затухання. Це, у свою чергу, спричиняє зростання динамічних навантажень у елементах конструкції крана та збільшення енергетичних витрат у приводі механізму повороту.

Крім того, підвищені динамічні навантаження можуть призводити до прискореного зношування вузлів і зниження надійності роботи обладнання. Це потребує вдосконалення режимів керування приводом та впровадження заходів для зменшення коливань системи.

З метою зменшення негативного впливу коливальних процесів запропоновано застосовувати режими плавної зміни рушійного моменту під час пуску та гальмування приводу. Використання таких режимів дозволяє знизити рівень динамічних навантажень, зменшити амплітуду коливань та забезпечити більш стабільний рух вантажу. Це є особливо важливим при виконанні точних монтажних операцій, де необхідна висока точність позиціонування.

За результатами проведеного дослідження встановлено, що розроблена динамічна модель адекватно відображає поведінку механізму повороту стрілового крана з урахуванням взаємодії приводу та підвісної системи. Динамічний аналіз підтвердив наявність суттєвих коливань кінематичних, динамічних та енергетичних характеристик, що впливають на ефективність роботи крана. Визначено, що основною причиною виникнення незатухаючих коливань є характер зміни рушійного моменту приводу, зокрема його різка зміна.

Отже, для підвищення ефективності роботи стрілових кранів доцільно здійснювати оптимізацію режимів пуску та гальмування приводу механізму повороту. Запропонований підхід дозволяє зменшити динамічні навантаження, підвищити надійність конструкції та покращити експлуатаційні характеристики обладнання. Отримані результати можуть бути використані при проектуванні та модернізації підйомно-транспортних машин, а також при розробці сучасних систем керування.

УДК 621.87

## **МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ РОБОТІВ-МАНІПУЛЯТОРІВ З ВАЖІЛЬНИМ ЗАХВАТНИМ ПРИСТРОЄМ**

*Ловейкін В.С., Кадикало І.О., Юр'єв І.Ю.*

*Національний університет біоресурсів і природокористування України*

Роботи-маніпулятори є складними технічними системами, що призначені для виконання різноманітних рухових та технологічних функцій, які за своїми характеристиками подібні до дій людської руки. На сьогодні вони стали невід'ємною частиною автоматизованих виробничих процесів, забезпечуючи високу швидкість, точність та повторюваність операцій. Основним завданням маніпулятора є переміщення об'єктів або інструментів у просторі за заданою траєкторією. Конструкція кожного робота визначається його кінематичною схемою, яка безпосередньо впливає на його функціональні можливості, робочу зону та ефективність у конкретній сфері застосування.

Одним із найпоширеніших типів є декартові роботи, конструкція яких базується на лінійних напрямних, розташованих у трьох взаємно перпендикулярних площинах. Такі маніпулятори зазвичай мають вигляд порталних або консольних систем. Вони широко використовуються у металообробці, на верстатах із числовим програмним керуванням, для лазерного різання, а також у складській логістиці для палетування вантажів. Основною перевагою декартових роботів є висока жорсткість конструкції та простота розрахунків їхнього руху, оскільки координати робочого органа збігаються з фізичними осями. Вони здатні переміщувати важкі вантажі з великою точністю. Проте головним недоліком є значні габарити самої установки, що часто перевищують розмір робочої зони, а також обмежена маневреність, що не дозволяє робочому органу підходити до деталей під складними кутами.

Іншим важливим різновидом є циліндричні роботи, конструкція яких поєднує одну обертальну вісь в основі та дві лінійні осі. Така схема дозволяє робочому органу обслуговувати зону у формі циліндра. Їх часто застосовують для обслуговування пресів, ливарних машин або при виконанні точкового зварювання. Перевагою такої конструкції є компактність основи при достатньо великому вильоті стріли. Однак обмежена кількість ступенів вільності робить їх непридатними для виконання складних складальних операцій, де потрібна висока просторова орієнтація інструмента.

Окрему групу складають SCARA-роботи, які мають два паралельні обертальні шарніри, що забезпечують рух у горизонтальній площині, та одну лінійну вісь для вертикального переміщення. Це робить їх ідеальними для операцій швидкого збирання, деталь за деталлю. Їх використовують в електронній промисловості для монтажу плат, у фармації та харчовій галузі. Головна перевага SCARA-роботів – це надзвичайно висока швидкість роботи та точність позиціонування при виконанні монотонних циклічних завдань.

Недоліком є вузька спеціалізація: вони фактично обмежені роботою на плоских поверхнях і не можуть виконувати маніпуляції у вертикальних площинах під нахилом.

Найбільш універсальними є антропоморфні або шарнірні роботи. Їхня конструкція складається з послідовно з'єднаних ланок через обертальні шарніри, що за своєю структурою нагадує анатомію людини. Такі маніпулятори мають від п'яти до семи ступенів вільності. Сфера їх застосування охоплює автомобільну промисловість, зварювання складних швів, фарбування поверхонь довільної форми та навіть хірургію. Основна перевага полягає у винятковій маневреності: робот може обходити перешкоди та працювати у важкодоступних місцях. Однак складність конструкції зумовлює високу вартість, складне технічне обслуговування та потребу в потужних обчислювальних системах для розрахунку траєкторій руху.

Також варто виділити дельта-роботи, що належать до систем із паралельною кінематикою. Вони складаються з трьох важелів, з'єднаних з однією платформою. Їх використовують переважно для сортування дрібних предметів на конвеєрах. Головною перевагою є неймовірна швидкість прискорень, оскільки всі двигуни нерухомо закріплені на рамі. Проте вони мають дуже малу вантажопідйомність і обмежений робочий об'єм.

Важливим елементом будь-якої конструкції є захватний пристрій, який може бути механічним, вакуумним або магнітним. Механічні важільні захвати є найпоширенішими завдяки своїй надійності при роботі з деталями різної форми. Вони дозволяють виконувати силові операції, але потребують точного розрахунку зусилля затискання, щоб не пошкодити об'єкт.

Як висновок вибір конкретної конструкції маніпулятора залежить від балансу між швидкістю, вантажопідйомністю та необхідною гнучкістю. Використання роботів-маніпуляторів дозволяє повністю виключити людський фактор у небезпечних зонах, підвищити стабільність якості продукції та суттєво знизити собівартість виробництва в довгостроковій перспективі. Розвиток технологій і надалі буде спрямований на полегшення конструкцій та підвищення їхньої інтелектуальної складової.

### Література

1. Siciliano, B., & Khatib, O. (Eds.). (2016). *Springer Handbook of Robotics*. Springer International Publishing. <https://www.sciencedirect.com/book/9780128185124/kinematics-of-industrial-robots>.

2. Dzedzickis, Andrius & Subaciute-Zemaitiene, Jurga & Šutinys, Ernestas & Prentice, Urte & Bučinskas, Vytautas. (2021). *Advanced Applications of Industrial Robotics: New Trends and Possibilities*. Applied Sciences. 12. 135. 10.3390/app12010135.

УДК 669.18

## **ПІДВИЩЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ МЕТАЛООБРОБНИХ ВЕРСТАТІВ**

*Похиленко Г.М.*

*Національний університет біоресурсів і природокористування України*

Підвищення продуктивності металообробних верстатів досягається за рахунок впровадження ЧПК (CNC), автоматизації затискних пристроїв, використання сучасного інструменту та концентрації технологічних переходів. Це дозволяє скоротити час обробки, зменшити простой та підвищити точність виготовлення, часто замінюючи кілька універсальних верстатів одним автоматизованим комплексом.

В умовах серійного виробництва підхід багатьох компаній використання комбінованого інструменту, це один із найефективніших способів підвищення продуктивності на VMC (вертикальних) та HMC (горизонтальних) оброблювальних центрах, що призводить до скорочення часу обробки.

Основними перевагами для обробки є скорочення часу на зміну інструменту, наприклад, замість 10–30 секунд на кожну зміну інструмента ви виконуєте кілька операцій одним інструментом (наприклад, свердління + зенкування + цекування). Або зменшення холостих переміщень інструменту не потрібно щоразу повертатися до інструментального магазину та знову підходити до деталі. Виконання комбінованих інструментів за один прохід мінімізує похибки позиціонування, які виникають при зміні інструментів. Звільнення місць в інструментальному магазині критично для складних деталей, де стандартних 24–40 позицій на VMC може не вистачати.

Також існують проблеми. Швидкість різання знижується, щоб збільшити термін служби інструменту, який має найкоротший термін служби. Не всі інструменти зношуються однаково одночасно. Це особливо актуально для твердосплавних інструментів під час повторного заточування. Стружка від одного інструменту може забиватися в сусідній інструмент. Оскільки параметри різання неможливо оптимізувати для всіх інструментів, може виникнути проблема з поломкою стружки. Чорнова обробка комбінованим інструментом є прийнятною, але не чистою, оскільки на чистову обробку впливає вихід або вхід іншої ріжучої кромки в процес різання.

Інший підхід до підвищення продуктивності - впровадження LCA, особливо під час складальних операцій. LCA (Life Cycle Assessment)— це оцінка життєвого циклу, науковий метод аналізу екологічного впливу продукту, послуги або процесу протягом усього їхнього існування, від видобутку сировини, виробництва, транспортування та використання до утилізації чи переробки (принцип «від колиски до могили»). Безумовно, це підвищує продуктивність і мотивує працівників. Ще однією перевагою є те, що ці знання збираються власними силами. Для розробки LCA потрібні інвестиції в навчання персоналу. Для цього необхідно і потрібно впровадження сильної системи 5S (впорядкування), принципи Kaizen (безперервне вдосконалення) та культура, що

стимулює розвиток. Це означає перехід до дисципліни, усунення втрат, чистоти на робочих місцях та залучення кожного працівника до покращень.

Основні складові 5S (Сортування, Впорядкування, Чистота, Стандартизація, Підтримання), яка забезпечує організований, чистий та ефективний робочий простір. Kaizen (Безперервне вдосконалення) - культура, де кожен (від керівника до робітника) постійно шукає шляхи покращення процесів. Enabling Culture (Культура, що стимулює) - створення середовища, де працівники мають повноваження та мотивацію впроваджувати зміни.

Вибір правильного ріжучого інструменту та оптимізація параметрів різання мають вирішальне значення для скорочення часу механічної обробки та збільшення терміну служби інструменту. Компанії інвестують в дорожчі інструменти та використовують вищі параметри різання, що зменшує собівартість одного виробу завдяки кращому використанню потужності та продуктивності верстата, а також скороченню часу механічної обробки. Багато компаній використовують підхід до моніторингу навантаження шпинделя та забезпечення його оптимального використання. Цей підхід потребує ретельного збору даних для перевірки результатів та періодичного моніторингу.

САМ-програмування (Computer-aided manufacturing) — це використання спеціального програмного забезпечення для створення керуючих програм (G-код) для верстатів з ЧПК (CNC) на основі 3D-моделей (CAD). Воно автоматизує проектування траєкторій інструменту при фрезеруванні, точінні, свердлінні та 3D-друку, значно пришвидшуючи виробництво, знижуючи кількість помилок та оптимізуючи обробку деталей. Виробники досліджують траєкторію інструменту, що зменшує переміщення різання повітрям, завдяки чому шпиндель ріже метал швидше, ніж повітря. Іноді через особливі причини в програму вносяться ручні зміни, що призводить до зменшення оптимізованого часу обробки.

Деякі виробництва модернізують пристосування та елементи кріплення для збільшення номенклатури деталей або зменшення кількості налаштувань. Деякі виробники додали 4-ту або 5-ту додаткову вісь на своїх верстатах, щоб зменшити час на затискання та налаштування. Тобто розширюються технологічних можливостей вже наявних верстатів.

Зняття задирок після механічної обробки є великою проблемою і складним процесом у більшості виробництв. Було використано кілька підходів, включаючи розробку спеціальних інструментів для видалення задирок на самому верстаті з ЧПК, а також використання різних матеріалів для видалення задирок.

Для оптимізації параметрів різання на виробництвах широко використовують ANOVA та DOE. Використання DOE (планування експерименту) та ANOVA (дисперсійний аналіз) — це потужний комплекс методів для оптимізації процесів, визначення впливу факторів та підвищення якості продукції. DOE структурує збір даних, а ANOVA статистично підтверджує, які фактори (і їх взаємодії) значущо впливають на результат. Однак це вимагає гарного внутрішнього розуміння змінних процесу та знання методики.

УДК 621.873

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ОПТИМАЛЬНОГО ЗА ШВИДКОДІЄЮ КЕРУВАННЯ МЕХАНІЗМОМ ПОВОРОТУ БАШТОВОГО КРАНА

*Ловейкін В.С., Ромасевич Ю.О., Стехно О.В., Квасницький А.В.*

*Національний університет біоресурсів і природокористування України*

Ефективна відбудова різного типу будівель та інфраструктурних об'єктів в Україні вимагає наявності на будівництві продуктивних баштових кранів. Підвищити продуктивність та ефективність експлуатації баштових кранів можна за рахунок визначення оптимального за швидкодією керування механізмом повороту, при якому маятникові коливання закріпленого на гнучкому підвісі вантажу усуваються протягом перехідного режиму пуску.

Для проведення досліджень використаємо двомасову динамічну модель механізму повороту баштового крана (рис. 1).

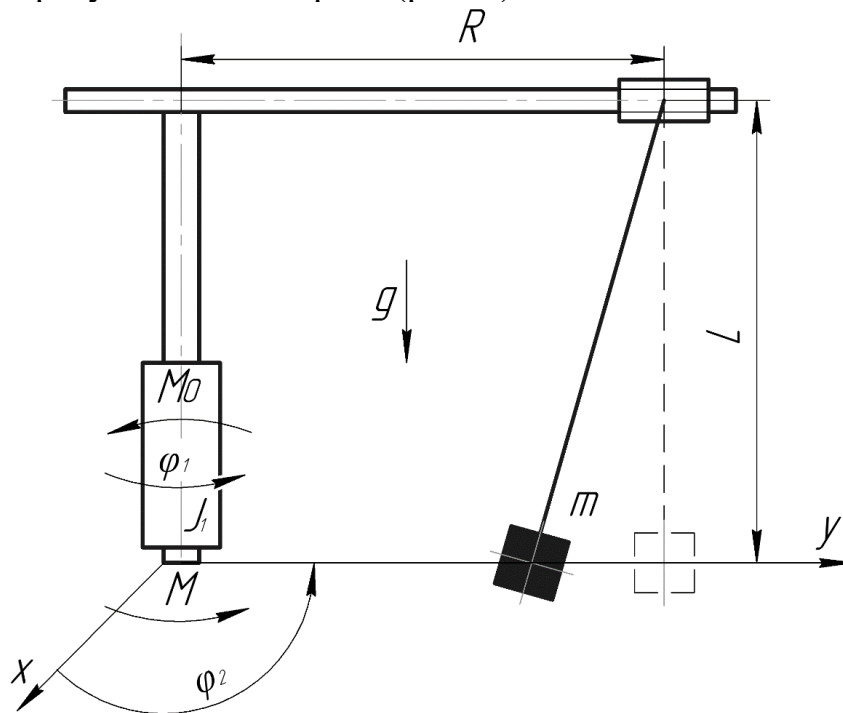


Рис. 1. Двомасова динамічна модель механізму повороту баштового крана.

На рис. 1 введено наступні позначення:  $M$  – зведений до осі повороту крана рушійний момент приводу електродвигуна;  $M_0$  – зведений до осі повороту крана момент сил статичного опору;  $L$  – довжина гнучкого підвісу вантажу;  $R$  – довжина вильоту вантажу;  $g$  – пришвидження вільного падіння;  $J_1$  – зведений до осі повороту баштового крана момент інерції елементів приводу, башти та стріли баштового крана.

В якості узагальнених координат у динамічній моделі (рис. 1) прийняті: зведена до осі обертання крана кутова координата повороту елементів приводу, башти та стріли  $\varphi_1$  і кутова координата повороту закріпленого на гнучкому підвісі вантажу  $\varphi_2$ .

Рівняння, що описують рух представленої динамічної моделі (рис. 1) механізму повороту мають наступний вигляд [1]:

$$\begin{cases} J_1 \cdot \ddot{\varphi}_1 = M - m \cdot R^2 \cdot \frac{g}{L} \cdot (\varphi_1 - \varphi_2) - M_o \cdot \text{sign}(\dot{\varphi}_1); \\ \ddot{\varphi}_2 = \frac{g}{L} \cdot (\varphi_1 - \varphi_2). \end{cases} \quad (1)$$

Крапка над символом означає диференціювання за часом. Представимо перше рівняння з системи диференціальних рівнянь (1) у іншому вигляді, після чого матимемо наступний вираз:

$$J_1 \cdot \ddot{\varphi}_1 + m \cdot R^2 \cdot \frac{g}{L} \cdot (\varphi_1 - \varphi_2) = M - M_o. \quad (2)$$

Розділивши ліву та праву частину рівняння (2) на величину  $J_1$ , отримаємо таку залежність:

$$\ddot{\varphi}_1 + \frac{m \cdot R^2}{J_1} \cdot \frac{g}{L} \cdot (\varphi_1 - \varphi_2) = \frac{M - M_o}{J_1}. \quad (3)$$

Для спрощення залежності (3), введемо наступні позначення  $\Omega^2 = \frac{m \cdot R^2}{J_1} \cdot \frac{g}{L}$  та  $U = \frac{M - M_o}{J_1}$ , після чого матимемо рівняння [1]:

$$\ddot{\varphi}_1 + \Omega^2 \cdot (\varphi_1 - \varphi_2) = U. \quad (4)$$

Величина  $\Omega$  означає період власних коливань маятника із рухомою точкою підвісу, який визначається за наступною залежністю:

$$\Omega = \sqrt{\frac{m \cdot R^2}{J_1} \cdot \frac{g}{L}}. \quad (5)$$

Поклавши  $J_1 \rightarrow \infty$  із залежності (5) можемо визначити період власних коливань маятника із нерухомою точкою підвісу, який визначається наступним чином:

$$\Omega_0 = \sqrt{\frac{g}{L}}. \quad (6)$$

Записавши систему диференціальних рівнянь (1) із врахуванням відповідних замін (4) – (6), отримаємо [1]:

$$\begin{cases} \ddot{\varphi}_1 + \Omega^2 \cdot (\varphi_1 - \varphi_2) = U; \\ \ddot{\varphi}_2 = \Omega_0^2 \cdot (\varphi_1 - \varphi_2). \end{cases} \quad (7)$$

Із другого рівняння системи (7) виразимо кутову координату  $\varphi_1$  через координату  $\varphi_2$ , після чого отримаємо:

$$\varphi_1 = \varphi_2 + \Omega_0^{-2} \cdot \ddot{\varphi}_2. \quad (8)$$

Взявши першу та другу похідні за часом від виразу (8), отримаємо вирази:

$$\dot{\varphi}_1 = \dot{\varphi}_2 + \Omega_0^{-2} \cdot \ddot{\varphi}_2. \quad (9)$$

$$\ddot{\varphi}_1 = \ddot{\varphi}_2 + \Omega_0^{-2} \cdot \overset{IV}{\varphi}_2. \quad (10)$$

Підставимо вираз (10) у перше рівняння системи (7), в результаті чого отримаємо наступне рівняння:

$$\ddot{\varphi}_2 + \Omega_0^{-2} \cdot \overset{IV}{\varphi}_2 + \Omega^2 \cdot \ddot{\varphi}_2 \cdot \Omega_0^{-2} = U. \quad (11)$$

Після виконання перетворень рівняння (11) представляється у вигляді:

$$\overset{IV}{\varphi}_2 + \ddot{\varphi}_2 \cdot \Omega_0^2 + \Omega^2 \cdot \ddot{\varphi}_2 = U \cdot \Omega_0^2. \quad (12)$$

В рівнянні (12) винесемо  $\ddot{\varphi}_2$  за дужки та отримаємо наступний вираз:

$$\overset{IV}{\varphi}_2 + \ddot{\varphi}_2 \cdot (\Omega_0^2 + \Omega^2) = U \cdot \Omega_0^2. \quad (13)$$

Виконавши відповідні перетворення, отримаємо наступну залежність:

$$\Omega_0^2 + \Omega^2 = \frac{g}{L} + \frac{m \cdot R^2}{J_1} \cdot \frac{g}{L} = \left(1 + \frac{m \cdot R^2}{J_1}\right) \cdot \frac{g}{L} = \tilde{\Omega}. \quad (14)$$

Підставивши  $\tilde{\Omega}$  замість суми  $\Omega_0^2 + \Omega^2$  у вираз (14), матимемо рівняння:

$$\overset{IV}{\varphi}_2 + \ddot{\varphi}_2 \cdot \tilde{\Omega} = U \cdot \Omega_0^2. \quad (15)$$

Перепишемо рівняння (15) в іншому вигляді:

$$\overset{IV}{\varphi}_2 = U \cdot \Omega_0^2 - \ddot{\varphi}_2 \cdot \tilde{\Omega}. \quad (16)$$

Ведемо позначення  $y_1 = \overset{IV}{\varphi}_2$ . Після виконання необхідних перетворень запишемо рівняння (16) у формі диференціальних рівнянь Коші [1]:

$$\begin{cases} \dot{y}_1 = y_2; \\ \dot{y}_2 = y_3; \\ \dot{y}_3 = U \cdot \Omega_0^2 - y_2 \cdot \tilde{\Omega}. \end{cases} \quad (17)$$

Крайові умови руху механізму виглядають наступним чином:

$$\begin{cases} y_1(0) = y_2(0) = y_3(0) = 0; \\ y_1(T) = \omega_T; y_2(T) = y_3(T) = 0, \end{cases} \quad (18)$$

де  $\omega_T$  – усталена (кінцева) кутова швидкість механізму повороту крана;  $T$  – тривалість розгону механізму до усталеного значення кутової швидкості. Початкові умови руху (18) відповідають стану спокою механізму. Кінцеві умови (18) відповідають руху механізму повороту на усталеній швидкості із відсутніми маятниковими коливаннями вантажу на гнучкому підвісі момент часу  $T$ .

Критерієм, що необхідно мінімізувати, виступає тривалість розгону механізму повороту вантажу до усталеної швидкості [1]:

$$\int_0^T dt = T = \sum_{i=1}^3 t_i \rightarrow \min. \quad (19)$$

Зменшення величини  $T$  дозволить підвищити продуктивність крана за рахунок мінімізації часу виходу механізму повороту на усталену швидкість.

Для врахування переважувальної здатності приводу механізму повороту вантажу баштового крана оптимальне керування  $U$  має відповідати умовам:

$$\begin{aligned} U_{MIN} &\leq U \leq U_{MAX}; \\ U_{MAX} &= \frac{M_{MAX} - M_0}{J_1}; \\ U_{MIN} &= \frac{-M_0}{J_1}, \end{aligned} \quad (20)$$

де  $U_{MIN}$  та  $U_{MAX}$  – нижня та верхня межі області зміни керування  $U$ ;  $M_{MAX}$  – максимальний крутний момент, що діє на елемент із зведеним моментом інерції  $J_1$ . Величина  $U_{MIN}$  відповідає роботі механізму повороту із вимкненим електродвигуном, рух відбувається виключно при дії моменту сили статичного опору  $M_0$  та сил інерції. Практична необхідність введення обмеження на оптимальне керування  $U$  (20) пов'язана із обмеженням крутного моменту приводу механізму повороту вантажу.

Величини основних параметрів досліджуваного механізму, при яких виконувався розв'язок оптимізаційної задачі, зведено до табл.

Таблиця 1. Значення основних параметрів механізму повороту баштового крана

Найменування параметра	Одиниця вимірювання	Умовне позначення	Числове значення
Максимальний обертовий момент	Нм	$M_{MAX}$	$129,3 \cdot 10^3$
Зведений момент сили статичного опору	Нм	$M_0$	$12,6 \cdot 10^3$
Зведений момент інерції	кг · м <sup>2</sup>	$J_1$	$1,5 \cdot 10^6$
Зведена маса вантажу	кг	$m$	500
Довжина гнучкого підвісу вантажу	м	$L$	5
Довжина вильоту вантажу	м	$R$	30
Усталена кутова швидкість повороту	рад/с	$\omega_T$	0,089

Для досягнення кінцевих крайових умов руху (18) при перехідному режимі пуску досліджуваного механізму складено відповідний термінальний критерій:

$$TER = \|\Delta\|_2 = \sqrt{(y_1(T) - \omega_T)^2 + y_2(T)^2 \cdot \Omega^{-2} + y_3(T)^2 \cdot \Omega^{-4}}, \quad (21)$$

де  $\Delta_2$  – вектор відхилення фазових координат від їх бажаних (кінцевих) значень (18). Отже, комплексний критерій мінімізації має наступний вигляд:

$$Cr = T + TER \cdot \psi \rightarrow \min, \quad (22)$$

де  $\psi$  – ваговий коефіцієнт, котрий відображає необхідність забезпечення кінцевих умов руху (21) та зводить розмірність критерію  $TER$  до розмірності  $T$ . В наведених розрахунках ваговий коефіцієнт становить  $\psi = 10^6 \cdot \omega_T^{-1}$ .

## Література

1. Ловейкін В.С. Ромасевич Ю.О. Стехно О.В. (2025). Синтез оптимального за швидкодією режиму руху динамічної системи «кран-вантаж» механізму повороту баштового крана у вигляді зворотного зв'язку. Підйомно-транспортна техніка. Одеса. Вип. 2.(70). С. 4-15. <http://dx.doi.org/10.15276/pidtt.2.70.2025.01>.

УДК 621.873

## РОЗВ'ЯЗОК ЗАДАЧІ ОПТИМАЛЬНОГО ЗА ШВИДКОДІЄЮ КЕРУВАННЯ МЕХАНІЗМОМ ПОВОРОТУ БАШТОВОГО КРАНУ

*Ловейкін В.С., Ромасевич Ю.О., Стехно О.В., Квасницький А.В.*

*Національний університет біоресурсів і природокористування України*

Для проведення досліджень використано відому двомасову динамічну модель механізму повороту баштового крана (рис. 1).

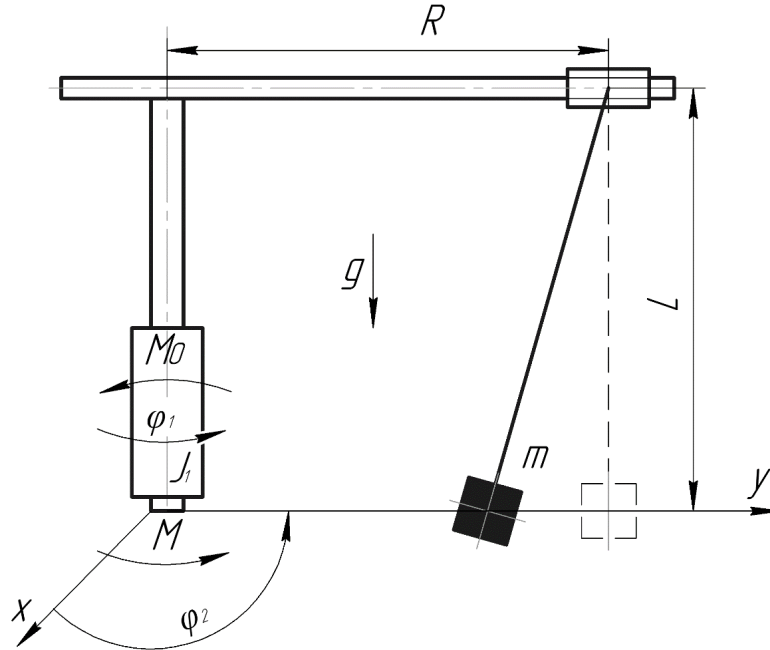


Рис. 1. Двомасова динамічна модель механізму повороту баштового крана.

На рис. 1 введено наступні позначення:  $M$  – зведений до осі повороту крана рушійний момент приводу електродвигуна;  $M_0$  – зведений до осі повороту крана момент сил статичного опору;  $L$  – довжина гнучкого підвісу вантажу;  $R$  – довжина вильоту вантажу;  $g$  – пришвидшення вільного падіння;  $J_1$  – зведений до осі повороту баштового крана момент інерції елементів приводу, башти та стріли.

В якості узагальнених координат у динамічній моделі (рис. 1) прийняті такі координати: зведена до осі обертання крана кутова координата повороту елементів приводу, башти та стріли  $\varphi_1$  і кутова координата повороту закріпленого на гнучкому підвісі вантажу  $\varphi_2$ .

Рівняння, що описують рух представленої динамічної моделі (рис. 1) механізму повороту, мають наступний вигляд [1]:

$$\begin{cases} J_1 \cdot \ddot{\varphi}_1 = M - m \cdot R^2 \cdot \frac{g}{L} \cdot (\varphi_1 - \varphi_2) - M_0 \cdot \text{sign}(\dot{\varphi}_1); \\ \ddot{\varphi}_2 = \frac{g}{L} \cdot (\varphi_1 - \varphi_2). \end{cases} \quad (1)$$

Крайові умови руху механізму виглядають наступний чином:

$$\begin{cases} y_1(0) = y_2(0) = y_3(0) = 0; \\ y_1(T) = \omega_T; y_2(T) = y_3(T) = 0, \end{cases} \quad (2)$$

де  $\omega_T$  – усталена (кінцева) кутова швидкість механізму повороту крана;  $T$  – тривалість розгону механізму до усталеного значення кутової швидкості.

Для досягнення кінцевих крайових умов руху (2) при перехідному режимі пуску досліджуваного механізму складено відповідний термінальний критерій:

$$TER = \|\Delta\|_2 = \sqrt{(y_1(T) - \omega_T)^2 + y_2(T)^2 \cdot \Omega^{-2} + y_3(T)^2 \cdot \Omega^{-4}}, \quad (3)$$

де  $\Delta_2$  – вектор відхилення фазових координат від їх бажаних (кінцевих) значень (2). Отже, комплексний критерій мінімізації має наступний вигляд:

$$Cr = T + TER \cdot \psi \rightarrow \min, \quad (4)$$

де  $\psi$  – ваговий коефіцієнт, котрий відображає необхідність забезпечення кінцевих умов руху (2) та зводить розмірність критерію  $TER$  до розмірності  $T$ . В наведених розрахунках ваговий коефіцієнт становить  $\psi = 10^6 \cdot \omega_T^{-1}$ .

Мінімізація комплексного критерію оптимізації (4) зводиться до знаходження величин тривалості розгону кожного з етапів руху механізму  $t_1, t_2, t_3$ , які в сумі формують величину  $T$ . Тобто входами системи є значення  $t_1, t_2, t_3$ , а виходом величина критерію  $Cr$  (систему розглядаємо як функцію *multiple input, single output*).

Для визначення оптимального по швидкодії керування застосуємо метод оптимізації RING-ROT-PSO [2]. Значення параметрів, за яких виконувався розв'язок задачі, занесено до табл. 2.

Таблиця 2. Основні величини параметрів методу оптимізації RING-ROT-PSO

№ п/п	Параметри	Розмірність	Чисельне значення
1	Загальна кількість часточок в рої	шт	30
2	Загальна кількість ітерацій	шт	100
3	$t_1, t_2, t_3$	с	від 0,1 до 2,0

Використовуючи метод RING-ROT-PSO [2], здійснено мінімізацію критерію (4). На рисунку 2 проілюстровано результат роботи зазначеного вище методу оптимізації.

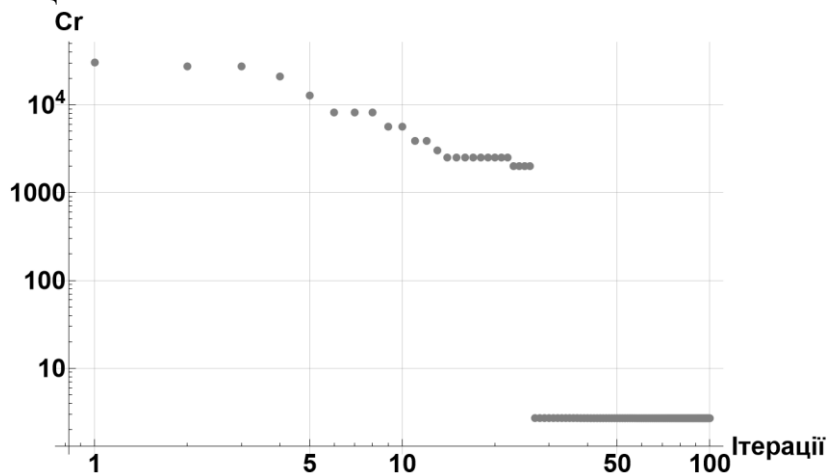


Рис. 2. Точкова графічна залежність мінімізації величини критерію (4) під час проведення оптимізації

Із аналізу графічної залежності (рис. 2) спостерігається знаходження глобального мінімуму критерію (4) до сорокової ітерації. Оптимальні значення тривалості величин  $t_1$ ,  $t_2$  та  $t_3$  наведено у табл. 3.

Таблиця 3. Тривалість з етапів руху досліджуваного механізму при оптимальному керуванні

Етапи розгону механізму повороту баштового крана	Тривалість з етапів		
	$t_1, \text{с}$	$t_2, \text{с}$	$t_3, \text{с}$
	0,81	1,06	0,81

Отже, загальна тривалість розгону механізму повороту вантажу баштового крана до усталеної швидкості  $\omega_T$  становить 2,68 с.

Для змістовного аналізу отриманого результату представимо відповідний неklasичний фазовий портрет руху досліджуваного механізму (рис. 3).

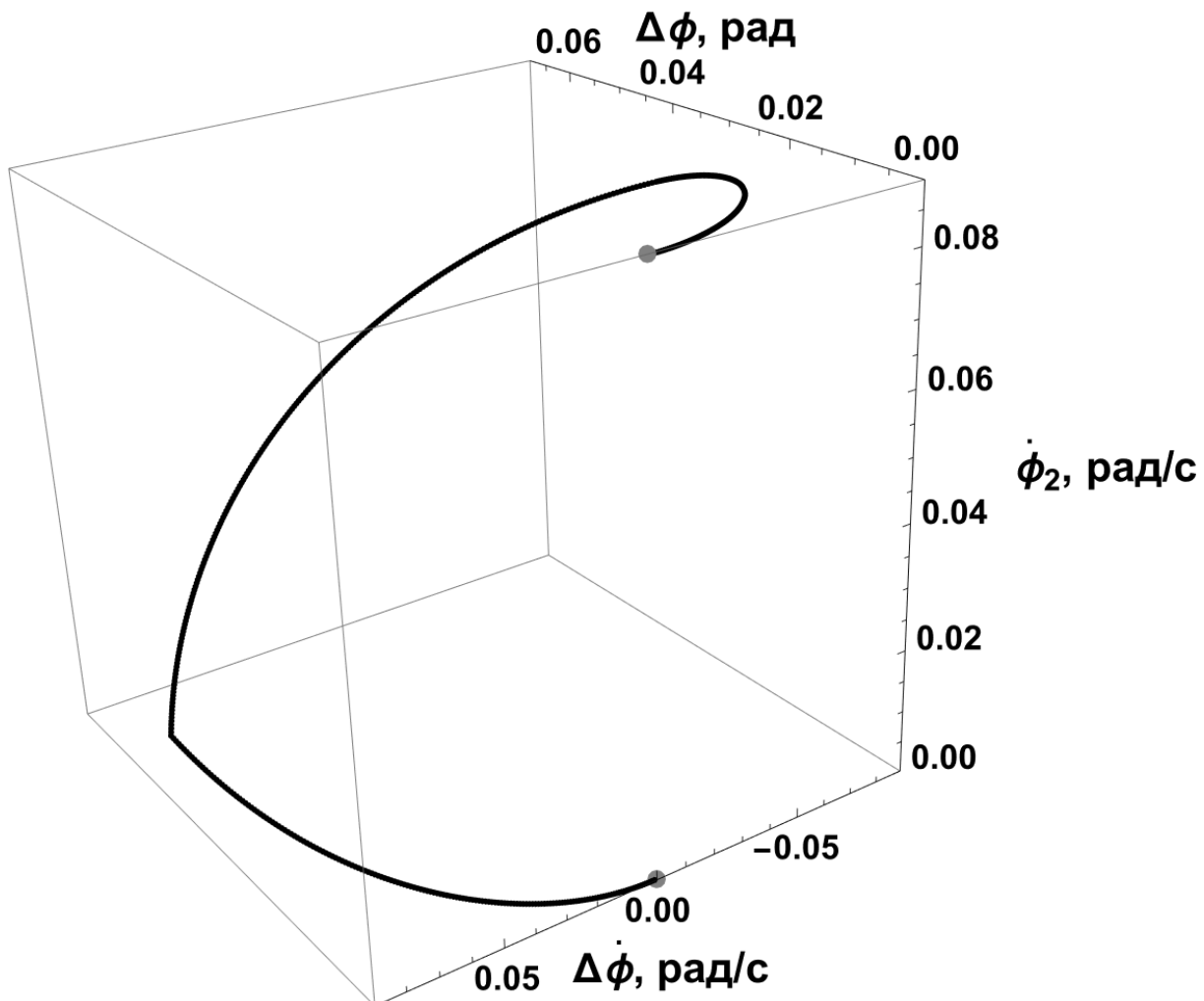


Рис. 3. Некласичний фазовий портрет руху механізму повороту вантажу у координатах „відхилення вантажу від вертикалі – швидкість відхилення вантажу від вертикалі – швидкість вантажу”

На рис. 3 крапки сірого кольору означають початковий і кінцевий стан системи, чорна крива знаходиться у результаті розв'язку оптимізаційної задачі. Як видно із рис. 3 кінцеве значення кривої чорного кольору повністю відповідає кінцевим умовами руху (2). Це говорить про те, що подальший усталений рух механізму буде здійснюватися без коливань вантажу.

Разом з тим, наведемо графічну залежність функції керування  $U$  та кутової швидкості розгону механізму повороту вантажу до величини  $\omega_T$  (рис. 4).

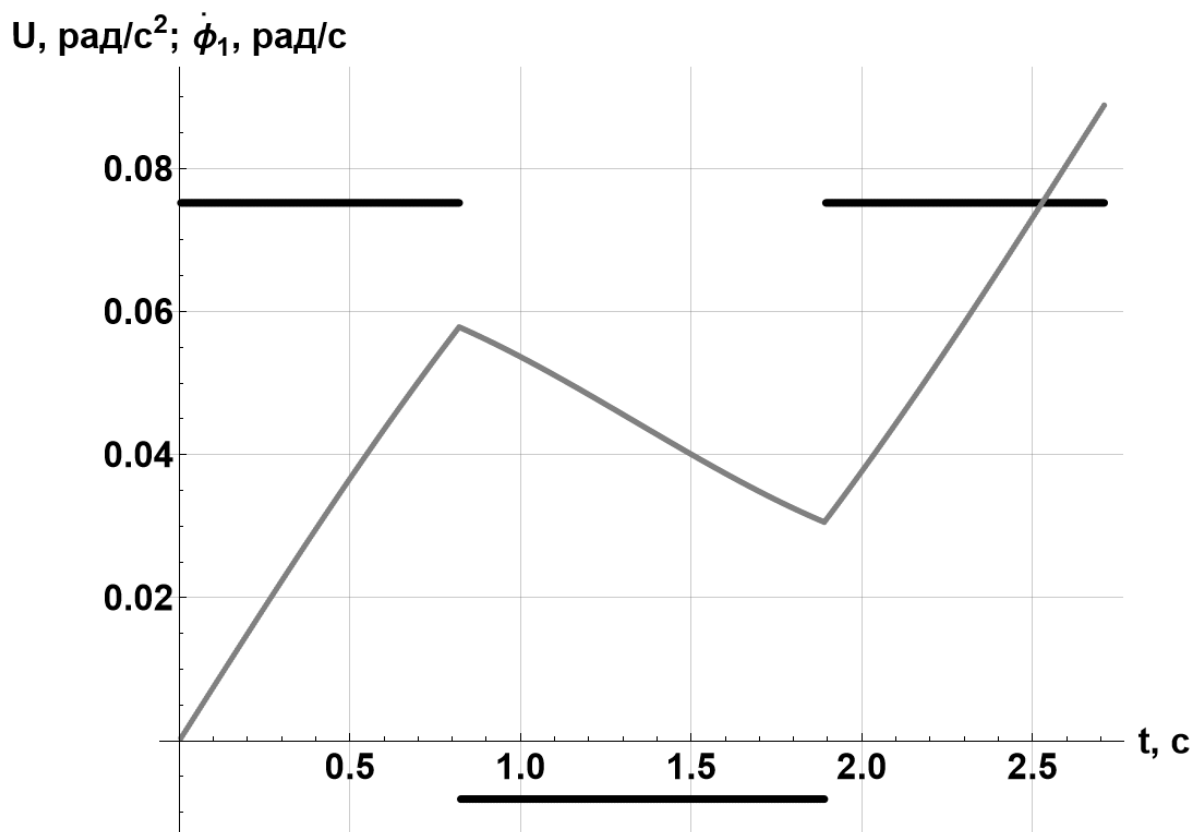


Рис. 4. Графічні залежності зміни функції керування (чорна крива) та кутова швидкість повороту вантажу (сіра крива) баштового крана

Як видно із рис. 4 кутова швидкість повороту вантажу у кінці розгону механізму є рівною усталеному значенню  $\omega_T$  (таблиця 1). Окрім того, представимо графічну залежність величини потужності, що споживається приводом механізму повороту вантажу (рис. 5).

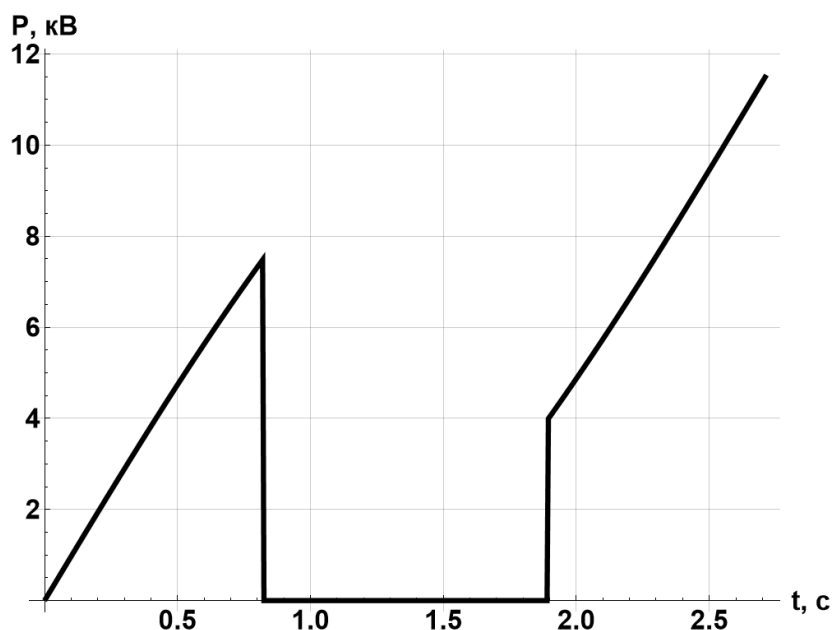


Рис. 5. Графічна залежність функції потужності, яка споживається приводом механізму повороту баштового крана

При аналізі графічної залежності (рис. 5) спостерігається два пікових значення потужності. Один максимум відбувається у кінці першого етапу  $t_1$  і становить 7,5 кВт, а інший максимум в кінці третього етапу  $t_3$ , який становить 11,5 кВт. Максимальні значення потужностей відповідно у 1,5 та 2,3 рази перевищують номінальне значення потужності приводу механізму повороту баштового крана. Однак перевантаження приводу діє протягом доволі коротких проміжків часу (кожен менше 1 секунди), що не суттєво впливає на його роботу.

**Висновок.** Визначено оптимальний за швидкодією режим пуску механізму повороту вантажу при несиметричних обмеженнях на оптимальне керування, який дозволяє підвищити продуктивність баштового крана у ході виконання навантажувально-розвантажувальних операцій. Для розв'язання задачі безумовної оптимізації, до якої зведено вихідну задачу оптимального керування, використано модифікований метод рою часточок RING-ROT-PSO.

Ефективна практична реалізація запропонованого режиму пуску можлива за умови використання частотного перетворювача із відповідним програмним забезпеченням.

### Література

1. Ловейкін В.С. Ромасевич Ю.О. Стехно О.В. (2025). Синтез оптимального за швидкодією режиму руху динамічної системи «кран-вантаж» механізму повороту баштового крана у вигляді зворотного зв'язку. Підйомно-транспортна техніка. Одеса. Вип. 2.(70). С. 4-15. <http://dx.doi.org/10.15276/pidtt.2.70.2025.01>.
2. Romacevych Y., Loveikin V., Loveikin Y. Development of new rotating ring topology of PSO-algorithm. 2021. IEEE 2nd KhPI Week Advanced Technology. 13 September. Pages 79-82. <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek53812.2021.9569973>.

УДК 004.5:004.89

## **ЦИФРОВІ ДВІЙНИКИ В СІЛЬСЬКОМУ ГОСПОДАРСТВІ: ТЕХНОЛОГІЧНА РЕВОЛЮЦІЯ ТА ШЛЯХ ДО СТАЛОГО ФЕРМЕРСТВА**

*Ребенко В.І.*

*Національний університет біоресурсів і природокористування України*

У сучасному світі сільське господарство переходить від традиційних методів, заснованих на інтуїції та фізичній праці, до високотехнологічних рішень.

Цифровий двійник (Digital Twin) — це точна віртуальна копія фізичного об'єкта або системи, яка дозволяє в режимі реального часу моніторити роботу, аналізувати дані, симулювати сценарії та приймати обґрунтовані рішення.

Технологія, яка вперше була застосована NASA у 2010 році для космічних апаратів, сьогодні стає "машиною часу" для фермерів, дозволяючи зазирнути в минуле (аналіз історії), контролювати теперішнє та прогнозувати майбутнє.

Ринок цифрових двійників стрімко зростає і, за прогнозами, перевищить 73,5 мільярда доларів до 2027 року, що свідчить про глобальну трансформацію галузі.

Цифровий двійник функціонує як "двостороння вулиця": дані постійно передаються від фізичного об'єкта до його цифрової копії і навпаки. Якщо в реальному активі відбуваються зміни, вони миттєво відображаються в моделі, а коригувальні дії, розраховані в цифрі, можуть бути впроваджені в реальності.

Основні компоненти системи:

Інтернет речей (IoT): датчики вологості, рН, температури, RFID-мітки та дрони.

Хмарні обчислення: обробка величезних масивів даних у реальному часі.

Штучний інтелект (AI) та машинне навчання: для створення прогнозних моделей та симуляцій.

Для створення ефективної системи необхідно пройти шість ключових етапів:

Збір даних у реальному часі: Використання датчиків для моніторингу критичних змінних (грунт, погода, стан посівів).

Створення цифрового дублікату: Побудова віртуальної моделі поля з урахуванням його топографії, типу ґрунту та мікроклімату.

Інтеграція даних: Фільтрація та об'єднання інформації для отримання цілісної картини стану господарства.

Спостереження та аналіз: Виявлення хвороб рослин або збоїв в обладнанні на ранніх стадіях.

Прогнозування та симуляція: Використання ШІ для моделювання того, як рослини реагуватимуть на різні сценарії поливу чи добрив без фінансових ризиків.

Оптимізація та прийняття рішень: Коригування стратегій посіву, іригації та логістики на основі отриманих інсайтів.

Ключові сфери застосування та переваги:

**Управління полями та точне землеробство.** Цифрові двійники дозволяють фермерам точно знати, чого потребують культури в кожен момент. Це мінімізує відходи ресурсів (води, добрив) та підвищує врожайність. В умовах закритого ґрунту (індор-ферми) технологія допомагає підтримувати ідеальний мікроклімат, знижуючи операційні витрати.

**Тваринництво.** Датчики в корівниках або на станціях годівлі відстежують стан здоров'я кожної тварини. Цифровий двійник допомагає виявити хвороби на ранніх етапах, запобігаючи поширенню інфекцій у стаді, та оптимізувати виробництво молока чи м'яса.

**Обслуговування техніки та логістика.** Реплікація сільськогосподарських машин дозволяє відстежувати їхній стан у реальному часі, уникаючи простоїв через раптові поломки. У ланцюгах постачання двійники забезпечують прозорість: відстеження маршрутів доставки гарантує, що продукти потраплять до споживача свіжими та вчасно.

**Кліматична стійкість та сталий розвиток.** Технологія дозволяє симулювати вплив екстремальних погодних умов, допомагаючи фермерам готуватися до ризиків. Важливим аспектом є екологічність: моніторинг рівнів вуглецю та біорізноманіття сприяє зменшенню негативного впливу на довкілля.

Цифрові двійники трансформують економіку ферм, аналізуючи витрати та вигоди кожного рішення. Вони створюють "віртуальну пісочницю" для R&D, де можна експериментувати з новими методами вирощування без загрози для реального врожаю, що значно прискорює впровадження інновацій.

Однією з головних проблем є "ізоляція даних" (data silos), коли інформація з різних джерел не поєднується. Для вирішення цього Intellias розробила хмарну платформу Intellias Digital Twin, яка інтегрує дані з будь-яких IoT-пристроїв та візуалізує їх у 3D/4D форматах.

Спільно з мережею Grand Farm було створено Grand Farm Data Hub — платформу з відкритим кодом для централізації агроданих. Це дозволяє навіть невеликим гравцям ринку отримати доступ до передових алгоритмів аналітики та симуляції.

Впровадження цифрових двійників у сільське господарство є неминучим етапом еволюції галузі. Ця технологія забезпечує синергію природи та інтелектуальних систем, ведучи агробізнес до більш продуктивного, прибуткового та екологічно чистого майбутнього. Завдяки здатності аналізувати минуле та передбачати майбутнє, цифрові двійники стають надійним інструментом забезпечення глобальної продовольчої безпеки.

УДК 621.9.048

## ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАДАЧІ ПОЗИЦІЮВАННЯ МАНІПУЛЯЦІЙНОЇ РОБОТОТЕХНІЧНОЇ СИСТЕМИ

*Черниш О.М.*

*Національний університет біоресурсів і природокористування України*

**Мета дослідження.** Обґрунтувати алгоритм розрахунку положення і орієнтацію моделі триланкової маніпуляційної робототехнічної системи на основі матричного методу приєднаних координат.

**Результати досліджень.** Питання розробки і створення прикладних методів розрахунку у програмному середовищі відповідно до конкретних поставлених умов на сьогоднішній день досить актуальні. Для створення алгоритму таких обчислень можна залучити, як загальновідомі програмні пакети MathCAD, MATLAB, Maple, так і інші спеціалізовані програмні комплекси.

У цілому вибір методів і засобів програмування і розрахунку кінематичних параметрів робототехнічних систем мають місце для більшості сучасних технологічних процесів. При цьому разом із задачами забезпечення точності і швидкості позиціонування і переміщення робочих органів руху робототехнічних систем, підвищення якісних показників існує також актуальна задача оптимізації. Ці задачі можна розв'язати шляхом розробки і створення більш ефективних і точних алгоритмів керування маніпуляційними робототехнічними системами.

Доцільність та ефективність застосування матричного підходу в задачах створення алгоритмів розрахунку кінематичних параметрів багатоланкових маніпуляційних робототехнічних систем полягає в тому, що тут застосовується послідовне перетворення координат при переході від однієї ланки до наступної. При цьому процес переходу складається з послідовного набору матриць перетворення, які зв'язані з системами координат ланок кінематичного ланцюга механізму робототехнічної системи. Кожна система координат кінематичного ланцюга формується за методом Денавіта-Хартенберга послідовної побудови систем координат із формуванням однорідних матриць перетворення.

Використовуючи такі матриці перетворення, можна отримати зв'язок між координатами  $P_i$  будь-якої точки  $P$   $i$ -ї ланки маніпуляційної робототехнічної системи у системі відліку, що рухома з'єднана із суміжною  $(i-1)$ -ю ланкою:

$$\bar{P}_{i-1} = {}^{i-1}A_i \cdot \bar{P}_i,$$

де  ${}^{i-1}A_i$  – матриця елементарного перетворення для суміжних систем координат;  $\bar{P}_{i-1}$ ,  $\bar{P}_i$  – вектори положення довільної точки  $P$  для суміжних систем координат.

Це дозволяє описати положення кожної ланки відносно положення попередньої ланки системи.

Добуток матриць утворює однорідну матрицю складного перетворення:

$${}^{i-1}A_i = T_{Z,q_i} \cdot T_{Z,d_i} \cdot T_{X,a_i} \cdot T_{X,\alpha_i},$$

де  ${}^{i-1}A_i$  – ДХ-матриця складного перетворення для суміжних систем координат,  $a_i, \alpha_i, d_i, q_i$  – чотири геометричні параметри кінематичного ланцюга, що описують зв'язок між суміжними системами координат.

При цьому матриця координат точки  $P$  в  $(i-1)$ -й системі відліку, зв'язаною з  $(i-1)$ -ю ланкою може бути представлена у вигляді  $P_{i-1} = (X_{i-1}, Y_{i-1}, Z_{i-1}, 1)^T$ , а матриця координат точки  $P$  в  $i$ -й системі відліку, зв'язаною з  $i$ -ю ланкою – у вигляді  $P_i = (X_i, Y_i, Z_i, 1)^T$ , а однорідна матриця  ${}^0T_i$ , що визначає положення  $i$ -ї системи координат відносно базової, являє собою добуток послідовності однорідних матриць перетворення:

$${}^0T_i = {}^0A_1 \cdot {}^1A_2 \cdot \dots \cdot {}^{i-1}A_i = \prod_{i=1}^n {}^{i-1}A_i = \begin{bmatrix} X_i & Y_i & Z_i & P_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^0R_i & {}^0P_i \\ 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$i = 1, 2, \dots, n$$

де  ${}^0R_i$  – матриця, що визначає орієнтацію  $i$ -ї системи координат по відношенню до базової;  ${}^0P_i$  – величина вектора, що з'єднує початок базової і  $i$ -ї системи координат.

При цьому визначення положення і орієнтації робочого органу робототехнічної маніпуляційної системи щодо абсолютної системи координат, тобто параметрів матриці, представляє собою послідовність наступних множників:

$$T = {}^0A_1 \cdot {}^1A_2 \cdot \dots \cdot {}^{n-1}A_n = \prod_{i=1}^n {}^{i-1}A_i, \quad i = 1, 2, \dots, n,$$

де  $n$  – число ланок кінематичного ланцюга маніпуляційної робототехнічної системи.

В задачі позиціонування триступеневого маніпулятора із обертовою колоною 1 і двома поступальними кінематичними парами взаємно перпендикулярних ланок 2 і 3 у відповідності до методу Денавіта-Хартенберга, матриця переходу від 1-ї системи координат до 3-ї матиме вигляд:

$$A_1 = \begin{bmatrix} c_1 & 0 & s_1 & 0 \\ s_1 & 0 & c_1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad A_2 = \begin{bmatrix} c_2 & -s_2 & 0 & a_2 c_2 \\ s_2 & c_2 & 0 & a_2 s_2 \\ 0 & 0 & 1 & d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} c_3 & 0 & s_3 & a_3 c_3 \\ s_3 & 0 & -c_3 & a_3 s_3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad A_4 = \begin{bmatrix} c_4 & 0 & -s_4 & 0 \\ s_4 & 0 & c_4 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$A_5 = \begin{bmatrix} c_5 & 0 & s_5 & 0 \\ s_5 & 0 & -c_5 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad A_6 = \begin{bmatrix} c_6 & -s_6 & 0 & 0 \\ s_6 & c_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

Матриця однорідних перетворень  $T_6$  матиме вигляд:

$$T_6 = A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot A_4 \cdot A_5 \cdot A_6 = A_{13} \cdot A_{46},$$

де  $A_{13} = A_1 \cdot A_2 \cdot A_3$ ;  $A_{46} = A_4 \cdot A_5 \cdot A_6$ .

Матриця  $T_6$  у розгорнутому вигляді:

$$T_6 = \begin{bmatrix} x_{6x} & y_{6x} & z_{6x} & p_x \\ x_{6y} & y_{6y} & z_{6y} & p_y \\ x_{6z} & y_{6z} & z_{6z} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

де її компонентами будуть

$$x_{6x} = c_1(c_{23}(c_4c_5c_6 - s_4s_6) - s_{23}s_5s_6) - s_1(s_4c_5c_6 + c_4s_6),$$

$$x_{6y} = s_1(c_{23}(c_4c_5c_6 - s_4s_6) - s_{23}s_5c_6) - c_1(s_4c_5c_6 + c_4s_6),$$

$$x_{6z} = -s_{23}(c_4c_5c_6 - s_4s_6) - c_{23}s_4c_6,$$

$$y_{6x} = c_1(-c_{23}(c_4c_5s_6 + s_4c_6) + s_{23}s_5s_6) - s_1(-s_4c_5c_6 + c_4c_6),$$

$$y_{6y} = s_1(-c_{23}(c_4c_5s_6 + s_4c_6) + s_{23}s_5s_6) + c_1(-s_4c_5c_6 + c_4c_6),$$

$$y_{6z} = s_{23}(c_4c_5c_6 + s_4c_6) + c_{23}s_5c_6,$$

$$z_{6x} = c_1(c_{23}c_4s_5 + s_{23}c_5) - s_1s_4s_5,$$

$$z_{6y} = s_1(c_{23}c_4s_5 + s_{23}c_5) + c_1s_4s_5,$$

$$z_{6z} = -s_{23}c_4c_5 + c_{23}c_5,$$

$$p_x = c_1(d_6(c_{23}c_4s_5 - s_{23}c_5) + s_{23}d_4 + a_3c_{23} + a_2c_2) - s_1(d_6s_4s_5 + d_2),$$

$$p_y = s_1(d_6(c_{23}c_4s_5 + s_{23}c_5) + s_{23}d_4 + a_3c_{23} + a_2c_2) + c_1(d_6s_4s_5 + d_4),$$

$$p_z = d_6(c_{23}c_5 + s_{23}c_4s_5) + c_{23}d_4 + a_3c_{23} - a_2s_2,$$

де:

$$\cos q_i = c_i; \sin q_i = s_i; \cos(q_i + q_j) = c_{ij}; \sin(q_i + q_j) = s_{ij}.$$

В результаті положення ланок робота визначається певним добутком однорідних матриць перетворення при переході від рухомих систем координат ланок до абсолютної. У своїй визначеній послідовності набір таких добутків складають алгоритм аналітичних розрахунків.

Теоретичні дослідження проводились на базі елементарної моделі механізму триланкового маніпулятора робота із застосуванням програмного пакету MathCAD.

**Висновки.** За допомогою проведених аналітичних досліджень розв'язана задача позиціонування триланкової моделі робототехнічної маніпуляційної системи, визначені координати і орієнтація робочого органу відносно абсолютної системи координат.

Перевірка алгоритму підтвердила правильність програмних розрахунків, які спрощують і прискорюють процес отримання даних та дають можливість їх застосування для подальшого кінематичного і динамічного аналізу в задачах керування механізмом маніпуляційної системи робота.

УДК 631.354.2

## МЕХАНІЧНІ ВТРАТИ ЗЕРНА І ЇХ ВПЛИВ НА ПРОДУКТИВНІСТЬ КОМБАЙНА

*Надточій О.В.*

*Національний університет біоресурсів і природокористування України*

Для ефективного використання наявного парку зернозбиральних комбайнів (ЗК) необхідно знати не тільки стартові конструктивні і експлуатаційні, техніко-технологічні показники і характеристики нових машин, але й закономірності їх зміни із збільшенням наробітку (терміну) експлуатації. На полях сільгоспвиробників України використовуються ЗК більше 100 марок, моделей, модифікацій всіх провідних виробників світу різних конструктивних схем із строком експлуатації від 1 до 30 років [1...3]. Показники, заявлені виробниками, за цей термін експлуатації значно різняться, а тому недоцільні для подальшого планування роботи [4]. Більшу достовірність можуть становити експериментальні дослідження техніко-економічних показників роботи зернозбиральних комбайнів.

Результат таких експериментальних досліджень та розрахунків приведені в таблиці 1. При ширині захвату жатки 7.6 м практична ширина змінювалася в загінці  $\pm 0.3$  м, робоча швидкість в межах  $\pm 200$  м. Заповнення бункера відбувалося по горизонту ємності  $\pm 250 \dots 300$  кг. Підконтрольними були ширина захвату жнивarki, відносні втрати контролювалися за показниками монітора. Швидкість руху за спідометром, маса зібраного урожаю по квитанціях із господарської ваги. Кількісні втрати зерна комбайнів контролювалися спеціальними ящиками. Солома після обмолоту висипалася у валок.

У стабільному режимі роботи комбайна, контрольні-мірні ящики розмірами  $500 \times 200$  мм =  $0.1 \text{ м}^2$  закидалися по ходу комбайна з лівої сторони між переднім і задніми мостами під молотарку через відстань 5 – 6 метрів (5 штук) на відстані 25 – 30 метрів із трьох кратною повторюваністю з інтервалом в одну. Із збільшенням швидкості, відстань між ящиками збільшилася до 8-9 м. Підрахунок кількості втрачених зерен в ящиках за молотаркою після проходу комбайна проводився в присутності керівника агрофірми, головного агронома і бригадного агронома. За висновками агрономів підприємства нерівномірності урожайності на площі поля складала  $\pm 500$  кг/га. За такими оцінками допустимі числові втрати зерна могли складати 5 – 6 грам на  $1 \text{ м}^2$  площі. При кількості 1000 зернин їх маса може складати 40 – 50 грам. Тобто на 1 грам в середньому приходиться  $\approx 25$  зерен. Гранична кількість втрат на  $1 \text{ м}^2$  площі при урожайності 5 – 6 т/га складатимуть 125 – 150 зерен і склало 1% від валового збору. Результати досліджень приведені в таблиці 1.

Аналіз експериментальних польових досліджень показав, що при робочій швидкості  $V_p = 4,6$  км/год середня тривалість роботи комбайна для наповнення 1 бункера складала 24 хвилини. За термін наповнення бункера необхідно було

зібрати 1.29...1.32  $\approx$  1.31 га. За годину чистого часу збиралося 3.22 га. Числові значення механічних втрат за молотаркою на контрольний ящик площею (0.1 м<sup>2</sup>) від 9 до 13 зернин. (5 контрольних ящиків), в середньому  $\approx$  57 зернин на 1 м<sup>2</sup>. Розрахункові значення відносних втрат показали 0.38 % від валового збору урожаю, а розрахункове значення пропускної здатності молотарки склало  $g = 6.49$  кг/с завантаження двигуна було в межах  $\approx$  54%.

Таблиця 1.

## Показники ефективності використання ЗК СН642.

Показники	Робоча швидкість, км/год			
	4.6	5.9	6.6	7.6
Середній термін наповнення бункера, хв	72	57	51	42
Зібрано за 1 год. чистого часу, га $W$	3.22	4.13	4.62	5.40
Зібрано за 1 год. чистого часу, т/год	7.2	7.1	6.9	7.15
Відносні втрати 1 м <sup>2</sup> , % $\Delta U$ %	0.38	0.68	0.91	1.23
Числові значення, кількість, 1 м <sup>2</sup> , $m$	57	102	136	188
Пропускна здатність, кг/с, $q_H$	6.49	8.20	9.20	10.34
Завантаження двигуна, % , $N$	54	67	74	83
Продуктивність, %, $+\Delta W$	100	+28	+12	+16,6

При швидкості  $V_p = 5,9$  км/год (1.64 м/с) середня тривалість наповнення одного бункера понизилася до  $\approx$ 19 хвилин. За годину чистого часу збиралась площа  $S = 4.13$  га/год; а намолот підвищився до  $U_2 = 23$  тони. Числові значення механічних втрат за молотаркою на контрольний ящик знаходилися в межах від 95 до 105 зернин, середні 102 зернини. Пропускна здатність молотарки підвищилася до  $g = 8,2$  кг/с, відносні втрати підвищилися до значення 0,68%, завантаження двигуна підвищилося до  $\approx$  67% від  $N_H$ . Як наслідок, з підвищенням робочої швидкості продуктивність за 1 годину збільшилася на 28%.

При швидкості  $V_p = 7.7$  км/год (2.14 м/с) були отримані наступні результати експериментальних значень: середня тривалість наповнення бункера зерном склала  $\approx$  14 хвилин, за годину чистого часу збирання площа пшениці  $S = 5.40$  га, намолочувалося  $\approx$  29 т. зерна, числові значення механічних втрат знаходилися в межах 180 – 190 зернин ( $\approx$  188 штук) на 1 м<sup>2</sup> (36...38 зернин) на контрольний ящик; відносні втрати збільшилися до значення 1,23% на 1 м<sup>2</sup>; завантаження двигуна підвищилося до значення  $\approx$  83% від  $N_H$ ; Розрахункове завантаження молотарки збільшилося до  $g = 10,34$  кг/с від номінального значення (розрахункового) 12 кг/с.

При виконанні першого проходу висота стерні була в 15 – 20 см. Із збільшення швидкості руху при висоті зрізу <15 см виникала небезпека пошкодження ножа, механізму приводу, стола жатки від раптових динамічних навантажень на вимоїнах, ритвинах, гребнях. Тому для уникнення пошкоджень жатки і одночасно зменшення психологічного навантаження оператора було рекомендовано керівництву агрофірми підвищити висоту зрізу до 20 – 25 см.

Такий захід дозволив зменшити попадання зеленої маси, що різко зростає із затягуванням строків жнив. Керівництво агрофірми погодилося із запропонованою методикою контролю механічних втрат та рекомендацією підвищити швидкість до  $V_p = 7.0$  км/год.

Ефективність експлуатації виявилася у покращенні наступних вагомих складових жнивування:

- змінної продуктивності по зібраній площі і масі урожаю на 30 – 35%;
- показників якості своєчасно зібраної культури;
- зменшення витрат палива через оптимальне завантаження двигуна комбайна на 15 – 20%;
- запобіганню біологічних втрат від осипання через затягування строків жнив в межах 8...14% від урожайності.

При розрахунку термінів збирання зернових культур слід враховувати термін експлуатації комбайнів і враховувати поправки в показники продуктивності, враховуючи ймовірне зниження показника технічного стану через коефіцієнт готовності.

### Література

1. Войтюк Д.Г. Моніторинг комбайнового ринку України (ч. 1) / Д.Г. Войтюк, О.В. Надточій, В.Д. Войтюк, А.А. Демко, О.А. Демко // Науковий вісник Національний університет біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК. – К., 2010. – Вип. 144, ч. 4. – С. 192–200.

2. Войтюк Д.Г. Моніторинг комбайнового ринку України (ч. 2) / Д.Г. Войтюк, О.В. Надточій, В.Д. Войтюк, А.А. Демко, О.А. Демко // Науковий вісник Національний університет біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК. – К., 2010. – Вип. 144, ч. 5. – С. 197–207.

3. Демко О. А. Дослідження залежності продуктивності ЗК від механічних втрат зерна за молотильно-сепаруючим пристроєм (МСП) комбайнів / О. А. Демко, О. В. Надточій, Р. Я. Якимів // Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки та технологій для сільського господарства України. – 2014. – Вип. 18 (32). – Кн. 1. – С. 165–177.

4. Ломакин С.Г. Зерноуборочные комбайны: потребности покупателей – предложения производителей/ С.Г. Ломакин // Аграрное обозрение. – 2010. - №3.

УДК 631.354.2

## ФОРМУВАННЯ КЛАСИФІКАЦІЙНИХ ОЗНАК ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗБИРАННЯ ЗЕРНОВИХ

*Надточій О.В.*

*Національний університет біоресурсів і природокористування України*

При комплексному розгляді сукупності чинників, що впливають на показники використання зернозбиральних комбайнів (ЗК), слід враховувати технічні та технологічні, кількісні та якісні, виробничі та особисті, економічні та екологічні причини зміни показників використання ЗК.

На основі матеріалів робіт [1..6] встановлено, що всі ці чинники можна розділити на три великі групи: особливості зернозбиральних комбайнів, що використовуються, стан зернової культури, що збирається та умови збирання. Усі групи чинників, своєю чергою, поділяються на підгруп и. Так, група чинників, що враховує особливості ЗК, діляться на підгрупи конструктивних і експлуатаційних.

До підгрупи конструктивних чинників нами віднесено:

- технологічна схема зернозбирального комбайна, що закладається під час конструювання машини. Найбільш поширені зернозбиральні комбайни з класичною схемою молотильно-сепаруючого пристрою (МСП): КЗС-9, Lexion 540, РСМ-10Б "Дон-1500Б", РСМ-101 "Вектор 410", РСМ-142 "Акрос 530", John Deere, тощо. Набули поширення також ЗК з аксіально-роторною схемою МСП (Lexion 570, РСМ-181, Tucano 470, New Holland (CS6090, CSX 7080) та інші);
- конструктивні параметри робочих органів ЗК: довжина та діаметр барабана чи ротора, кут охоплення деки, тип соломотрясу, кількість клавиш та інші;
- параметри регулювання робочих органів зернозбирального комбайна: частота обертання молотильного барабана та вентилятора очищення, ступінь відкриття жалюзі та інші (класична схема МСП), частота обертання ротора, деки, вентилятора очищення та інші (аксіально-роторна схема МСП).

До підгрупи експлуатаційних чинників нами включені:

- робоча швидкість ЗК. Даний чинник вибирається за технічними можливостями та допустимою пропускною спроможністю МСП зернозбирального комбайна при заданому рівні втрат зерна;
- робоча ширина жнивarki (вибирається з умови оптимального завантаження МСП при обраній швидкості руху і урожайності);
- параметри регулювання робочих органів дозволяють звести до мінімуму кількісні та якісні втрати зерна, знизити чи повністю виключити технологічні несправності комбайна;
- стаж та кваліфікація комбайнерів та обслуговуючого персоналу. Так, у роботі [5] показано, що частка часу основної роботи комбайнів, що

обслуговуються комбайнерами зі стажем роботи 4 роки, перевищує на 41% відповідний показник для комбайнерів із стажем один рік. Якість ТО вища у ЗК, що обслуговуються високопрофесійними майстрами-налагодчиками;

- відношення обслуговуючого персоналу до виконання своїх обов'язків;
- технічний стан зернозбирального комбайна. У разі виникнення несправностей робочих органів зростають як прямі втрати зерна, так і непрямі (дроблення, травмування) [2]. Перелічені вище чинники *керовані*. До другої групи чинників - стан зернової культури включені: урожайність по зерну зернової культури, солонистість, вологість зерна під час збирання, засміченість, полеглисть рослин. Чинники другої групи *частково керовані*.

Третя група чинників включає *чинники умов збирання зернових культур* та поділена на дві підгрупи: об'єктивні та суб'єктивні.

Об'єктивні – це показники природно-кліматичних умов зони збирання: температура та вологість повітря, кількість опадів, що випали під час збирання, швидкість та напрям вітру. Дані чинники істотно впливають на показники роботи комбайнів і відносяться до *некерованих*.

Чинники другої підгрупи пов'язані з умовами господарства. До цієї підгрупи віднесено: площі, зайняті зерновими, організація, технологія та строки збирання зернової культури, наявність у підприємстві ремонтно-обслуговуючої бази, ступінь забезпеченості збиральною технікою, комбайнерами та обслуговуючим персоналом.

Відомо [4], що при незначних річних навантаженнях на один комбайн (до 60 га) показники ефективності використання комбайнів вищі при однофазному способі збирання, а при великих навантаженнях та збиранні насінневих посівів – при двофазному.

У багатьох наукових працях [1, 2, 3 та ін.] доведено, що одним із чинників, що істотно впливають на такі показники використання зернозбиральних комбайнів, як продуктивність та втрати зерна, є терміни збирання зернових культур. При перевищенні оптимальних термінів збирання суттєво зростають втрати зерна від само осипання та здатність до дроблення та травмування, погіршується якість зерна. Суб'єктивні чинники третьої групи *частково керовані*.

Усі обрані чинники впливають на показники використання зернозбиральних комбайнів і, отже, на показники процесу збирання зернових культур та її ефективність. Такий зв'язок показано на структурній схемі підвищення ефективності збирання зернових культур (рис. 1).

Підвищення ефективності збирання зернових культур зводиться до вирішення наступного завдання:

$$K_{\text{еф}}(A, B, C) \rightarrow \max K_{\text{еф}} \text{ при } W_i \in f(W_i)$$

де  $A, B, C$  – чинники особливостей застосовуваних зернозбиральних комбайнів, стану зернової культури, що убирається, та умов збирання, що впливають на показники використання зернозбиральних комбайнів;  $f(W_i)$  – обмеження показників використання зернозбиральних комбайнів  $W_i$ .

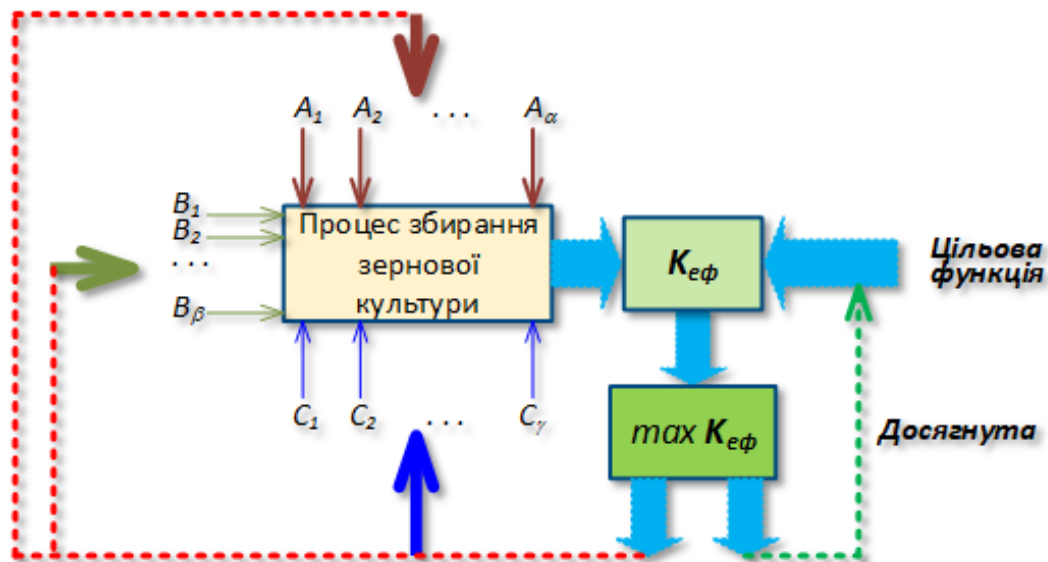


Рис.1. Схема підвищення ефективності збирання зернових культур

Таким чином, на основі аналізу наукових праць вчених, що працюють в галузі експлуатації збиральної техніки, теорії логіки науки та методології наукових досліджень, обрані та систематизовані за групами чинники, що впливають на показники використання зернозбиральних комбайнів.

### Література

1. Войтюк Д.Г. Моніторинг комбайнового ринку України (ч. 1) /Д.Г. Войтюк, О.В. Надточій, В.Д. Войтюк, А.А. Демко, О.А. Демко// Науковий вісник Національний університет біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК. – К., 2010. – Вип. 144, ч. 4. – С. 192–200.
2. Войтюк Д.Г. Моніторинг комбайнового ринку України (ч. 2) / Д.Г. Войтюк, О.В. Надточій, В.Д. Войтюк, А.А. Демко, О.А. Демко// Науковий вісник Національний університет біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК. – К., 2010. – Вип. 144, ч. 5. – С. 197–207.
3. Соловей Д.Ю. Аналіз кон'юнктури ринку сільськогосподарської техніки в Україні / Д.Ю. Соловей, Я.К. Білоусько// Економіка АПК. – К., 2014. - №1 – С. 40 – 44.
4. Rogovskii, I. L., Titova L. L., Sokolova V A, Andronov A V, Avagyan D M. Modeling of normativity of criteria of technical level of forage harvesters combines. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 720 012109 <https://doi.org/10.1088/1755-1315/720/1/012109>.
5. I M Kuzmich, I. L. Rogovskii, L. L Titova, O V Nadtochiy. Research of passage capacity of combine harvesters depending on agrobiological state of bread mass. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 2021 Vol 677. 052002 [doi:10.1088/1755-1315/677/5/052002](https://doi.org/10.1088/1755-1315/677/5/052002).
6. O. Nadtochiy, L. Titova. Simulation of agricultural processes. An International Quarterly Journal on Motorization, Vehicle Operation, Energy Efficiency and Mechanical Engineering. Lublin-Rzeszow. 2018. Vol. 18. No 2. P. 39 - 49.

УДК 658.7:519.86

## ФОРМУВАННЯ ЕКОНОМІЧНИХ МОДЕЛЕЙ НАДІЙНОСТІ ЛАНЦЮГА ПОСТАЧАЊ

Загурський О.М.

Національний університет біоресурсів і природокористування України

Модель «попиту і пропозиції». Модель базується на законах теорії ймовірності. В ній щільність розподілу суми двох випадкових величин  $z = x + y$ , у разі коли випадкові величини є незалежними, виражається однією з формул.

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(z) = f(x) f(z - x) dx \quad (1)$$

або 
$$f(z) = \int f(z - y) f(y) dy \quad (2)$$

де:  $f(z)$  – щільність розподілу складових  $f_1(x)$  і  $f_2(y)$ .

При описі логістичних процесів закупівель та управління замовленнями зі стохастичним попитом споживачів ( $y$ ) та пропозицією постачальників ( $x$ ), необхідно враховувати різницю між цими випадковими величинами, тобто  $z = x - y = x + (-y)$ . У цьому випадку вирази (1) і (2) перетворюються у формулу:

$$f(z) = \int f(x) f(x - z) dx = \int f(y - z) f(y) dy \quad (3)$$

Відповідна ймовірність задоволеності споживача (відсутність дефіциту) визначається залежністю:

$$F(z) = \int f(z) dy \quad (4)$$

Чисельний метод розрахунку  $f(z)$  і  $F(z)$  є найпоширенішим, але для деяких функцій розподілу можна отримати аналітичні рішення (рис 1).

попит	пропозиція	Формула розрахунку
Нормальний; середнє значення $M_y$ ; $\sqrt{\sigma_y}$	Нормальна; середнє значення $M_x$ ; $\sqrt{\sigma_x}$	$P = 1 - F\left(-\frac{Mx - My}{\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}}\right)$
Експоненціальний; параметр $\lambda y$	Експоненціальна (зі зсувом $x_c$ ); параметр $-\lambda x$	$P = 1 - \frac{\lambda x}{\lambda x + \lambda e} \exp(-\lambda x x_c)$
Закон розподілу Пуассонівський; $b$	Закон розподілу Пуассонівський; $a$	$P(z = k) = a_0 + \sum_{m=0}^{\infty} \frac{b^m}{m!} \times \frac{a^{m+k}}{m+r} e^{-a+b}$

Рис.1 Формули для розрахунку ймовірності задоволення попиту (модель «попиту та пропозиції»)

Модель «визначення ідеальної кількості замовлення». Модель базується на відомій статичній (або однопериодичній) задачі управління запасами. Найпоширеніший варіант моделі можна визначити формулою:

$$C_z = C(s - z) + h \int_0^s (s - z) f(x) dx + p \int_s^{\infty} (x - s) f(x) dx, \quad (5)$$

де:  $s$  – ціна закупівлі (або виробництва) одиниці продукції;

- s – розмір замовлення;  
 z – початковий запас (до замовлення);  
 h – питомі витрати, пов'язані зі зберіганням надлишків;  
 x – випадкова величина попиту на товар із щільністю розподілу;  
 p – питомі втрати від незадоволеного попиту.

За умови  $(dC_z/ds) = 0$  після перетворень знаходимо так зване «критичне відношення»

$$F(s) = \frac{p-s}{p+h}, \quad (6)$$

де:  $F(s)$  – кумулятивна функція розподілу попиту.

З точки зору оцінки надійності ланцюга постачань ця модель дозволяє розраховувати ймовірність нереалізованої партії продукції або ймовірність дефіциту  $P(s) = 1 - F(s)$ .

Слід підкреслити, що «критичне співвідношення» залежить тільки від вартісних параметрів. Таким чином, розмір порядку S буде визначатися функцією розподілу  $F(s)$ , обраною для апроксимації попиту.

У таблиці 2 наведено формули для визначення S та результати порівняльних розрахунків для деяких законів розподілу.

Таблиця 2 – Оптимальний розмір замовлення за одноразової покупки при різних законах розподілу

Закон розподілу	Параметри закону	Оптимальний розмір замовлення S
<i>Normal</i>	$x; \sigma_x$	$F\left(\frac{s - \bar{x}}{\sigma}\right) = \frac{p - c}{p + h}$
<i>Exponential</i>	$\lambda = \frac{1}{x}$	$S = \frac{1}{\lambda} \ln \frac{p + h}{c + h}$
<i>Weibull</i>	$m = f(u); x_0 = \frac{\bar{x}}{b^m};$	$S = x_0^m \sqrt{\ln \frac{p + h}{c + h}}$
<i>Rayleigh</i>	$M = \frac{\bar{x}}{\sqrt{0.5\pi}}$	$S = M\sqrt{2} \ln \frac{p + h}{c + h}$
<i>Uniform</i>	$a = \bar{x}; b = \sigma\sqrt{3}$	$S = \frac{p - c}{p + h} (b - a) + a$

Модель за критерієм мінімуму витрат. Класична процесна модель управління ланцюгом постачання за критерієм мінімуму витрат при незалежності процесів має вигляд

$$S = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m S_{ij} \times X_{ij} \rightarrow \min, \quad (7)$$

за обмежень:

$$\sum_{j=1}^m X_{ij} = 1, \forall i = 1, n \text{ на кількість процесів у ланцюзі постачань}$$

$$\prod_{i=1}^n \sum_{j=1}^m P_{ij} \times X_{ij} \geq \beta \text{ на безвідмовності ланцюга постачань}$$

де: n – кількість процесів у ланцюгу постачань;

$m = \max \{k_i\}_n$ ,  $k_i$  – кількість можливих варіантів (стратегій) реалізації i го процесу;

$S_{i,j}$  – витрати на i-ий процес в ланцюзі постачань за реалізації j-ої стратегії;

$\{S_{ij}\}_n^m$  – матриця витрат на процеси;

$\beta$  – необхідна безвідмовність ланцюга постачань (імовірність безвідмовної роботи ланцюга постачань);

$P_{i,j}$  – вірогідність безвідмовної реалізації  $j$ -ої стратегії в  $i$ -му процесі;

$\{P_{ij}\}_n^m$  – матриця ймовірностей безвідмовної роботи;

$X_{i,j}$  – бінарна змінна (змінна вибору), що приймає значення 0 або 1

Складністю використання моделі (7) є необхідність статистичних досліджень для отримання об'єктивних оцінок матриці  $\{P_{ij}\}_{nm}$ . Водночас, за проектування ланцюга постачань необхідно вирішувати завдання вибору постачальників (процесу постачання) з врахуванням вимог кінцевого споживача до надійності постачань  $\beta$ . Тобто, постає завдання нормування вимог до процесної безвідмовності. Вирішення цього завдання можливо за припущення, що процеси незалежні, а потоки відмов – найпростіші. Тоді основне рівняння надійності перетворюється на вираз (8).

$$P(t_\beta) = \exp(-\lambda_0 t_\beta) = \beta \quad (8)$$

звідки

$$\lambda_0 = -\frac{\ln(\beta)}{t_\beta} \quad (9)$$

де:  $\lambda_0$  – інтенсивність потоку відмов ланцюга постачань;

$t_\beta$  – значення фактору ризику (час, обсяг тощо) за  $\beta$ -рівня безвідмовності.

За відсутності в ланцюзі постачань процесів з домінуючою інтенсивністю відмов можна покласти

$$\lambda_{ij} = \lambda_0 \omega_{ij} \quad (10)$$

де:  $\lambda_{ij}$  – інтенсивність відмов  $i$ -го процесу при  $j$ -ої стратегії реалізації,

$\omega_{ij}$  – ваговий коефіцієнт вкладу  $j$ -ої стратегії  $i$ -го процесу у загальну інтенсивність відмов ланцюга постачань.

Відповідно ймовірності безвідмовної реалізації  $j$ -ої стратегії в  $i$ -му процесі дорівнює:

$$P_{i,j} = \exp(-\lambda_0 \omega_{i,j} t_\beta) = \exp[\omega_{i,j} \ln(\beta)] \quad (11)$$

Залишається визначити матрицю вагових коефіцієнтів  $\{\omega_{i,j}\}_n^m$ . Зрозуміло, вимога до надійності процесу має бути тим вищою, чим більшої шкоди завдає відмова за його реалізації. Збитки тут можуть вимірюватися витратами на відновлення процесу, втратами реалізації товару або іміджевими втратами. Їх можна оцінити через втрати на обороті та тарифах за формулою:

$$R = Q \cdot d \left[ 1 - \left( 1 - \frac{\delta}{100} \right) \left( 1 - \frac{\varepsilon}{100} \right) \right], \quad (12)$$

де:  $Q$  – оборот товару;

$d$  – ціна реалізації товару;

$\delta, \varepsilon$  – втрати на обороті та ціні у % відповідно.

Вагові коефіцієнти в цьому випадку пов'язані з витратами обернено пропорційною залежністю і визначаються за формулою:

$$\omega_{i,j} = \frac{1}{R_{i,j} \sum_{i=1}^m \frac{1}{R_{i,j}}}, \quad (13)$$

де:  $R_{i,j}$  – витрати, пов'язані з відмовою при реалізації  $j$ -ої стратегії  $i$ -го процесу.

### **Література**

1. Matsiuk V., Opalko V., Savchenko L., Zagurskiy O., Matsiuk N. Optimisation of transport and technological system parameters of an agricultural enterprise in conditions of partial uncertainty. *Machinery & Energetics*, 2023, 14(3),61-71.<https://doi.org/10.31548/machinery/3.2023.61>.

2. Zagurskiy O., Pokusa T., Zagurska S., Ohiienko M., Titova L., Rogovskii I. Ohiienko A., Razumova K., Berezova L. Current trends in development of transport and logistics systems of delivery of fast perishable foodstuffs. Monograph. Opole: The Academy of Management and Administration in Opole, 2021, 238.

УДК 331.45 (075.8)

## **НОВІТНІ МАТЕРІАЛИ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ЗАСОБІВ ІНДИВІДУАЛЬНОГО ЗАХИСТУ ПРАЦІВНИКІВ ПРОТИ ВІБРАЦІЇ**

*Марчишина Є.І., Таїрова Т.М.*

*Національний університет біоресурсів і природокористування України*

Проблема виробничої вібрації залишається однією з найпоширеніших фізичних небезпек у промисловості. За даними Міжнародної організації праці, понад 25-30 % працівників машинобудування, гірничої та будівельної галузей регулярно піддаються впливу локальної або загальної вібрації. Довготривала дія механічних коливань у діапазоні частот 5–1250 Гц може призводити до розвитку професійних захворювань, зокрема вібраційної хвороби, синдромів порушення периферичного кровообігу, ураження нервової системи та опорно-рухового апарату. За статистикою професійної патології в країнах Європи, до 12-15 % усіх випадків професійних захворювань пов'язані саме з впливом вібрації. У зв'язку з цим особливого значення набуває розроблення ефективних засобів індивідуального захисту (ЗІЗ), у яких застосовуються сучасні антивібраційні матеріали.

Основним принципом захисту від вібрації є зменшення передавання механічної енергії від джерела коливань до тіла людини. Це досягається використанням матеріалів з високими демпфівальними властивостями, здатних поглинати та розсіювати енергію коливань. Класичними антивібраційними матеріалами є гуми на основі натурального та синтетичного каучуку, коефіцієнт внутрішнього демпфірування яких становить 0,05–0,15. Однак сучасні виробничі умови, де амплітуда прискорення вібрації може перевищувати 10-15 м/с<sup>2</sup>, потребують матеріалів з вищими характеристиками поглинання енергії.

Упродовж останнього десятиліття активно розвиваються полімерні композиційні матеріали з підвищеною здатністю до дисипації енергії. Одним із перспективних напрямів є використання поліуретанових еластомерів. Поліуретан характеризується модулем пружності 5–50 МПа та коефіцієнтом демпфірування до 0,25, що дозволяє зменшити передавання вібрації на 40-60 % у середньочастотному діапазоні. Дослідження показують, що застосування багат шарових поліуретанових структур у рукавицях для роботи з відбійними молотками може знизити вібраційне навантаження на руки працівника на 35-45 %.

Іншим напрямом є використання силіконових еластомерів. Силікон зберігає стабільні механічні властивості у широкому температурному діапазоні від -50 до +200 °С, що особливо важливо для працівників будівельної та гірничодобувної галузей. Експериментальні дослідження демонструють, що силіконові гелі з густиною 1,05–1,20 г/см<sup>3</sup> здатні зменшувати пікові значення прискорення вібрації на 30-50 %. Крім того, такі матеріали мають високу довговічність: їхні демпфівальні властивості знижуються менш ніж на 10 % після 500 тисяч циклів навантаження.

Особливий інтерес викликають воскоеластичні полімери, зокрема матеріали типу Sorbothane та інші поліуретанові системи з високим коефіцієнтом втрат. Для таких матеріалів коефіцієнт втрат може досягати 0,4–0,6, що значно перевищує показники традиційних гум. Дослідження показують, що використання воскоеластичних вставок товщиною 6–10 мм у конструкції антивібраційних рукавиць дозволяє знизити рівень передавання вібрації у діапазоні 50-300 Гц на 60-70 %. Саме цей діапазон частот є найнебезпечнішим для розвитку синдрому «білих пальців».

Перспективним напрямом є застосування нанокомпозитних матеріалів. Додавання до полімерної матриці наночастинок вуглецю, графену або кремнезему у концентрації 1-5 % дозволяє підвищити механічну міцність і демпфівальні властивості матеріалу. Експерименти свідчать, що введення 3 % графенових нанопластин збільшує коефіцієнт демпфірування поліуретану приблизно на 20–25 %. При цьому маса матеріалу зростає незначно, що важливо для ергономічних характеристик засобів захисту.

Окрему групу становлять так звані метаматеріали з керованими механічними властивостями. Їх структура складається з періодичних осередків, які можуть ефективно гасити хвилі певного діапазону частот. Лабораторні

дослідження показують, що полімерні метаматеріали з комірчастою структурою здатні зменшувати передавання вібрації на 70–80 % у вузькому частотному діапазоні. Хоча такі матеріали поки що перебувають на стадії експериментальних розробок, вони мають значний потенціал для використання у майбутніх поколіннях засобів індивідуального захисту.

Практичне застосування антивібраційних матеріалів найбільш поширене у рукавицях, устілках, амортизуючих прокладках та сидіннях операторів техніки. Наприклад, сучасні антивібраційні рукавиці повинні забезпечувати коефіцієнт передавання вібрації не більше 0,9 у низькочастотному та 0,6 у середньочастотному діапазоні відповідно до стандарту EN ISO 10819. Використання багатошарових композицій з поліуретанових та віскоеластичних матеріалів дозволяє досягти цих показників навіть при значних рівнях вібраційного навантаження.

Таким чином, аналіз сучасних досліджень показує, що найбільш перспективними антивібраційними матеріалами для виготовлення засобів індивідуального захисту є поліуретанові еластомери, силіконові гелі, віскоеластичні полімери та полімерні нанокомпозити. Їх використання дозволяє знизити рівень передавання вібрації на 40–70 %, що істотно зменшує ризик розвитку професійних захворювань у працівників. Подальший розвиток цієї галузі пов'язаний із створенням легких багатошарових композиційних структур та метаматеріалів з керованими демпфувальними характеристиками, здатних ефективно працювати у широкому діапазоні частот.

### **Література**

1. Griffin M. J. Handbook of Human Vibration. London: Academic Press, 2012.
2. Dong R., Welcome D., McDowell T. Vibration energy absorption of glove materials. Applied Ergonomics. 2019.
3. ISO 10819:2013. Mechanical vibration and shock – Hand-arm vibration – Measurement and evaluation of the vibration transmissibility of gloves.
4. Mansfield N. Human Response to Vibration. Boca Raton: CRC Press, 2018.
5. Rakheja S., Dong R. Advances in vibration isolation and damping materials. Journal of Sound and Vibration. 2020.
6. Kim H., Lee J. Polymer nanocomposites for vibration damping applications. Materials Science and Engineering. 2021.

УДК: 656.073.43:355.01:629.43](477)

## РИЗИКИ ВОЄННОГО СТАНУ ПРИ ПЕРЕВЕЗЕННІ ТАРНО-ШТУЧНИХ ВАНТАЖІВ У ПРИМІСЬКОМУ СПОЛУЧЕННІ НА ТЕРИТОРІЇ УКРАЇНИ

*Дьомін О.А., Осадча О.В.*

*Національний університет біоресурсів і природокористування України*

Перевезення тарно-штучних вантажів (продуктових палет, будівельних матеріалів у мішках, обладнання в ящиках) у приміських зонах України у 2026 році стикається з комплексом ризиків, які можна поділити на безпекові, логістичні та економічні. Приміські зони є найбільш вразливими, оскільки вони часто стають транзитними вузлами між тилловими містами та прифронтовими або деокупованими територіями. Це комплекс ризиків можна умовно поділити на три великі групи в залежності від характеру загрози: безпекові ризики, логістичні ризики, ризики для вантажу та його упаковки.

Розглянемо кожену групу ризиків детальніше.

1. *Безпекові ризики* - це ризики, що характерні наявністю прямої загрози. Це головна категорія ризиків, що безпосередньо загрожує життю персоналу та цілісності вантажу. Сюди відносяться:

- Загроза БПЛА та ракетних ударів. Приміські логістичні центри та дрібні склади часто розташовані поблизу стратегічних розв'язок, що робить їх цілями для ворожих дронів (рис. 1).



Рис. 1. Враження магістрального складу

- Мінна небезпека на узбіччях. На територіях, що були під окупацією або в зоні бойових дій, з'їзд вантажівки на узбіччя в передмісті залишається критичним ризиком (рис. 2).
- Блокпости та перевірки. Посилений режим контролю в приміських зонах може призводити до непередбачуваних затримок, що критично для тарно-штучних вантажів з обмеженим терміном придатності.



Рис. 2. Міна-пелюстка (дистанційне мінування узбіччя)

2. *Логістичні ризики* - провокують операційні збої. Тарно-штучні вантажі вимагають чіткого графіку, який в умовах війни постійно порушується. До таких ризиків відносяться:

- Руйнування інфраструктури (Мости та переправи): Приміські маршрути часто залежать від одного-двох мостів. У разі їх пошкодження логістичне "плече" може збільшитися в 3-4 рази.
- Обмеження комендантської години: Неможливість здійснювати нічні розвантаження або доїзди до складів у передмісті скорочує "робоче вікно" системи масового обслуговування.
- Дефіцит малотоннажного транспорту: Велика кількість бусів та легких вантажівок мобілізована для потреб оборони, що створює дефіцит машин для розвезення штучних товарів по дрібних точках.

3. Ризики для вантажу та упаковки. Специфіка тарно-штучних вантажів полягає в їхній крихкості та чутливості до умов зберігання. До таких ризиків відносяться:

- Порушення цілісності упаковки через поганий стан доріг (внаслідок проїзду важкої військової техніки) вібраційне навантаження на палети зростає, що призводить до пошкодження штучного товару всередині тари.
- Простої без терморегуляції: Якщо вантаж довго знаходиться у заторі перед блокпостом або через тривогу, відсутність стабільного енергопостачання для рефрижераторів може зіпсувати партію товару.

Для нівелювання цих ризиків компаніям рекомендується здійснювати диверсифікація складів. Тобто на зміну великих магістральних складів використовувати декілька малих складів у різних передмістях. Проводити гнучке планування - використання динамічних навігаційних систем, що враховують закриття доріг у реальному часі. Посилювати кріплення вантажу - використання додаткових засобів стабілізації вантажу на палетах (стрічтування, кутники) через погіршення якості дорожнього покриття.

УДК: 626.025.4:338.47](477)

## ПЕРСПЕКТИВИ ПЕРЕВЕЗЕННЯ НЕГАБАРИТНИХ ВАНТАЖІВ В УКРАЇНІ

*Дьомін О.А., Олійник Я.В.*

*Національний університет біоресурсів і природокористування України*

Ринок перевезення негабаритних вантажів в Україні у 2026 році переживає етап трансформації, що полягає в переході від екстреної адаптації перших років війни до системної інтеграції в європейську логістичну мережу.

Ключові перспективи та тенденції цього сектора продиктовані в першу чергу енергетичною галуззю та відбудовою як основними драйверами зростання обсягів негабаритних перевезень. Основним замовником негабаритних перевезень залишається держава та великий бізнес, залучений до відновлення інфраструктури. Зокрема в першу чергу перевозяться:

- енергетичне обладнання. Постійна потреба у транспортуванні потужних трансформаторів, генераторів та компонентів для вітрових електростанцій (рис. 1);



Рис. 1. Автоперевезення негабаритного обладнання

- спецтехніка - масове переміщення дорожньої та будівельної техніки (екскаватори, крани, балки) для ремонту мостів та автошляхів;
- об'єкти модульного будівництва. Зростає попит на перевезення готових житлових та промислових модулів.

На другому місці за розвитком негабаритних перевезень є процеси євроінтеграції та транспортного безвізу. Станом на 2026 рік Україна значно спростила вихід на міжнародний ринок. Тут характерні наступні напрями діяльності.

- Доступ до 35+ країн: завдяки лібералізації вантажних перевезень, українські компанії можуть працювати в ЄС, Норвегії, Великій Британії та Туреччині без спеціальних дозволів на транзит (у межах стандартних лібералізованих правил).
- Гармонізація норм: Україна активно впроваджує європейські стандарти габаритно-вагових обмежень. Це полегшує планування маршрутів, що перетинають кордон.  
Третім драйвером розвитку негабаритних перевезень є технічна модернізація та цифровізація, куди можна включити наступні процеси.
- Оновлення парку: понад 70% логістичних компаній планують інвестиції в модернізацію техніки у 2026 році. Пріоритет — низькорамні трали (lowboys) з розсувними платформами та поворотною віссю для кращого маневрування.
- eQueue та WIM - система «Черга (eQueue) для вантажівок та майданчики зважування в русі (WIM) стають обов'язковим стандартом. Це зменшує корупційні ризики та затримки на кордоні.
- Цифрові дозволи: отримання дозволів на негабарит (якщо вантаж перевищує ширину 2,6 м або висоту 4 м) поступово переходить у повністю електронний формат через сервіси Мініфраструктури.

Не дивлячись на суттєве зростання і розвиток негабаритних перевезень на території України у зв'язку із повномасштабною російською агресією слід також відмітити досить суттєві виклики та ризики пов'язані із сучасним воєнним станом в країні. Зокрема, дефіцит кадрів приводить до нестачі кваліфікованих водіїв та інженерів-логістів, що здатні фахово грамотно розраховувати складні маршрути для негабаритних перевезень, особливо під мостами та лініями електропередач. Це залишається особливо гострою проблемою. На другому місці серед викликів та ризиків є стан дорожнього покриття у більшості регіонів України. При цьому основні магістралі, наприклад проект GO Highway, підтримуються в належному стані, дороги територіального та регіонального значення досить часто не розраховані на великовагові навантаження від чого вони в першу чергу і страждають. також слід додати збитковість залізниці, що видно із прогнозів на 2026 рік. За означеними прогнозами вантажні перевезення залізницею можуть стати операційно збитковими для української залізниці, що стимулює перехід негабаритних вантажів на автомобільні шляхи які і без того потерпають від руйнування.

УДК: 631.825-045.85:63

## ВАНТАЖНІ ПЕРЕВЕЗЕННЯ МІНЕРАЛЬНИХ ДОБРИВ ДЛЯ ПОТРЕБ АПК УКРАЇНИ В ПЕРІОД РИЗИКІВ ВОЄННОГО СТАНУ

*Дьомін О.А., Тонконог І.В.*

*Національний університет біоресурсів і природокористування України*

Доставка мінеральних добрив — це багатофакторний процес, що вимагає високої технологічної дисципліни. Специфіка полягає не лише у використанні спеціалізованого рухомого складу, а й у жорсткому забезпеченні ізоляції реагентів від зовнішнього середовища та захисту екосистем. Значна частина азотних та фосфорних сполук класифікується як небезпечні вантажі (ADR), що зобов'язує персонал проходити спеціальну сертифікацію для ліквідації можливих витоків чи хімічних інцидентів під час транзиту.

Нова парадигма територіального розподілу мінеральних добрив для АПК України продиктована почастійними ризиками засобів враження (рис. 1).



Рис. 1. Бомбардування магістрального терміналу

Воєнний стан вніс корективи у стратегію накопичення ресурсів. Досвід 2022-2025 років довів, що концентрація тисяч тонн добрив на великих терміналах є критично вразливою. Сучасна модель передбачає дифузне зберігання: використання мережі малих складських пунктів, що значно знижує ризик втрати всього обсягу активів від точкових ударів БПЛА та ракет.

У якості прикладу дотримання означених вимог розглянемо ситуацію для агрохолдингу, що оперує в Західному регіоні. Через перехід на модель малих складів, виникла потреба у перерахунку маршрутів постачання.

Ресурсна база (Склади):

1. Склад №1 (Тернопіль): 240 т
2. Склад №2 (Чортків): 110 т
3. Склад №3 (Бучач): 150 т (Сумарний ресурс: 500 т)

Виробничі потреби відділень холдингу:

- Філія «Схід»: 180 т
- Філія «Центр»: 100 т
- Філія «Захід»: 120 т
- Філія «Південь»: 90 т (Загальний запит: 490 т; резервний залишок: 10 т)

На основі аналізу діючого і запропонованого методів планування ми провели їх порівняльну характеристику.

1. Діючий метод планування серед недосвідчених перевізників традиційно полягає у застосуванні методу північно-західного кута: Логістичний відділ такої компанії заповнював потреби механічно, починаючи з першого складу до першої філії. За такого планування маршрути часто перетиналися, а паливо витрачалося неефективно. При цьому розрахункові витрати в середньому становили 142 000 грн.

2. Запропоноване рішення полягає у використанні методу подвійної вигоди. Ми пропонуємо алгоритм, де пріоритет віддається маршрутам з мінімальним тарифом (найменша відстань або найкраща ціна за тонно-кілометр).

Серед переваг такого планування слід відмітити наступні:

- дотримання економічної прозорості (виключення переплат за складну логістику між віддаленими точками);
- сприяння довгостроковому партнерству (постачальник демонструє клієнту економію, що робить співпрацю довгостроковою);
- оперативність доставок (менші відстані дозволяють швидше реагувати на періоди сприятливих погодніх умов для внесення добрив).

Впровадження методу подвійної вигоди дозволяє знизити логістичне навантаження на 15-20% порівняно з базовим плануванням, що є критичним фактором рентабельності в умовах зростання цін на паливо та ризиків воєнного часу.

УДК 631.171: 633.63

## **ПЕРЕДУМОВИ УДОСКОНАЛЕННЯ ПІДГОТОВКИ ҐРУНТУ ДО СІВБИ ЦУКРОВИХ БУРЯКІВ**

*Теслюк<sup>1</sup>В.В., Вечера<sup>1</sup>О.М., Ікальчик<sup>2</sup>М.І.*

*<sup>1</sup>Національний університет біоресурсів і природокористування України*

*<sup>2</sup>ВП НУБіП України "Ніжинський агротехнічний інститут"*

Аналіз технологій та технологічних операцій вирощування сільськогосподарських культур в т. ч. цукрових буряків, з метою оптимізації технологічних затрат збереження а краще покращення агрофонів, біологічних систем землеробства з урахуванням ґрунтово-кліматичних особливостей та зональних систем рослинництва вимагають постійної затрати часу і ресурсів на її реалізацію.

Результатами багаторічних досліджень науково-дослідних установ встановлено, що рослини цукрових буряків характеризуються високими вимогами до основного та передпосівного обробітку ґрунту. Особливо відмічено негативний вплив підвищеної його ущільненості, яка є результатом, багаторазових проходів ходових систем машинно- тракторних агрегатів передпосівного обробітку ґрунту, особливо важкого за механічним складом, який є найбільш сприятливим для вирощування цукрових буряків.

Науково доказано, що основними показниками, яких необхідно досягти передпосівним обробітком ґрунту є створення ущільненої дрібногрудчуватої поверхні ґрунту глибиною 4-5 см (грудочок фракцією 1 - 10 мм має становити 80 – 90 відсотків, а грудочок понад 30 мм не має бути). За таких вимог до передпосівного обробітку необхідно досягти вирівнення поверхні поля, коли наявність гребенів висотою 2 см не має бути. Встановлено, що щільність ґрунту повинна знаходитися в межах 1,1...1,3 г/см<sup>3</sup>. Забезпечення таких показників визначає оптимальний стан і відношення повітряного і вологоємнісного стану ґрунту, що є передумовою дружніх сходів насіння рослин та сприятливого розвитку рослин в період вегетаційного росту.

Встановлено, традиційна інтенсивна технологія виробництва коренеплодів цукрових буряків передбачає близько десятка операцій, а за умов вирощування на ґрунтах важких за механічним складом, здатних до запливання і ще більше, затрати паливних і сервісних матеріалів за таких умов складають 280-450 кг/га.

Застосування традиційної технології підготовки ґрунту передбачає, що під час весняного передпосівного обробітку ґрунту проводиться його розпушування зубовими боронами з послідуєчим вирівнюванням шлейф-боронами в агрегаті з зубовими, причому для зони достатнього зволоження необхідне наступне додаткове глибоке розпушування культиваторами для суцільного обробітку. У традиційному технологічному процесі весняної передпосівної підготовки ґрунту кінцевим є культивація на глибину заробки насіння, а при надмірно розпушеному ґрунті необхідно провести коткування.

Аналіз літературних і патентних джерел свідчить, що перспективи механізованої технології і розробки технічних засобів для її виконання при вирощуванні цукрових буряків в напрямку збільшення виходу продукції зменшення енергозатрат можна бачити в гребеневому способі підготовки ґрунту. Однак в Україні для неї немає спеціалізованих машин і робочих органів для широкої апробації і впровадження у виробництво.

Метою досліджень є підвищення ефективності вирощування коренеплодів цукрових буряків на важких за механічним складом ґрунтах шляхом мінімізації передпосівного обробітку у весняний період із перенесенням операції на осінь.

Матеріали та методи. Для дослідження теоретичних передумов запропонованих технологічних операцій передпосівного обробітку ґрунту з розподілом операцій на осінній і весняний періоди на глибину заробки насіння й урожайність коренеплодів цукрових буряків розроблено програму експериментальних досліджень та технічного забезпечення для їх проведення.

Результати. Восени на фоні основного і поверхневого обробітку ґрунту на поверхні поля культиватором, обладнаним робочими органами гребенеутворювачами проводиться формування гребенів шириною міжрядь 45 см. Попередньо під гребенями в зону рядків рекомендується стрічкове внесення мінеральних добрив за допомогою встановлених туковисівних апаратів. Орієнтування руху культиватора-гребенеутворювача відбувається за допомогою встановлених маркерів. Утворена профільована поверхня поля залишається на зиму.

Весняний передпосівний обробіток ґрунту передбачає зрізування вершин гребенів висотою 3...4 см, виконується машинним агрегатом у складі трактора 1 і просапного культиватора, з наступною сівбою насіння точною сівалкою в зону зрізаних вершин гребня

Перевагами сформованих восени гребенів є інтенсивне накопичення вологи, весняне прискорене дозрівання ґрунту в зоні гребенів, яке сприяє проведенню сівби в більш ранні строки без проведення решти операцій

Отримані результати попередніх досліджень підтверджують позитивну ефективність запропонованої технології передпосівного обробітку ґрунту під сівбу буряків на ґрунтах важких за механічним складом.

### **Література**

1. Гречкосій В.Д. Проектування технологічних процесів у рослинництві: навчальний посібник / В.Д. Гречкосій, В.Д. Войтюк, Р.В. Шатров, І.І. Мельник, Я.М. Михайлович, В.Г. Опалко. – Вид. центр НУБіП України, 2011. – 364 с.

2. Войтюк Д.Г. Сільськогосподарські машини: підручник / Д.Г. Войтюк, Л.В. Аніскевич та ін.; за ред. Д.Г. Войтюка. — К.: Агроосвіта, 2015. – 679 с.

3. Теслюк В.В. Техніко-технологічне забезпечення мінімалізації передпосівного обробітку ґрунту під сівбу цукрових буряків / В.В. Теслюк, М.Б. Івашина, М.М. Покидько // Збірник тез доповідей XXIII Міжнародної наукової конференції " „Сучасні проблеми землеробської механіки” (16-18 жовтня 2022 року) МОН України, НУБіП України, Житомирський агротехнічний фаховий коледж. Київ. Житомир. 2022. – С. 54 – 56.

УДК 631.4; 631.31

## **ОБҐРУНТУВАННЯ КОНСТРУКТИВНОГО УДОСКОНАЛЕННЯ БОРІН ДЛЯ ОБРОБІТКУ ҐРУНТУ**

*Теслюк В.В., Вечера О.М., Теслюк Б.В.*

*Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ,*

Розглянуто технології основного та передпосівного обробітків ґрунту із застосуванням знарядь з ротаційними робочими органами. Запропоновано застосування ґрунтообробного знаряддя оснащеного ротаційно-лопатевими робочими органами .

Сучасна аграрна техніка повинна розроблятися із врахуванням функціональних, естетичних та ергономічних підходів. Фактором формоутворення сільськогосподарської техніки повинна бути відповідність функціональному призначенню, використаним матеріалам та конструктивній доцільності. Досягнути гармонії у формі можна досягнути за допомогою засобів композиції: пропорції, масштабності, симетрії (асиметрії), статичності (динамічності), ритму, контрасту, нюансу тощо. Цілий виріб утворюється з частин, частини характеризуються різними геометричними розмірами та знаходяться в певному відношенні одна від одної і до цілого.

В системі основного та передпосівного обробітків ґрунту широкого застосування набуває обробіток ґрунту знаряддями з ротаційними робочими органами. Найбільш широко використовуються ґрунтообробні знаряддя типу БДН-1,8, БДТ-3, БДТ-7, оснащені сферичними вирізними роторами [1,2].

Використання цих знарядь забезпечує скорочення термінів підготовки ґрунту до посіву, зниження енерговитрат та витрат праці на 20...25%, в порівнянні, з іншими типами ґрунтообробних машин. Однак, в силу своїх конструктивних особливостей ґрунтообробні знаряддя оснащені серійними робочими органами не повною мірою забезпечують агротехнічні вимоги стосовно заробки добрив, рослинних решток, гербіцидів тощо. Так, при заробці дисковою бороною на поверхні ґрунту, в шарі 0...6мм, залишається до 75% внесених добрив, що значно зменшує ефективність їх використання сільськогосподарськими рослинами. Тому необхідним є обґрунтування робочих процесів спрямованих на покращення показників обертання скиби та розробка конструкцій ротаційних робочих органів, які забезпечували б достатню якість обробітку за показниками заробки в ґрунт на оптимальну глибину стерні, органічних та мінеральних добрив тощо.

Мета дослідження: Підвищення ефективності основного та передпосівного обробітку ґрунту.

За результатами попередніх аналітичних досліджень запропоновано ротаційний робочий орган, оснащений ножами-лопатями, передня робоча поверхня яких є коноїдом, уніфікований до борін БДН-1,8, БДВ-3, БДВ-7. Встановлені оптимальні межі варіювання кута атаки  $\beta=20^\circ \dots 23^\circ$  батареї робочих органів, та відстань між роторами в батареї  $l=0,20 \dots 0,22$ .

За результатами дослідження структурно-агрегатного складу ґрунту встановлено, що кількість агрегатів ґрунту ( $d < 0,25$  і  $d > 10$ ), які не відповідають агрономам, у запропонованих варіантах №1 та №2 зменшилась на 14,5% і 12,7% відповідно, до фону та на 2,8% і 1,0% відповідно, до базового варіанта а коефіцієнт структурності в порівнянні з базовим варіантом збільшився в 1,14 (варіант 1) та 1,04 (варіант 2) рази.

Встановлено, що застосування ґрунтообробного знаряддя оснащеного ротаційно-лопатевиими робочими органами дозволяє зменшити кількість ерозійно-небезпечних агрегатів ґрунту на 14,5% в порівнянні з агрофоном, та на 2,8% відносно базового варіанту порівняння; коефіцієнт структурності в порівнянні з базовим варіантом збільшився в 1,14; абсолютна вологість ґрунту у шарі 0...20см в порівнянням з базовим варіантом була вищою на 5,6%; щільність обробленого ґрунту знаряддям з пропонованими робочими органами відповідає агрономам і становить 1,198г/см<sup>3</sup>, що на 6,2% менше ніж для базового варіанту і на 37% менше у порівнянні з агрофоном; величина опору зминання ґрунту (твердість) становить 49,77кН/м<sup>2</sup>, що менше на 15,7% у порівнянні з базовим обробітком та на 43% менше у порівнянні з фоном.

**Висновки.** Показник заробки добрив та рослинних решток, в порівнянні з базовим варіантом, збільшився в 2,07 разів і становить 87% та відповідає теоретично визначеному значенню. Максимальна гребнистість мікрорельєфу профілю обробленої поверхні поля за обробітку знаряддям оснащеним пропонованими ґрунтообробними робочими органами не перевищує 5,6см.

### Література.

1. Дизайн та ергономіка аграрної техніки : [навч. посібник для студ. вищ. навч. закл.] / В.О. Дубровін, В.Г. Мироненко, М.Д. Мельничук, Л.Ф. Бабіцький, В.В. Теслюк, В.Б. Онищенко, О.П. Слинько, С.В. Драгнев. – К: «Аграр Медіа Груп», 2014. – 157 с.

2. Корабельский В. И. Техническое обоснование и использование в экологической почвообработке поверхностей знакопеременного воздействия / Корабельский В.И., Кравчук В.И., Павлоцкая В.А. // Техника АПК. – 2001. - №7-9. – С.24-26

3. Кухарець С.М. Кінематична модель ротаційного ґрунтообробного знаряддя / Кухарець С.М., Шелудченко Б.А., Забродський П.М. // Вісник Державної агроекологічної академії України. – Житомир. – ДАУ. - 2002. – №1. – С.133-137.

4. Модельні дослідження макетів ротаційних робочих органів ґрунтообробних знарядь /С.М.Кухарець, Б.А.Шелудченко, В.О.Шубенко та ін. // "Механізація сільськогосподарського виробництва": Зб. наук. пр. Нац. аграр. ун-ту. – К. - НАУ. - 2000. – №8. – С.199-202.

5. Надійність роботи ґрунтообробного знаряддя з “кільцевими” ротаційними робочими органами за наявності у них технологічних тріщин / Б.А. Шелудченко, В.О. Шубенко, С.М.Кухарець та ін. // Вісник Державної агроекологічної академії України. – Житомир. - ДААУ.- 1999.– №1-2.–С.124-129.

УДК 631.4; 631.31

## **ВПЛИВ ДІЇ РУШІЇВ МАШИН НА СИСТЕМУ «МАШИНА-БІОСЕРЕДОВИЩЕ»**

*Теслюк В.В.<sup>1</sup>, Ікальчик М.І.<sup>2</sup>, Кривичун М.Д.<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> *Національний університет біоресурсів і природокористування України*

<sup>2</sup> *ВП НУБіП України "Ніжинський агротехнічний інститут"*

<sup>3</sup> *Мирогощанський аграрний фаховий коледж*

Аналіз дії рушіїв машин на систему «машина-біосередовище» свідчить про значний негативний вплив на ґрунт: ущільнення, руйнування структури, зниження родючості та порушення екологічної рівноваги. Ефективним методом мінімізації впливу є оптимізація параметрів рушіїв (тиск на ґрунт, площа контакту) для сталого функціонування агроєкосистем.

Основні положення аналізу впливу рушіїв (коліс/гусениць):

Функціональна система «машина-біосередовище»: Включає механічний вплив рушія (трактора, комбайна) на ґрунтове середовище, що спричиняє фізичну деформацію.

Фізико-механічні зміни ґрунту: Рушії викликають надмірне ущільнення нижніх шарів, знижують пористість, що погіршує водно-повітряний режим та обмежує розвиток кореневої системи.

Екологічні наслідки: Порушення структури ґрунту призводить до ерозії, зниження здатності ґрунту до самовідновлення та падіння врожайності.

Шляхи мінімізації впливу: Використання шин низького тиску, здвоєних коліс, гусеничних рушіїв, а також дотримання принципу технологічної колії для обмеження площі ущільнення.

Перспективу розвитку технічної концепції сільськогосподарського трактора слід прогнозувати, ґрунтуючись, насамперед, на розвитку технологій сільськогосподарського виробництва і машинно-тракторних агрегатів (МТА) загалом.

Аналіз технологічних і агротехнічних факторів, що визначають концепцію розвитку енергетичних засобів, показують, що їх шляхи неоднозначні, а іноді і суперечливі, тому прагнення підвищити одні властивості технічних засобів призводять до зниження інших. Так, основні вимоги - підвищення продуктивності й енергооснащеності МТА, скорочення кількості обслуговуючого персоналу - можуть бути реалізовані тільки в результаті підвищення потужності двигуна й збільшення сили тяги, а це вимагає підвищення ваги енергетичного і транспортного засобу.

Мета дослідження. Зменшення негативного впливу колісних рушіїв енергетичних засобів на ґрунтове середовище.

Виклад основного матеріалу. Радикальний спосіб збільшення відносної частки зчіпної ваги в агрегаті, або активізації ваги МТА - оснащення його технологічної частини ведучими колесами, що приводяться у рух від системи відбору потужності автомобіля й трактора. У цьому випадку тільки частина

потужності двигуна реалізується через ходову систему трактора (відповідно, йому не потрібна значна вага), тому його питома матеріалоемність може бути знижена ще більше, ніж при пасивних опорних колесах зчіпки.

Результати наукових досліджень і практичний досвід свідчить про тісний кореляційний зв'язок між ущільнюючою дією ходових систем енергонасиченої мобільної сільськогосподарської техніки й мобільних транспортних агрегатів з процесами деградації ґрунтового покриву. Широкого застосування в агровиробництві набуває застосування важких великовантажних автомобілів та енергетичних засобів приводу причіпних сільськогосподарських машин до яких відносяться вітчизняні і зарубіжні трактори, використання яких призводить до руйнування агроструктурних агрегатів ґрунту їх переущільнення і, як наслідок, до значного погіршення фізико-механічних властивостей ґрунту. Тому, обґрунтування оптимальних конструкційних параметрів колісних рушіїв енергетичних засобів, та розробка заходів, які запобігатимуть негативним наслідкам, сприятимуть зберіганню родючості ґрунтів є актуальною задачею.

Зниження рівнів техногенного тиску мобільної сільськогосподарської техніки на ґрунти може бути досягнуте завдяки комплексній оптимізації параметрів конструкції рушіїв мобільних засобів та відповідним нормуванням їх експлуатаційних властивостей. З метою зниження шкідливої дії ходових частин енергетичних і транспортних агрегатів пропонується модернізовані рушії тракторів обладнувати шинами більших розмірів або спареними колесами.

**Висновки.** Встановлено, що об'ємна деформація ґрунту під рушіями пропонованого варіанту (трактор Т-150К, обладнаний шиною 28,1R26) в 2,73...3,1 рази менша ніж при застосуванні серійних ходових частин загальноновживаних тракторів (Т-150К з шинами 21,3R24) і лише в 1,3...1,5 разів більша в порівнянні з абсолютним контролем, в той час, як для серійних варіантів цей показник варіює в межах 3,9...4,2.

### Література

1. Адамчук В.В. Система техніко-технологічного забезпечення виробництва продукції рослинництва / за ред. В.В. Адамчука, М.І. Грицишина. – К.: Аграр. Наука, 2012. – 416 с.

2. Кушнарєв А.С., Кочев В.И. Механико-технологические основы обработки почвы. - К.: Урожай, 1989. – 144 с.

3. Булгаков В.М., Шелудченко Б.А., Білецький В.Р. До обґрунтування агроекобезпечних рівнів техногенного тиску на ґрунт колісних рушіїв мобільної сільськогосподарської техніки // Науковий вісник НУБіП. - Київ, 2008. - Вип.9 - С. 81-84.

УДК 631.51:631.31

## ОБГРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ І РЕЖИМІВ СЕПАРУВАННЯ ЗЕРНОВИХ КУЛЬТУР

*Теслюк В.В.<sup>1</sup>, Ікальчик М.І.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Національний університет біоресурсів і природокористування України

<sup>2</sup> ВП НУБіП України «Ніжинський агротехнічний інститут»

Підготовка якісного насінневого і продовольчого матеріалу, збільшення обсягів переробки зерна вимагають підвищення ефективності процесу решітної сепарації. Існуючі вібраційні і вібровідцентрові сепаратори не повністю задовольняють зростаючі вимоги виробництва. Аналізом досліджень решітної сепарації встановлено, що перспективним напрямом підвищення його ефективності є інтенсифікація внутрішньосферних процесів із застосуванням розпушувачів.

Дослідженню процесу просіювання насіння через отвори вібраційних решіт, що здійснюють просторові коливання, присвячені роботи П.М. Заїки [1]. Ним визначені найкращі умови для просіювання насіння при вільному проходженні через отвір і при взаємодії його з кромками. Встановлені кінематичні режими роботи решіт, що забезпечують ці умови.

Аналіз робіт показує, що інтенсифікація сегрегації повинна здійснюватися шляхом збільшення пористості і швидкості пошарового руху. Для цього доцільно застосовувати розпушувачі. Таким чином, обґрунтування параметрів процесу решітної сепарації з урахуванням закономірностей пористості ЗС і пошарового руху, розробка нових конструкцій решіт, що розпушують суміш, є актуальним завданням для розвитку зернопереробної галузі України.

Для підвищення питомої продуктивності і якості процесів сепарації запропоновано удосконалити решета, які виготовлено із серійних, на поперечних перемичках яких, встановлено ребра у вигляді наварених металевих проволочок, або виштампувані довгасті рифлі. Такі решета розпушують зернову суміш, інтенсифікують пошаровий рух і сприяють підвищенню ефективності сепарації.

Для збільшення продуктивності і якості сепарації сипких сумішей, що важко розділяються розробники запропонували на внутрішній поверхні ротора вібровідцентрового сепаратора рухомі кільцеподібні обичайки із закріпленими на них шпильками-розпушувачами [2].

Збільшення завантаження решета супроводжується зростанням товщини шару суміші, що знижує інтенсивність сегрегації: проходові частинки з верхніх шарів не досягають поверхні решета і не просіваються. Таким чином, подальше підвищення ефективності процесу решітної сепарації вимагає інтенсифікації сегрегації.

Інтенсивність проникнення збільшується із збільшенням інтенсивності зміни розмірів і форми цих пор [3].

Для розрахунку і керування якістю і продуктивністю побудовано математичні моделі процесів сепарації зернових сумішей розробленими

циліндричними вібровідцентровими решетами. Отримано залежності траєкторій і швидкостей частинок, ефективності сегрегації від кінематичних параметрів решіт, їх питомих завантажень, конструктивних параметрів розпушувачів, фізико-механічних властивостей зернових сумішей. Встановлено, що найбільша ефективність сегрегації на циліндричному решеті досягається при пористості  $\varepsilon=0,59...0,62$ , градієнті швидкості  $\text{grad } v=60,2...82,7 \text{ с}^{-1}$ . Застосування розрихлювачів збільшує ефективність сегрегації на 35...40%.

На підставі результатів проведених теоретичних і експериментальних досліджень встановлено, що застосування розроблених решіт інтенсифікує сегрегацію.

Дослідженням руху проходових частинок в шарі встановлено, що найбільша ефективність сегрегації  $\eta$  досягається при застосуванні ребер на підсівних решетах, проходовими частинками яких є дрібні домішки і роздроблене зерно, а рифлів – на сортувальних решетах, проходовими частинками яких є зерна основної культури менших розмірів. Розбіжність експериментальних результатів від теоретичних складає 3...5%. Підтверджена адекватність побудованих математичних моделей процесу решітної сепарації зерноsumіші.

Отримано залежності пористості і швидкості ЗС по глибині шару від кінематичних параметрів решіт, їх питомих завантажень, конструктивних параметрів розпушувачів. Встановлено, що пористість і швидкість ЗС нелінійно зменшуються з глибиною. Застосування ребер і рифлів збільшує пористість і градієнт швидкості ЗС по глибині шару.

Комплексним аналізом результатів теоретичних і експериментальних досліджень рекомендовано оптимальні значення конструктивних параметрів ребер підсівного і рифлів сортувального решіт: діаметр ребер  $d_{\text{реб}}=1,4...1,6 \text{ мм}$ ; висота рифлів  $h_{\text{риф}}=1,2...1,4 \text{ мм}$ ; відстань між ребрами і рядами рифлів  $l_{\text{реб}}=l_{\text{риф}}=21 \text{ мм}$ ; відстань між рифлями  $l^*=12...14 \text{ мм}$ . Це дає підстави рекомендувати результати досліджень конструкторам, науковим робітникам і спеціалістам машинобудівної галузі.

### Література

1. Заика П.М. Вибрационные семяочистительные машины и устройства. – М.: МИИСП, 1981. – 141 с.
2. Зерноочистительная-сортировальная машина: А.с. 1253674 СССР, МКИ В07В 13/00 / Д.И. Мазоренко, Л.Н. Тищенко, С.В. Проценко (СССР). – №3880947/29-03; Заявл. 09.04.85; Опубл. 30.08.86, Бюл. №32. – 3 с.
3. Войтюк Д.Г. Сільськогосподарські машини: підручник / Д.Г. Войтюк, Л.В. Аніскевич, В.В. Іщенко та ін.; за ред. Д.Г. Войтюка. — К.: Агроосвіта, 2015. – 679 с.

УДК 631.171: 633.63

## **АНАЛІЗ ТА УДОСКОНАЛЕННЯ КОПІРА АПАРАТА ВОДІННЯ КОРЕНЕЗБИРАЛЬНОЇ МАШИНИ**

*Теслюк В.В.<sup>1</sup>, Барановський В.М.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Національний університет біоресурсів і природокористування України,

<sup>2</sup> Тернопільський національний технічний університет ім. Івана Пулюя

Вирощування цукрових буряків в Україні є стратегічною галуззю агропромислового комплексу, яка забезпечує продовольчу безпеку (виробництво цукру), приносить високу прибутковість фермерам (рентабельності) та є цінним попередником у сівозміні, підвищуючи врожайність наступних культур на 30-40%. Буряк є прекрасним попередником для багатьох культур, зокрема для зернових, оскільки залишає поле чистим від бур'янів завдяки інтенсивному догляду. Цукрові буряки є основною сировиною для виробництва білого цукру. Окрім самого цукру, з коренеплодів отримують патоку (для виробництва спирту, дріжджів, гліцерину) та жом, який використовують як цінний корм для тварин.

Важливим резервом збільшення валових зборів зерна, технічних та інших сільськогосподарських культур є зростання оснащеності сільськогосподарського виробництва високопродуктивними машинами, і підвищення їх експлуатаційних показників [1,2].

Зменшення втрат технічних культур в країні лише на 1% рівнозначно збільшенню посівних площ на 1 млн. га.

За статистичними даними втрати кормових буряків під час збирання коливаються в межах від 4 до 13% і їх величина значною мірою залежить від типу збиральних машин та систем керування робочими органами [3].

Тому одним із шляхів удосконалення автомата керування є значне спрощення його конструкції і одночасно підвищення точності і надійності роботи

Одними з найбільш вагомих є втрати внаслідок механічного пошкодження коренеплодів в процесі їх викопування внаслідок несправності, або недостатньої ефективності автомата керування.

Тому в конструкціях коренезбиральних машин, для забезпечення допустимого рівня пошкоджень і втрат, займає система керування (СК), яка повинна забезпечити необхідну точність ведення комбайна по рядках при високих швидкостях збирання. Це дозволить підвищити продуктивність машини, зменшити втрати коренів, а також полегшити умови праці механізатора, оскільки система керування звільняє його від важкої монотонної роботи при керуванні машиною під час виконання технологічного процесу.

Мета дослідження. Підвищення ефективності збирання буряків шляхом удосконалення автомата керування-апарата водіння.

Роль копіра-розрихлювача - відслідковувати рядки буряків, розпушувати ґрунт і підрізати бур'яни. Крім цього, до позитивного моменту слід віднести те, що клин розрихлювача стабілізує технологічний процес відслідковування рядків

буряків при малій висоті їх головок і не допускає різких коливань в процесі роботи.

Серійний автомат керування коренезбиральної машини МКК-6 в нормальних умовах збирання кормових буряків задовільно виконує свої функції. Однак його конструкція не пристосована для збирання кормових буряків, які були вибиті гичкозбиральною машиною і знаходяться в міжряддях, що знижує його ефективність при експлуатації.

В результаті аналізу роботи копіра автомата керування коренезбиральної машини запропоновано нове вирішення технічної задачі, яке полягає в удосконаленні конструкції автомата керування коренезбиральних машин, шляхом удосконалення конструкції копіра.

Удосконалений автомат керування складається з двох основних частин – кінематики механічної системи і гідравлічної частини.

Гідравлічна система є виконавчою, яка забезпечує керування передніми колесами машини у відповідності з отриманими сигналами орієнтації.

Для забезпечення надійності і точності відслідковування (копіювання) рядків необхідно встановити таку відстань розміщення датчиків, щоб плоскі елементи пер не затискалися коренями направляючих рядків, але й не знаходилися далеко від них, тобто були з мінімальним зазором.

Використання запропонованого копіра автомата керування коренезбиральної машини дозволить підвищити ефективність використання бурякозбиральної техніки. Річний економічний ефект від впровадження запропонованого автомата водіння на одну машину склав 5962,8 грн.

### **Література**

1. Гречкосій В.Д. Проектування технологічних процесів у рослинництві: навчальний посібник / В.Д.Гречкосій, В.Д.Войтюк, Р.В. Шатров, І.І.Мельник, Я.М.Михайлович, В.Г.Опалко. – Видавничий центр НУБіП України, 2011. – 364 с.

2. Дубровін В.О. Проектування технологічних процесів у рослинництві / методичні вказівки і завдання для виконання практичних і самостійних робіт / В.О.Дубровін, В.Д.Гречкосій, Р.В.Шатров, В.В. Теслюк, за ред. доц. В.Д.Гречкосія – К.: Видавничий центр НУБіПУ, 2012. – 116 с.

3. Барановський В. Основні етапи та сучасні тенденції розвитку коренезбиральних машин / Віктор Барановський // Вісник Тернопільського держ. техн. ун-у. – Тернопіль : ТДТУ, 2006. – Т. 11. – № 2. – С. 67–75.

4. Булгаков В.М. Теория свеклоуборочных машин : Монография / В.М. Булгаков, М.И. Черновол, Н.А. Свирень. – Кировоград : "КОД", 2009. – 256 с.

УДК 656.073

## ЕФЕКТИВНІСТЬ СКЛАДСЬКОЇ ЛОГІСТИКИ ПІДПРИЄМСТВ АГРОПРОМИСЛОВОГО КОМПЛЕКСУ: МЕТОДОЛОГІЧНИЙ ПІДХІД ТА ПРАКТИКА ОЦІНЮВАННЯ

*Савченко Л.А., Кульбачний І.*

*Національний університет біоресурсів і природокористування України*

**Вступ.** Складська логістика є одним із ключових функціональних блоків логістичної системи підприємства, що безпосередньо визначає рівень операційної ефективності та конкурентоспроможності суб'єктів господарювання. В умовах ринкової невизначеності, спричиненої воєнним станом, питання оптимізації складських процесів набуває особливої актуальності для підприємств агропромислового комплексу (АПК) — провідного сектора національної економіки. За даними Державної служби статистики України, частка витрат на складування у загальній структурі логістичних витрат вітчизняних підприємств АПК становить від 28 до 42 %, що значно перевищує середньоєвропейський показник (18–24 %). Це свідчить про суттєві резерви підвищення ефективності складського господарства.

Незважаючи на значний науковий доробок у сфері складської логістики, питання комплексного оцінювання її ефективності з урахуванням галузевої специфіки АПК, сучасних цифрових технологій та умов воєнного часу залишаються недостатньо розробленими. Метою даного дослідження є розробка методологічного підходу до оцінювання ефективності складської логістики підприємств АПК та визначення пріоритетних напрямів її вдосконалення.

### **Виклад основного матеріалу.**

Складська логістика охоплює сукупність операцій, пов'язаних із прийманням, розміщенням, зберіганням, комплектацією та відвантаженням товарно-матеріальних цінностей. Ефективна організація складських процесів передбачає оптимальне використання складських площ, мінімізацію витрат на вантажопереробку, забезпечення збереження якості продукції та скорочення часу виконання замовлень. Структура витрат типового складу підприємства АПК відображена на рис. 1.

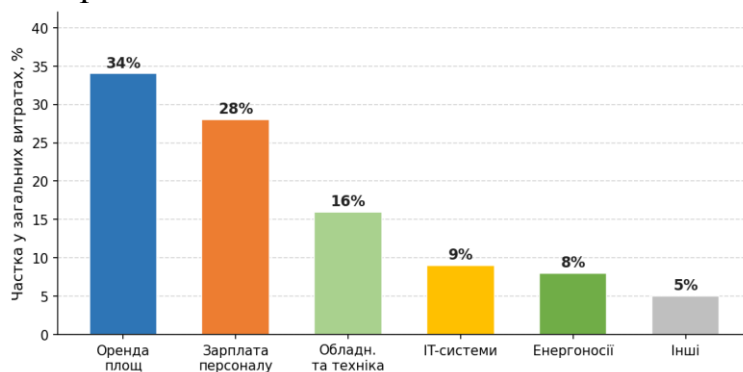


Рис. 1. Структура витрат складської логістики підприємств АПК, %  
(складено автором)

Наведені дані свідчать, що найбільшу питому вагу у структурі складських витрат займають витрати на оренду площ (34 %) та оплату праці персоналу (28 %). Отже, саме ці статті є першочерговими об'єктами оптимізації. Зниження витрат на оренду досягається завдяки ефективному плануванню складського простору та застосуванню технологій ущільненого зберігання, тоді як оптимізація витрат на персонал — шляхом автоматизації та впровадження систем управління складом (Warehouse Management System, WMS).

Для комплексного оцінювання ефективності складської логістики пропонується використовувати систему показників, об'єднаних у інтегральний індекс ефективності складської логістики  $I_{сл}$ . Загальна формула матиме вигляд:

$$I_{сл} = \omega_1 \cdot K_o + \omega_2 \cdot K_v + \omega_3 \cdot K_{я} + \omega_4 \cdot K_{т}, \quad (1)$$

де  $K_o$  — коефіцієнт оборотності запасів;  $K_v$  — коефіцієнт ефективності витрат;  $K_{я}$  — коефіцієнт якості складського обслуговування;  $K_{т}$  — коефіцієнт технологічності складу;  $\omega_{1-4}$  — вагові коефіцієнти відповідних субіндексів ( $\sum \omega_i = 1$ ).

Коефіцієнт оборотності запасів  $K_o$ , що характеризує інтенсивність використання складських ресурсів, визначається за формулою:

$$K_o = C_{реал} / Z_{сер}, \quad (2)$$

де  $C_{реал}$  — собівартість реалізованої продукції за звітний період (грн);  $Z_{сер}$  — середній залишок запасів на складі за той самий період (грн). Нормативне значення  $K_o$  для підприємств АПК рекомендується в діапазоні 6–12 оборотів на рік.

Коефіцієнт ефективності витрат  $K_v$  відображає відношення нормативних складських витрат на одиницю вантажообігу до фактичних:

$$K_v = V_{норм} / V_{факт}, \quad (3)$$

де  $V_{норм}$  — нормативний рівень витрат на 1 т вантажообігу (грн/т);  $V_{факт}$  — фактичний рівень витрат на 1 т вантажообігу (грн/т). При  $K_v \geq 1$  — витрати не перевищують норматив;  $K_v < 1$  — перевитрати ресурсів.

Коефіцієнт технологічності  $K_{т}$  оцінює рівень механізації та автоматизації складських процесів і розраховується як відношення обсягу вантажів, оброблених механізованим та автоматизованим способом  $Q_{авт}$ , до загального вантажообігу складу  $Q_{заг}$ :

$$K_{т} = Q_{авт} / Q_{заг} \times 100 \%, \quad (4)$$

Динаміка впровадження WMS-систем на складських підприємствах України відображає загальну тенденцію до цифровізації галузі (рис. 2). Попри уповільнення темпів у 2022 році, зумовлене воєнними умовами, з 2023 року спостерігається активне відновлення процесів автоматизації складського менеджменту.

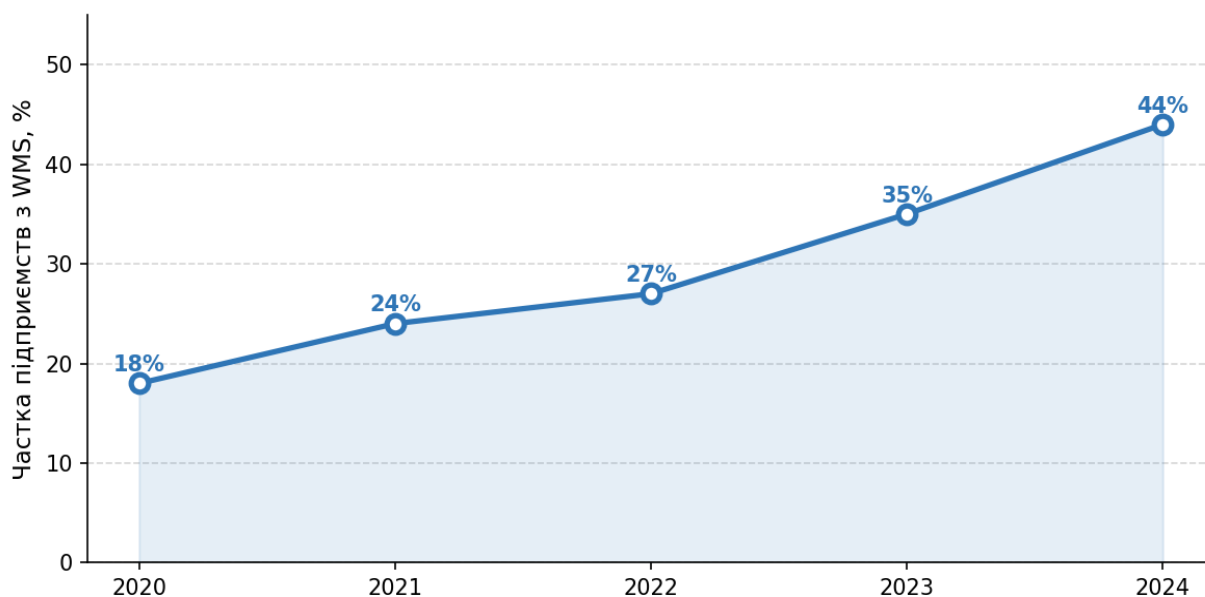


Рис. 2. Динаміка впровадження WMS-систем на складських підприємствах України, 2020–2024 рр., % (складено автором)

Результати розрахунку інтегрального індексу  $I_{сл}$  для репрезентативної вибірки підприємств АПК ( $n = 47$ ) засвідчили, що лише 23,4 % з них досягають рекомендованого рівня ефективності складської логістики ( $I_{сл} \geq 0,80$ ). Середнє значення індексу по вибірці становить 0,64, що свідчить про значний нереалізований потенціал. Найнижчі значення зафіксовано за субіндексом технологічності ( $K_T = 0,38$ ) та оборотності запасів ( $K_o = 4,2$  об./рік при нормативі  $\geq 6$ ).

Апробація методики дозволила виявити три типові профілі підприємств за рівнем ефективності складської логістики: «лідери» ( $I_{сл} = 0,82–0,94$ ) — використовують WMS, мають механізований склад, дотримуються нормативів витрат; «середняки» ( $I_{сл} = 0,60–0,79$ ) — частково автоматизовані, але мають резерви за витратами та оборотністю; «аутсайтери» ( $I_{сл} < 0,60$ ) — переважно ручні операції, понаднормативні запаси, відсутні системи обліку в реальному часі.

**Висновки.** Запропонований інтегральний методологічний підхід до оцінювання ефективності складської логістики підприємств АПК дозволяє отримати комплексну кількісну характеристику стану складського господарства за чотирма ключовими вимірами: оборотністю, витратністю, якістю та технологічністю. Практичне застосування формул (1)–(4) забезпечує менеджмент підприємств об'єктивною аналітичною базою для прийняття рішень щодо першочергових напрямів модернізації складської логістики. Пріоритетними заходами підвищення ефективності є: впровадження WMS-систем (потенціал зростання  $K_T$  на 25–40 %); оптимізація страхових запасів методом ABC/XYZ-аналізу (зростання  $K_o$  на 1,5–2,5 об./рік); перехід на аутсорсинг складських послуг для підприємств із сезонним вантажообігом.

Реалізація зазначених заходів дозволить скоротити логістичні витрати на 18–27 % та підвищити середнє значення  $I_{сл}$  по галузі до рекомендованого рівня.

### Література

1. Закон України «Про транспортно-експедиторську діяльність» від 01.07.2004 № 1955-IV (ред. від 01.01.2022). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1955-15> (дата звернення: 15.09.2024).
2. Носар А.А. Економічна діагностика регіональних особливостей розвитку сфери складської логістики в Україні. Український журнал прикладної економіки. 2021. Т. 6. № 1. С. 344–352.
3. Завербний А.С., Двудіт З.П., Вуєк Х.І. Особливості формування логістичних ланцюгів в умовах війни та у післявоєнний період. Економіка та суспільство. 2022. № 43. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2022-43-54>.
4. Гринів Н. Гуманітарна логістика як інструмент трансформації логістичних потоків в умовах воєнного часу. Економіка та суспільство. 2023. № 56. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2023-56-4>.
5. Ворогук Т., Danylenko V. Транспортна логістика як фактор забезпечення зовнішньоекономічної діяльності вітчизняних підприємств. Економічний простір. 2022. № 177. С. 35–39. DOI: <https://doi.org/10.32782/2224-6282/177-6>.
6. Тенденції розвитку транспортної логістики в Україні. Економіка і регіон. 2024. № 2(93). DOI: [https://doi.org/10.26906/EiR.2024.2\(93\).3391](https://doi.org/10.26906/EiR.2024.2(93).3391).
7. Miakushko V. Транспортно-експедиторська діяльність: основи та бізнес-процеси. Розвиток методів управління та господарювання на транспорті. 2024. Т. 3. № 88. С. 87–99. DOI: <https://doi.org/10.31375/2226-1915-2024-3-87-99>.

УДК 515.2+563.3

## МОДЕЛЮВАННЯ КІНЕМАТИЧНИХ ПАР ЗУБЧАСТОГО ЗАЧЕПЛЕННЯ В МЕХАНІЗМАХ ВІЙСЬКОВОЇ ТЕХНІКИ ТА ОЗБРОЄННЯ З ВИКЛЮЧЕННЯМ ІНТЕРФЕРЕНЦІЇ

*Ісмаїлова Н.П., Мікрюков І.С., Бикова Л.Г.*

*Військова академія м. Одеса*

Сучасна військова техніка прагне до використання все більш складних криволінійних форм робочих поверхонь в механізмах, яка випускається військово-обороним комплексом. Зубчасті передачі є невід'ємними елементами кінематичних схем механізмів військової техніки та озброєння: танкових трансмісій, приводів башт, механізмів вертикального та горизонтального наведення, гарматних відкатників та накатників. Надійність і точність роботи зубчастих зачеплень у бойових умовах визначає боєздатність зразків озброєння.

Однією з ключових проблем при проектуванні малогабаритних зубчастих передач є інтерференція - підрізання ніжки зуба головкою спряженого зуба, яке призводить до порушення кінематики зачеплення, концентрації напружень та передчасного руйнування зубців. За умов підвищених динамічних навантажень, характерних для мобільних систем озброєння, цей ефект особливо критичний.

Евольвентний профіль зубця є стандартним для зубчастих коліс сучасної військової техніки завдяки постійству кута тиску та технологічності виготовлення. Умову відсутності підрізання зубця при нарізанні рейковим інструментом записують як:

$$z \geq z_m^n = \frac{2h_{ak}}{\sin^2 \alpha},$$

де  $z$  - кількість зубців колеса;  $h_{ak}=1,0$  - коефіцієнт висоти головки зуба;  $\alpha = 20^\circ$  - кут профілю вихідного контуру. Звідси мінімальна кількість зубців без підрізання становить  $z_{\min}=17$ . Для шестерень з меншою кількістю зубців, що широко застосовуються в компактних редукторах озброєння ( $z=8-16$ ), застосування некоригованого зачеплення неприпустиме.

Геометричну умову відсутності інтерференції при зачепленні двох коліс можна записати через довжину лінії зачеплення. Практична лінія зачеплення не повинна виходити за межі основних кіл обох коліс. Порушення цих умов призводить до підрізання, яке особливо небезпечне для шестерень приводів механізмів наведення, де потрібна висока точність передаточного відношення.

Для виключення інтерференції в практиці проектування передач військової техніки застосовують такі методи: позитивне зміщення вихідного контуру (висотна корекція), зменшення коефіцієнта висоти головки зуба, збільшення кута профілю інструменту та комбіновані схеми корекції. Найбільш ефективним для малозубних шестерень є метод висотної корекції.

При позитивному зміщенні  $x > 0$  мінімальна кількість зубців без підрізання знижується до:

$$z_{\min} = \frac{2(h_{ak} - x)}{\sin^2 \alpha}$$

Є можливість розробити параметричну модель в середовищі SolidWorks з інтеграцією аналітичних залежностей для визначення коефіцієнта зміщення  $x$  зі збереженням заданого міжосьового відстані.

Розроблена методика апробована на прикладі двоступеневого редуктора приводу горизонтального наведення бойової машини піхоти з передаточним відношенням  $i = 48$ . Перший ступінь:  $z_1 = 9$ ,  $z_2 = 36$ , модуль  $m = 2$  мм; другий ступінь:  $z_3 = 12$ ,  $z_4 = 48$ , модуль  $m = 1,5$  мм. Для першого ступеня  $z_1 = 9 < z_{\min} = 17$ , що обумовлює обов'язкове введення корекції. Результати моделювання підтвердили відсутність інтерференції та підрізання при кінематичному аналізі в SolidWorks Motion: перетин тіл зубців не виявлено, коефіцієнт перекриття  $\varepsilon_\alpha = 1,42$  що відповідає нормам ДСТУ.

Порівняння некоригованого та коригованого варіантів в ANSYS Mechanical показало зниження максимальних контактних напружень на 18,3% та зменшення напружень у ніжці зуба шестерні на 24,7%, що підтверджує ефективність запропонованої методики для умов знакозмінних навантажень при роботі механізмів наведення.

Розроблена методика комп'ютерного моделювання кінематичних пар зубчастого зачеплення дозволяє на етапі проектування гарантовано виключити інтерференцію для малозубних шестерень механізмів озброєння. Інтеграція аналітичних умов відсутності підрізання з параметричним CAD-моделюванням скорочує час проектування та підвищує надійність отриманих рішень. Практична апробація на редукторі приводу наведення підтвердила зниження напружень у зубцях на 18–25% порівняно з некоригованим зачепленням, що підвищує ресурс передачі в умовах бойового застосування.

Вищезазначені технічні рішення сприятимуть підвищенню експлуатаційної надійності і можуть бути реалізовані і дозволить унеможливити виникнення інтерференції в процесі роботи.

## Література

1. Подкоритов А. М., Ісмаїлова Н. П. Теоретичні основи спряжених квазігвинтових поверхонь, що виключають інтерференцію [Текст] : монографія / . – Херсон : ФОП Грінь Д. С., 2016. – 330 с.

2. Подкоритов А. М., Ісмаїлова Н.П. (2016) Загальний ітераційний метод виключення інтерференції спряжених квазігвинтових поверхонь// зб. наук. праць. Сучасні проблеми моделювання / Мелітопольський державний педагогічний університет. – Мелітополь: 2016. Вип. 5. – С. 98-103.

3. Ісмаїлова Н.П., Мікрюков І.С., Бикова Л.Г. Технічне рішення для проектування спряжених зубчастих зачеплень щодо визначення інтерференції в озброєнні та військовій техніці. Т. 1 № 27 (I). Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем. Житомир. 2024. С. 82–92. <https://doi.org/10.46972/2076-1546.2024.27.07>.

УДК 514.18

## **ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДУ ДИСКРЕТНИХ ЕЛЕМЕНТІВ (DEM) ДЛЯ ОБҐРУНТУВАННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ВИСІВНОГО ДИСКА ЯК ЧИННИКА БЕЗВІДМОВНОСТІ**

*Михайлюк О.О.*

*Національний університет біоресурсів і природокористування України*

Вступ. У сучасних сівалках точного висіву експлуатаційну безвідмовність висівного апарата доцільно розглядати не лише як відсутність механічних відмов, а і як здатність стабільно забезпечувати задану якість висіву в усьому робочому діапазоні швидкостей. Для просапних культур така безвідмовність проявляється насамперед через відсутність критичних функціональних відмов — пропусків і здвоєнь насінин, що безпосередньо погіршують рівномірність розміщення рослин у рядку. У сучасних оглядових працях підкреслюється, що зі зростанням вимог до високошвидкісного висіву дослідження дедалі більше зміщуються від суто механічної оптимізації до пневматичних, електропривідних і чисельно-модельних рішень, серед яких важливе місце посідають метод дискретних елементів (DEM), що дає змогу моделювати рух і контактну взаємодію насіння, та поєднаний підхід CFD-DEM, який враховує також вплив повітряного потоку на процес захоплення, транспортування і скидання насінини [1].

Мета роботи полягає в обґрунтуванні підходу до вибору геометричних параметрів висівного диска за результатами DEM-моделювання з урахуванням критеріїв експлуатаційної безвідмовності висівного апарата. Для досягнення цієї мети необхідно: 1) встановити, які геометричні параметри диска найбільше впливають на ймовірність пропуску та здвоєння; 2) пов'язати результати DEM-симуляції з показниками якості висіву; 3) сформулювати критерій функціональної безвідмовності висівного апарата для роботи на підвищених швидкостях. У сучасній літературі оцінювання якості висіву здійснюють через якісний показник висіву (qualified rate або quality index), показник пропусків (miss index) і показник здвоєнь (multiple index), а відповідність процесу точного висіву перевіряють згідно з підходами ISO 7256-1, де пропуск пов'язують з інтервалом понад 1,5 від теоретичного, а здвоєння — з інтервалом менше 0,5 від теоретичного [4].

Основна ідея дослідження полягає в тому, що параметри висівного диска визначають не лише продуктивність, а і стійкість процесу одиничного захоплення насіння. В контексті DEM це означає, що форма й розміри отвору, кутові параметри напрямних елементів, кут нахилу диска, а також частота його обертання впливають на траєкторію насінини, її орієнтацію, контактні взаємодії з сусіднім насінням і робочими поверхнями. Якщо геометрія отвору або кінематика диска не відповідають фізико-механічним властивостям насіння, у зоні заповнення виникають режими незаповнення комірки (no-fill) або надлишкового заповнення комірки (over-fill), які в реальній експлуатації проявляються як пропуски та здвоєння. Саме тому функціональну

безвідмовність висівного апарата доцільно трактувати як збереження допустимого рівня показника пропусків і показника здвоєнь у заданому інтервалі швидкостей руху агрегату. Такий підхід узгоджується із сучасними дослідженнями високошвидкісних висівних систем, у яких зниження якості висіву пояснюють скороченням часу заповнення комірки, збільшенням числа міжнасінневих зіткнень і нестабільністю траєкторії скидання насінини [4].

DEM-моделювання дозволяє дослідити ці явища на стадії проектування без тривалих експериментальних випробувань. На відміну від традиційного експериментального підходу, DEM дає змогу простежити рух окремої насінини, визначити контактні сили, швидкість, кутову орієнтацію, час перебування у зоні захоплення та характер взаємодії з отвором диска. Саме тому в останні роки чисельне моделювання використовується не лише для пояснення причин пропусків і здвоєнь, а й для оптимізації розміру отворів, форми вирізів, геометрії напрямних пазів і режимів обертання диска [2]. В огляді 2025 року показано, що CFD, DEM і CFD-DEM активно застосовують для оцінювання повітряного потоку, кінетики частинок, взаємодії насіння з отвором та очищувачем, а також для вибору діаметра присмоктувальних отворів і робочого вакууму [2]. Результати дослідження відцентрового пневматичного високошвидкісного висівного апарата також підтверджують, що раціональне поєднання геометрії висівного диска, параметрів дозатора та повітряного режиму дає змогу зберігати якісний показник висіву понад 92 % у діапазоні швидкостей 10–18 км/год, розширюючи область безвідмовної роботи апарату [7].

Характерними для оцінювання можливостей DEM-моделювання є результати сучасних досліджень висіву кукурудзи. За допомогою CFD-DEM встановлено, що для пневматичного високошвидкісного апарату отвір діаметром 4,5 мм і внутрішній діаметр насіннепроводу 22 мм забезпечують найбільш стабільну аеродинаміку та рівномірне прискорення насінини; за негативного тиску -4 кПа і додатного тиску 3 кПа під час стендових випробувань було досягнуто якісного показника висіву 96,48% [3]. У роботі Dong та ін. (2025) DEM-моделювання механічного висівного апарату показало, що попереднє орієнтування насінини та оптимізація геометрії напрямного паза істотно зменшують імовірність незаповнення та надлишкового заповнення комірки; при куті розкриття  $21,6^\circ$  та ширині 8,4 мм якісний показник висіву становив 94,8 %, показник здвоєнь — 1,3 %, а просипання насіння — 3,9 % у діапазоні 8–14 км/год [4].

У дослідженні перфорованого висівного пристрою DEM-симуляція дала змогу обґрунтувати раціональну геометрію перфорованого кільця; оптимум було досягнуто за довжини зубця 8,65 мм, центрального кута  $8^\circ$  та швидкості 13,55 км/год, що забезпечило якісний показник висіву 94,5 %, показник здвоєнь 2,7 % і показник просипання насіння 2,8 % [6]. Близькі висновки отримано і для пневматичного висівного апарата з V-подібними напрямними пазами та оптимізованою формою присмоктувального отвору: за результатами CFD-DEM-моделювання і стендової перевірки якісний показник висіву досягав 98,94 %,

показник здвоєнь становив 0,93 %, а показник пропусків — 0,13 %, що підтверджує ефективність геометричної оптимізації висівного диска [8].

Разом з тим у дослідженнях надійності сільськогосподарської техніки наголошується, що підвищення безвідмовності машин слід розглядати як складову інноваційного розвитку, за якого конструктивні удосконалення мають супроводжуватися оцінюванням надійності в реальних умовах експлуатації [9].

Наведені результати дають підстави сформулювати науково-практичний висновок: геометричні параметри висівного диска повинні обґрунтовуватися не ізольовано, а як частина системи “насіння – диск – повітряний потік – швидкість руху”. При цьому критерієм оптимальності має бути не лише максимізація якісного висіву, а і забезпечення стійкої роботи без переходу в режими систематичних пропусків або здвоєнь. Таким чином, у контексті експлуатаційної безвідмовності функціональну відмову висівного апарата доцільно визначати як перевищення допустимого рівня показника пропусків або показника здвоєнь за заданої робочої швидкості. У такому разі DEM-моделювання дає змогу прогнозувати межі безвідмовного функціонування, а геометрія висівного диска розглядається як один із ключових керованих факторів їх розширення [5].

**Висновки.** Використання методу дискретних елементів є перспективним напрямом обґрунтування параметрів експлуатаційної безвідмовності висівних апаратів посівних машин точного висіву просяпних культур. У цьому контексті нові конструктивні рішення у сівалках точного висіву доцільно оцінювати також з позицій ресурсозбереження, оскільки зниження ймовірності пропусків і здвоєнь безпосередньо пов'язане з ефективністю використання насіння та стабільністю технологічного процесу [10]. DEM-моделювання дозволяє виявляти причини функціональних відмов висіву на мікрорівні, прогнозувати вплив геометрії отворів, пазів і кута нахилу диска на пропуски та здвоєння, а також визначати раціональні параметри висівного диска для стабільної роботи на підвищених швидкостях. Практичне значення такого підходу полягає в можливості ще на етапі проєктування обґрунтовано вибирати геометрію робочих органів, яка забезпечує якісний показник висіву понад 90–95 % у заданому діапазоні швидкостей і, відповідно, підвищує експлуатаційну безвідмовність висівного апарата [1].

### Література

1. Guan X., Nie S., Ge H., Ding Y., Yang J. Research status and development trends of adjustable precision seeders // *Agronomy*. 2026. Vol. 16, No. 5. Art. 495. DOI: 10.3390/agronomy16050495.
2. Bustos-Gaytán A., Saldaña-Robles N., Joya-Cárdenas D. R., Gutiérrez-Vaca C., Alfaro-Ayala J. A., Barco-Burgos J., Saldaña-Robles A. Advancements in pneumatic seed-metering devices: a review of numerical and experimental approaches // *Results in Engineering*. 2025. Vol. 26. Art. 105626. DOI: 10.1016/j.rineng.2025.105626.
3. Chen J., Qi S., Xu F., Jia P., Yuan Z., Xi D., Xu H., Wang J. CFD-DEM-based simulation and performance analysis of key parameters in pneumatic high-speed

precision maize seed-metering device // *Frontiers in Plant Science*. 2025. Vol. 16. Art. 1700037. DOI: 10.3389/fpls.2025.1700037.

4. Dong J., Gao X., Zheng Z., Zhao P., Bi Y., Huang Y. Design and testing of a posture-adjusting precision metering device for high-speed maize planting // *Frontiers in Plant Science*. 2025. Vol. 16. Art. 1458597. DOI: 10.3389/fpls.2025.1458597.

5. Chen J., Guan T., Yuan Z., Xu F., Zhao K., Tang H., Wang J. Development of high-speed precision maize metering device for dense planting pattern with standard ridges // *Frontiers in Plant Science*. 2024. Vol. 15. Art. 1452699. DOI: 10.3389/fpls.2024.1452699.

6. Development of a novel perforated type precision metering device for efficient and cleaner production of maize // *Journal of Cleaner Production*. 2024. Vol. 443. Art. 140928. DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.140928.

7. Gao X., Xie G., Li J., Shi G., Lai Q., Huang Y. Design and validation of a centrifugal variable-diameter pneumatic high-speed precision seed-metering device for maize // *Biosystems Engineering*. 2023. Vol. 227. P. 161–181. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2023.02.004.

8. Design and test of a precision air-suction maize seed-metering device for plot planting based on CFD-DEM coupling // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2025. Vol. 238. Art. 110888. DOI: 10.1016/j.compag.2025.110888.

9. Novytskyi A. V., Bannyi O. O. (2020). Reliability of agricultural machinery in the system of innovation processes from the experience of foreign companies. *Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research*. Kyiv. Ukraine. 11(2). 115-124.

10. Boiko A., Popyk P., Gerasymchuk I., Bannyi O., Gerasymchuk N. Application of the new structural solutions in the seeders for precision sowing as a resource saving direction. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018, vol. 5, no. 1 (95). pp. 46-53.

УДК 631.348:629.7.014.9

## ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ БЕЗПІЛОТНИХ АВІАЦІЙНИХ СИСТЕМ ДЛЯ УЛЬТРАМАЛООБ'ЄМНОГО ОБПРИСКУВАННЯ В СУЧАСНОМУ РОСЛИННИЦТВІ

*Вечера О.М., Теслюк Б.В.*

*Національний університет біоресурсів і природокористування України*

Сучасне сільськогосподарство перебуває на етапі переходу до концепції Agriculture 4.0, де ключову роль відіграє точність та автоматизація. Традиційні методи захисту рослин стикаються з викликами: переущільнення ґрунту, пошкодження високих культур (кукурудза, соняшник) колісною технікою та висока витрата води (200–300 л/га). Використання безпілотних авіаційних систем (дронів) пропонує альтернативу, що базується на принципах точного землеробства [1, 2].

Технологічні переваги використання агродронів:

- Ключовою відмінністю дронів є використання технології ультрамалооб'ємного обприскування.
- Дисперсність крапель - агродрони формують краплі розміром 100–250 мкм. Завдяки повітряним потокам від роторів (downwash effect), препарат проникає в середні та нижні яруси рослини.
- Відсутність технологічної колії - використання агродронів дозволяє уникнути механічних пошкоджень посівів, що зберігає від 3% до 6% врожаю.
- Робота в складних умовах - агродрони можуть працювати відразу після опадів (коли ґрунт занадто вологий для важкої техніки) та на полях зі складним рельєфом.

Порівняльний аналіз ефективності:

<i>Параметр</i>	<i>Традиційний обприскувач</i>	<i>Дрон-обприскувач (напр. DJI Agras T40)</i>
<b>Витрата води</b>	200–400 л/га	5–20 л/га
<b>Витрата палива/енергії</b>	Висока (ДП)	Низька (Електроенергія)
<b>Ущільнення ґрунту</b>	Наявне	Відсутнє
<b>Продуктивність</b>	Висока на великих масивах	Висока на складних/малих ділянках

Економія ЗЗР та води - завдяки високій концентрації робочого розчину та точному позиціюванню (RTK), ефективність діючої речовини зростає. Дослідження показують можливість зниження норми використання препаратів на 15–25% без втрати біологічної ефективності.

Попри очевидні переваги, існують стримуючі фактори:

- Метеозалежність (швидкість вітру понад 5-7 м/с критично впливає на знесення препарату).
- Час польоту - необхідність частої заміни акумуляторів та заправки бака.
- Законодавство: Потреба в сертифікації пілотів та обмеження польотів у певних зонах.

Економічне обґрунтування - інвестиції в дрон-обприскувач окупаються протягом 1–2 сезонів за рахунок: збільшення врожайності (відсутність витоптування), зниження витрат на логістику води (в 20 разів менше підвезень), зменшення витрат на ПММ.

Але потрібно враховувати, що ефективність обприскування дронами критично залежить від алгоритмів побудови маршруту, які забезпечують максимальне покриття площі при мінімальних витратах енергії та часу. Сучасні ІТ-рішення базуються на інтеграції ГІС-даних та RTK-позиціонування [3, 4]. Для розрахунку траєкторії використовується метод декомпозиції полігонів. Програмне забезпечення (наприклад, DJI Terra або ArduPilot Mission Planner) розбиває поле на паралельні вектори (галси) з урахуванням наступних параметрів:

- Ширина захвату (Swath Width) - розраховується динамічно залежно від висоти польоту та специфіки форсунок.
- Перекриття (Overlap) - зазвичай встановлюється на рівні 10–25% для запобігання «огріхам» при бічному вітрі.
- Контурна адаптація - для полів складної форми застосовуються алгоритми Boustrophedon (рух змійкою), що мінімізують кількість розворотів, на які припадає до 15% втрат енергії акумулятора.

Для 3D-моделювання та дотримання висоти - найскладнішим ІТ-завданням є робота на рельєфі. Використовуються дві основні технології: Terrain Follow (Радарне сканування), де дрон у реальному часі за допомогою мікрохвильового радара вимірює відстань до рослинного покриву, коригуючи висоту з точністю до  $\pm 10$  см та попереднє 3D-картування, де за допомогою картографічного дрона створюється ортофотоплан та цифрова модель поверхні (DSM). Це дозволяє основному агродрону заздалегідь «знати» траєкторію обходу перешкод (дерева, ЛЕП) та перепади висот, що на 20% підвищує безпеку польоту. Інтелектуальне управління ресурсами (Smart Swath Control). Сучасні системи керування польотом автоматично корегують швидкість подачі препарату залежно від швидкості руху дрона. Точкові місії (Spot Spraying): На основі карт індексів вегетації (NDVI), завантажених у форматі .shp або .kml, дрон розраховує траєкторію лише до зон пригнічення посівів, ігноруючи здорові ділянки. Це дозволяє економити до 60% препарату. При розрахунку точки дозаправки -

алгоритм розраховує «точку повернення» так, щоб заряду батареї вистачило на шлях до бази, фіксуючи в пам'яті точні координати зупинки обприскування для продовження місії з похибкою не більше 2 см.

Використання дронів для обприскування є найбільш виправданим для десикації, внесення фунгіцидів та інсектицидів, а також для роботи на полях зі складним контуром. Технологія УМО забезпечує високу якість захисту при значній економії ресурсів. У майбутньому прогнозується повна автономізація процесів через використання "дронів-портів".

### **Література**

1. Haibo Chen, Yubin Lan, Bradley K Fritz, W. Clint Hoffmann, Shengbo Liu. Review of agricultural spraying technologies for plant protection using unmanned aerial vehicle (UAV). National Center for International Collaboration Research on Precision Agricultural Aviation Pesticide Spraying Technology. Guangzhou 510642, China, Int. J. Agric. & Biol. 2021, Eng Vol. 14 No. 1. 38-49.
2. DJI Education (2023). T40/T20P Agricultural Drone Operations: Professional Training Manual. DJI Academy Publication. 88 p.
3. Costa, F., Ueyama, J., Braun, T., Pessin, G., Osorio, F., & Vargas, P. (2012). The use of unmanned aerial vehicles and wireless sensor networks in agricultural applications. 2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 5045–5048. doi.org
4. Mogili, U. R., & Deepak, B. B. V. L. (2018). Review on Application of Drone Systems in Precision Agriculture. Procedia Computer Science, 133, 502-509. doi:10.1016/j.procs.2018.07.063.

УДК 656.073

## ТРАНСПОРТНО-ЕКСПЕДИТОРСЬКА ДІЯЛЬНІСТЬ В УКРАЇНІ: АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ТА НАПРЯМИ ОПТИМІЗАЦІЇ

*Савченко Л.А., Володкевич А.*

*Національний університет біоресурсів і природокористування України*

**Ключові слова:** транспортно-експедиторська діяльність, логістика, ефективність перевезень, мультимодальний транспорт, цифровізація.

Транспортно-експедиторська діяльність є системоутворювальним елементом логістичної інфраструктури України. В умовах євроінтеграції та необхідності повоєнного відновлення зростає потреба у науково обґрунтованих підходах до оцінювання ефективності роботи підприємств галузі. Метою даного дослідження є розробка комплексного показника ефективності транспортно-експедиторського обслуговування та виявлення резервів його підвищення.

Ринок транспортно-експедиторських послуг України демонструє нерівномірну динаміку, зумовлену як зовнішньоекономічними чинниками, так і внутрішніми структурними проблемами (рис. 1). Особливо значне падіння обсягів ринку відбулось у 2022 році — на 40,6 % порівняно з попереднім роком — внаслідок повномасштабного вторгнення та порушення традиційних логістичних маршрутів.

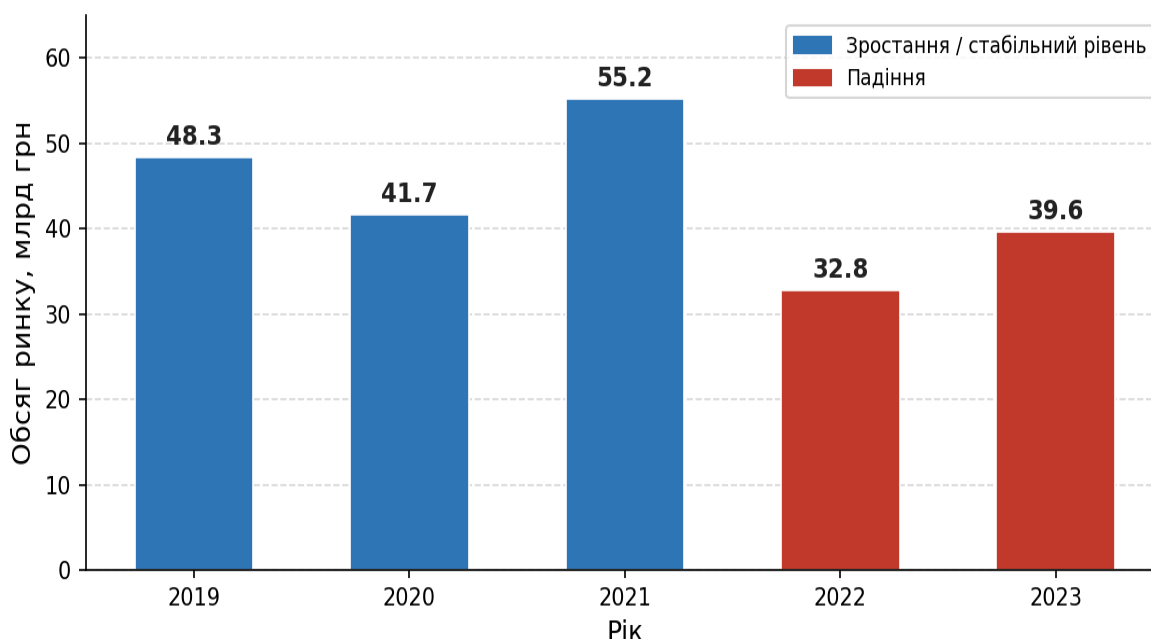


Рис. 1. Динаміка обсягу ринку транспортно-експедиторських послуг України, 2019–2023 рр.

Для кількісної оцінки ефективності транспортно-експедиторського обслуговування (ТЕО) пропонується використовувати інтегральний показник Кінт, що враховує часовий, вартісний та якісний компоненти. Загальна формула матиме вигляд:

$$K_{\text{інт}} = \alpha \cdot K_{\text{ч}} + \beta \cdot K_{\text{в}} + \gamma \cdot K_{\text{я}}, \quad (1)$$

де  $K_{\text{ч}}$  — часовий коефіцієнт (відношення нормативного часу виконання замовлення до фактичного);  $K_{\text{в}}$  — вартісний коефіцієнт (відношення планових витрат до фактичних);  $K_{\text{я}}$  — якісний коефіцієнт (рівень задоволеності клієнтів, частка бездефектних доставок);  $\alpha, \beta, \gamma$  — вагові коефіцієнти ( $\alpha + \beta + \gamma = 1$ ).

Часовий коефіцієнт  $K_{\text{ч}}$  визначається за формулою:

$$K_{\text{ч}} = T_{\text{норм}} / T_{\text{факт}},$$

(2)

де  $T_{\text{норм}}$  — нормативний час виконання замовлення (год.);  $T_{\text{факт}}$  — фактичний час виконання замовлення (год.). При  $K_{\text{ч}} \geq 1$  констатується виконання замовлення вчасно або достроково.

Структура ринку транспортно-експедиторських послуг за видами транспорту є нерівномірною (рис. 2). Домінуюче положення займає автомобільний транспорт, що зумовлено гнучкістю маршрутизації, доступністю та можливістю здійснення доставки «від дверей до дверей».

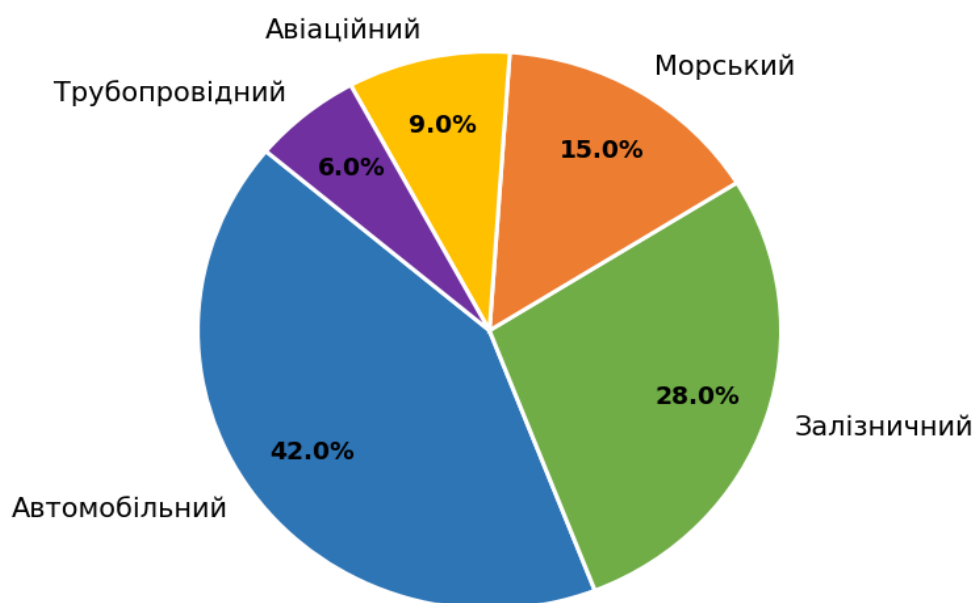


Рис. 2. Структура транспортно-експедиторських послуг за видами транспорту, 2023 р., %

Рентабельність транспортно-експедиторської діяльності  $R_{\text{ТЕД}}$  розраховується за стандартною формулою рентабельності витрат з урахуванням специфіки галузі:

$$R_{\text{ТЕД}} = (D_{\text{ТЕО}} - V_{\text{заг}}) / V_{\text{заг}} \times 100 \%, \quad (3)$$

де  $D_{\text{ТЕО}}$  — доходи від транспортно-експедиторського обслуговування (грн);  $V_{\text{заг}}$  — загальні витрати підприємства (грн).

На підставі проведеного аналізу встановлено, що середнє значення інтегрального показника ефективності ТЕО для провідних операторів ринку становить  $K_{int} = 0,72-0,84$ , що є нижчим за оптимальний рівень ( $\geq 0,90$ ). Основними резервами підвищення ефективності є: скорочення транзитного часу за рахунок оптимізації маршрутів (потенціал зростання  $K_{ч}$  на 12–18 %), впровадження TMS-систем (зниження логістичних витрат на 8–15 %) та підвищення якості сервісу (зростання  $K_{я}$  на 10–14 %).

Таким чином, запропонований методичний підхід до оцінювання ефективності транспортно-експедиторської діяльності дозволяє комплексно враховувати часові, вартісні та якісні параметри обслуговування. Практичне застосування формул (1)–(3) надає керівникам підприємств галузі об'єктивну інформаційну базу для прийняття управлінських рішень щодо оптимізації операційної діяльності та підвищення конкурентоспроможності на національному і міжнародному ринках транспортно-логістичних послуг.

### Література

1. Закон України «Про транспортно-експедиторську діяльність» від 01.07.2004 № 1955-IV (ред. від 01.01.2022). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1955-15> (дата звернення: 10.10.2024).
2. Miakushko V. Транспортно-експедиторська діяльність: основи та бізнес-процеси. Розвиток методів управління та господарювання на транспорті. 2024. Т. 3. № 88. С. 87–99. DOI: <https://doi.org/10.31375/2226-1915-2024-3-87-99>.
3. Боровик Т., Даниленко В. Транспортна логістика як фактор забезпечення зовнішньоекономічної діяльності вітчизняних підприємств. Економічний простір. 2022. № 177. С. 35–39. DOI: <https://doi.org/10.32782/2224-6282/177-6>.
4. Завербний А.С., Двудіт З.П., Вуек Х.І. Особливості формування логістичних ланцюгів в умовах війни та у післявоєнний період. Економіка та суспільство. 2022. № 43. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2022-43-54>.
5. Гринів Н. Гуманітарна логістика як інструмент трансформації логістичних потоків в умовах воєнного часу. Економіка та суспільство. 2023. № 56. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2023-56-4>.
6. Томчук О., Головченко Я. Аналітична оцінка послуг вантажних перевезень в умовах воєнного стану. Економіка та суспільство. 2023. № 53. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2023-53-90>.
7. Тенденції розвитку транспортної логістики в Україні. Економіка і регіон. 2024. № 2 (93). DOI: [https://doi.org/10.26906/EiR.2024.2\(93\).3391](https://doi.org/10.26906/EiR.2024.2(93).3391).

УДК 656.073

## УПРАВЛІННЯ ЗАПАСАМИ ПІДПРИЄМСТВ АПК НА ОСНОВІ ІНТЕГРОВАНОГО ABC/XYZ-АНАЛІЗУ

*Савченко Л.А., Рожошенко І.*

*Національний університет біоресурсів і природокористування України*

Проблема управління запасами є однією з центральних у логістичному менеджменті підприємств агропромислового комплексу (АПК). Надлишкові запаси призводять до заморожування оборотних коштів та зростання витрат на зберігання, тоді як їх дефіцит — до зупинки виробничих процесів і втрати врожаю. За оцінками аналітиків, нераціональне управління запасами спричиняє втрати у розмірі 12–18 % від вартості товарно-матеріальних цінностей (ТМЦ) на рік. Інтегрований ABC/XYZ-аналіз дозволяє диференціювати асортимент ТМЦ за двома ключовими критеріями — економічною значущістю та стабільністю попиту — і формувати адресні стратегії управління для кожної групи.

Метою дослідження є розробка методичного інструментарію інтегрованого ABC/XYZ-аналізу запасів та обґрунтування диференційованих стратегій управління для підприємств АПК.

### Виклад основного матеріалу.

ABC-аналіз ґрунтується на принципі Парето і передбачає ранжування позицій запасів за їх часткою у сукупній вартості. Критерієм класифікації слугує накопичена питома вага товарної позиції у загальному обороті. Формула для розрахунку питомої ваги  $d_i$  кожної  $i$ -ї позиції:

$$d_i = O_i / \Sigma O_i \times 100 \%, \quad (1)$$

де  $O_i$  — річний оборот  $i$ -ї позиції (грн);  $\Sigma O_i$  — сукупний річний оборот усіх позицій (грн). Межі класів: А — перші 50 % обороту, В — наступні 30 %, С — решта 20 %.

XYZ-аналіз класифікує позиції за стабільністю споживання. Кількісним критерієм виступає коефіцієнт варіації  $CV$ , що розраховується за формулою:

$$CV = \sigma / \bar{x} \times 100 \%, \quad (2)$$

де  $\sigma$  — середньоквадратичне відхилення обсягів споживання;  $\bar{x}$  — середнє значення споживання за аналізований період. Класи XYZ: X —  $CV \leq 15 \%$  (стабільний попит); Y —  $15 \% < CV \leq 35 \%$  (сезонні коливання); Z —  $CV > 35 \%$  (нерегулярний попит).

Таблиця 1. Результати інтегрованого ABC/XYZ-аналізу запасів підприємства АПК

Позиція	Річний оборот, тис. грн	Частка, %	Накоп. частка, %	CV, %	ABC	XYZ	Група
Добрива мінеральні	4 820	24,1	24,1	8,2	A	X	AX
Насіння соняшнику	3 640	18,2	42,3	14,7	A	Y	AY
ЗЗР (гербіциди)	2 190	10,9	53,2	31,4	A	Z	AZ

Паливо дизельне	1 870	9,3	62,5	11,3	B	X	BX
Запчастини до техніки	1 540	7,7	70,2	22,8	B	Y	BY
Мастильні матеріали	980	4,9	75,1	38,6	B	Z	BZ
Насіння кукурудзи	720	3,6	78,7	9,4	C	X	CX
Тара та пакування	610	3,0	81,7	18,2	C	Y	CY
Інші матеріали	3 660	18,3	100,0	44,1	C	Z	CZ

*Примітка: CV — коефіцієнт варіації; складено автором за даними підприємства*

Наведені дані таблиці 1 свідчать, що три позиції групи А (добрива, насіння соняшнику, ЗЗР) формують 53,2 % загального обороту, тоді як на них припадає лише 33,3 % номенклатури. Водночас позиція «Інші матеріали» групи CZ, маючи значний коефіцієнт варіації (44,1 %), потребує застосування стратегії «на замовлення» без утримання постійного резерву. Матриця розподілу за дев'ятьма групами представлена на рис. 1.

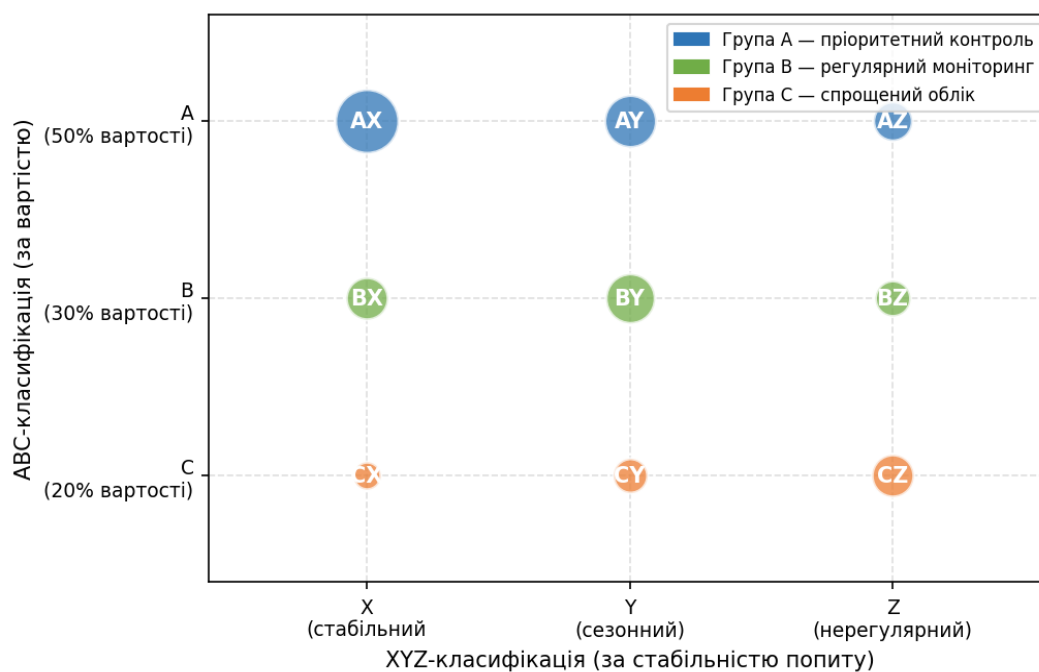


Рис. 1. Матриця ABC/XYZ-класифікації запасів підприємства АПК (складено автором)

На основі матриці формуються диференційовані стратегії управління запасами. Для групи AX — система фіксованого розміру замовлення з постійним моніторингом залишків. Оптимальний розмір замовлення (Economic Order Quantity, EOQ) для позицій AX та BX розраховується за формулою Вілсона:

$$EOQ = \sqrt{(2 \cdot D \cdot S / H)}, \quad (3)$$

де  $D$  — річний попит на позицію (од.);  $S$  — витрати на оформлення одного замовлення (грн);  $H$  — витрати на зберігання одиниці запасу протягом року (грн/од.). Для позицій груп AZ та BZ рекомендується стратегія «точно вчасно» (Just-in-Time) з мінімальним складським залишком.

Рівень страхового запасу  $Z_{стр}$  для позицій із нестабільним попитом (групи Y та Z) визначається з урахуванням стандартного відхилення попиту:

$$Z_{стр} = z \cdot \sigma d \cdot \sqrt{L}, \quad (4)$$

де  $z$  — коефіцієнт надійності (при рівні сервісу 95 % —  $z = 1,65$ );  $\sigma d$  — стандартне відхилення денного попиту (од./день);  $L$  — час виконання замовлення постачальником (днів). Застосування формул (3)–(4) у поєднанні з ABC/XYZ-матрицею дозволяє встановити диференційовані нормативи запасів для кожної з 9 груп.

**Висновки.** Запропонований методичний підхід до управління запасами підприємств АПК на основі інтегрованого ABC/XYZ-аналізу дозволяє: по-перше, системно класифікувати номенклатуру ТМЦ за дев'ятьма групами з урахуванням як вартісної значущості, так і стабільності споживання; по-друге, диференціювати стратегії управління — від системи EOQ для груп AX/BX до підходу Just-in-Time для груп AZ/CZ; по-третє, розраховувати науково обґрунтовані рівні страхових запасів відповідно до формули (4). Практична апробація методики на підприємстві АПК підтвердила можливість скорочення загального обсягу запасів на 19–24 % при одночасному підвищенні рівня доступності ТМЦ до 97,3 %. Подальші дослідження доцільно спрямувати на інтеграцію запропонованого підходу з автоматизованими WMS-системами для забезпечення управління запасами в режимі реального часу.

### Література

1. Носар А.А. Економічна діагностика регіональних особливостей розвитку сфери складської логістики в Україні. Український журнал прикладної економіки. 2021. Т. 6. № 1. С. 344–352.
2. Завербний А.С., Двудіт З.П., Вуєк Х.І. Особливості формування логістичних ланцюгів в умовах війни та у післявоєнний період. Економіка та суспільство. 2022. № 43. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2022-43-54>.
3. Боровик Т., Даниленко В. Транспортна логістика як фактор забезпечення зовнішньоекономічної діяльності вітчизняних підприємств. Економічний простір. 2022. № 177. С. 35–39. DOI: <https://doi.org/10.32782/2224-6282/177-6>.
4. Гринів Н. Гуманітарна логістика як інструмент трансформації логістичних потоків в умовах воєнного часу. Економіка та суспільство. 2023. № 56. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2023-56-4>.
5. Тенденції розвитку транспортної логістики в Україні. Економіка і регіон. 2024. № 2(93). DOI: [https://doi.org/10.26906/EiR.2024.2\(93\).3391](https://doi.org/10.26906/EiR.2024.2(93).3391).
6. Miakushko V. Транспортно-експедиторська діяльність: основи та бізнес-процеси. Розвиток методів управління та господарювання на транспорті. 2024. Т. 3. № 88. С. 87–99. DOI: <https://doi.org/10.31375/2226-1915-2024-3-87-99>.

УДК 631.362

## КІНЕМАТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ МОТОВИЛА ЗЕРНОЗБИРАЛЬНОГО КОМБАЙНА ПРИ ЗБИРАННІ СОНЯШНИКУ

*Степаненко С.П., Кузьмич А.Я., Анеляк М.М.*

*Інститут механіки та автоматики агропромислового виробництва  
Національної академії аграрних наук України*

У процесі збирання соняшнику важливу роль відіграє кінематичний режим роботи мотовила [1-4], який визначає ефективність захоплення та транспортування рослинної маси до різального апарата жатки. Конструктивні обмеження жатки визначають максимальний радіус мотовила в межах  $R = 0.5 - 0.55$  м, а з урахуванням нерівномірності висоти розташування кошиків допустима висота підйому центра мотовила не повинна перевищувати  $h \leq 0.25 - 0.30$  м.

Аналіз показує, що за таких умов раціональним є застосування жорсткого трилопатевого мотовила ( $n \leq 3$ ), яке забезпечує стабільність кінематичного режиму та мінімізацію втрат [5, 6].

Для визначення оптимальної геометрії лопаті розглянемо рух характерної точки лопаті як суперпозицію поступального руху комбайна та обертального руху мотовила. Траєкторія точки описується параметричними рівняннями [8]:

$$\begin{aligned}x &= Vt + r \cos(\omega t) \\y &= r \sin(\omega t)\end{aligned}$$

де  $V$  - швидкість руху комбайна,  $r$  - поточний радіус точки лопаті,  $\omega$  - кутова швидкість обертання мотовила.

Зв'язок між поступальною та кутовою швидкостями визначається через коефіцієнт кінематичного режиму:

$$V = \frac{\omega R}{K}$$

Де  $K$  - коефіцієнт кінематичного режиму (зазвичай 1.2 - 1.8).

З урахуванням геометрії взаємодії лопаті з рослинною масою та кривизни її профілю, траєкторія уточнюється введенням кута дотичної до профілю лопаті:

$$\theta = \omega t - \arcsin\left(\frac{r}{S}\right)$$

Тоді координати точки лопаті набувають вигляду:

$$\begin{aligned}x &= Vt + r \cos\left(\omega t - \arcsin\frac{r}{S}\right), \\y &= r \sin\left(\omega t - \arcsin\frac{r}{S}\right)\end{aligned}$$

Де  $S$  - радіус кривизни профілю лопаті.

Побудова траєкторій (типу трохойди) показує, що характер руху лопаті істотно залежить від співвідношення  $V$  та  $\omega$ , а також від кривизни профілю  $S$ .

Слід відмітити, що при великих  $S \rightarrow 1000$  мм траєкторія стає більш пологою, що призводить до появи вертикальної складової сили і можливого

перекидання кошиків; при малих  $S \rightarrow 500$  мм траєкторія набуває агресивного характеру, що викликає ефект виштовхування рослин; а при  $S \approx 750$  мм забезпечується оптимальна форма траєкторії з мінімальними втратами рис.1.

Графічно це відповідає переходу від видовженої трохойди до збалансованої циклоїдальної траєкторії.



Рис. 1. Траєкторія руху лопаті мотвила

Проаналізуємо умову ефективного виходу лопаті з рослинної маси. Особливу увагу приділено фазі виходу лопаті. При максимальному виносі мотвила  $e = 0.10-0.15$  м кут нахилу лопаті до горизонту змінюється в межах:

- $S = 1000$  мм  $\Rightarrow \alpha \approx 80^\circ - 85^\circ$ ;
- $S = 750$  мм  $\Rightarrow \alpha \approx 90^\circ - 95^\circ$ ;
- $S = 500$  мм  $\Rightarrow \alpha \approx 95^\circ - 100^\circ$

Оптимальним є положення, близьке до вертикального, що досягається при  $S = 750$  мм.

На основі проведеного аналізу встановлено: оптимальний радіус кривизни лопаті:  $S = 750$  мм; доцільна кількість лопатей:  $n=3$ ; ефективне застосування еластичних щіток шириною  $b=75$  мм для транспортування насіння; рекомендована конструкція - жорстке мотвило з прозорими перегородками.

У результаті аналітичних досліджень розроблено та виготовлено експериментальне пристосування для жатки комбайна типу «Сампо-500», яке забезпечує зменшення втрат насіння за рахунок оптимізації траєкторії руху лопатей.

### Література

1. Степаненко С.П., Кустов С.О., Кузьміч А.Я. (2021) Теоретичні дослідження швидкості руху маси матеріалу соняшнику в робочому зазорі

молотильно-сепарувального пристрою селекційного комбайна. Механізація та електрифікація сільського господарства: [Загальнодержавний збірник]. – 2021. - Вип. №13 (112). / [ННЦ“ІМЕСГ”]. – Глеваха, 2021. – С. 97-105. <https://doi.org/10.37204/0131-2189-2021-13-10>

2. Анеляк М.М., Кузьмич А.Я., Грицака О.М., Степаненко С.П., Недовесов В.І. (2023) Науково – технічні основи процесів та технічні засоби для збирання урожаю зернових, олійних культур та незернової частини урожаю. Монографія. ІМА АПВ НААН, Ніжин: Видавець Лисенко М.М., 2023. 176 с. ISBN 978-617-640-609-9. <https://doi.org/10.37204/imaap.zbir.vrozhayu>

3. Анеляк М.М., Кузьмич А.Я., Степаненко С.П., Коновал О.О. (2023) Дослідження процесу луцення гречки. Механіка та автоматика агропромислового виробництва: загальнодержавний збірник / ІМА АПВ НААН. Глеваха, 2023. Вип. 1 (115). - С. 97-104. <https://doi.org/10.37204/2786-7765-2023-1-9>

4. Степаненко С.П., Анеляк М. М., Кузьмич А. Я., Швидя В. О., Волик Д. А., Коновал О. О., Попадюк І. С. (2023) Дослідження впливу ступеня пошкодження зерна в технологічних лініях для очищення зернового матеріалу. Механіка та автоматика агропромислового виробництва: загальнодержавний збірник / ІМА АПВ НААН. Глеваха, 2023. Вип. 2 (116). – С. 88-100. <https://doi.org/10.37204/2786-7765-2023-2-10>

5. Кузьмич А.Я., Анеляк М.М., Степаненко С.П. (2024) Дослідження процесу скошування стебел соняшнику для використання на енергетичні цілі. Механіка та автоматика агропромислового виробництва : загальнодержавний збірник / ІМА АПВ НААН. Глеваха, 2024. Вип. 4 (118). - С. 125-135. <https://doi.org/10.37204/2786-7765-2024-1-14>

6. M. Aneliak, A. Kuzmych, S. Stepanenko, S. Kustov, V. Lysaniuk (2022) Improving the Efficiency of Harvesting Sunflower Seed Crops. INMATEH - Agricultural Engineering . Vol. 67, No. 2/2022, p331-340. 9p. <https://doi.org/10.35633/inmateh-67-34>

7. S. Stepanenko, B. Kotov, A. Kuzmych, M. Aneliak, D. Volyk, V. Melnyk, & R. Kalinichenko. (2025) Mathematical modeling of grain movement dynamics in the processes of air-centrifugal separation of grain material. Journal of Central European Agriculture, 2025, 26(2), p.383-393. <https://doi.org/10.5513/JCEA01/26.2.4301>

8. S. Stepanenko, M. Aneliak, A. Kuzmych, V. Lysaniuk (2023) Study of the process of threshing leguminous grass seeds with a drum-type threshing device. INMATEH - Agricultural Engineering . Vol. 71, No. 3 / 2023, p83-92. 10p. <https://doi.org/10.35633/inmateh-71-06>

УДК 631.362

## МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РУХУ ЗЕРНОВОЇ СУМІШІ В РОТАЦІЙНОМУ ПНЕВМОВІДЦЕНТРОВОМУ РОЗКИДАЧІ СЕПАРАТОРА

*Степаненко С.П., Швидя В.О., Попадюк І.С., Мельник В.А.*

*Інститут механіки та автоматики агропромислового виробництва  
Національної академії аграрних наук України*

Удосконалений ротаційний розкидач пневмовідцентрового типу являє собою складну механічну систему, яка забезпечує керований розподіл зернової суміші за рахунок поєднання відцентрових, гравітаційних і сил тертя. Конструктивно пристрій включає горизонтальний обертовий диск, направляючий розподільний конус, розкидний конус із підвищеним коефіцієнтом тертя та систему радіально орієнтованих лопаток рис.1. Особливістю конструкції є зазор  $\delta$  між нижньою кромкою лопаток і поверхнею розкидного конуса, що суттєво впливає на структуру потоку [1-4].

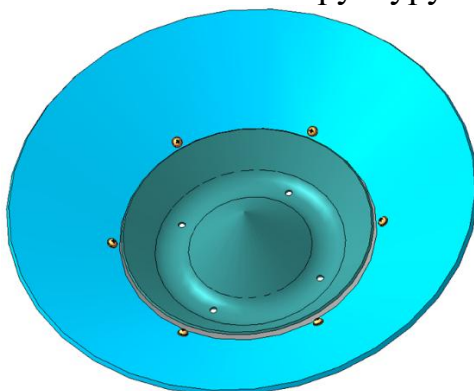


Рис. 1. Геометрія моделі

Розглянемо рух частинки по диску в полярній системі координат.

Початковий етап руху зернової частинки відбувається по горизонтальній поверхні диска. Для опису використовується полярна система координат  $(\rho, \varphi)$ , пов'язана з обертанням диска [5, 6].

Система диференціальних рівнянь руху має вигляд:

$$\ddot{\rho} - \rho(\omega - \dot{\varphi})^2 = -f_1 g \frac{\dot{\rho}}{\sqrt{\dot{\rho}^2 + \rho^2 \dot{\varphi}^2}}$$

$$\rho \ddot{\varphi} + 2\dot{\rho}(\omega - \dot{\varphi}) = -f_1 g \frac{\rho \dot{\varphi}}{\sqrt{\dot{\rho}^2 + \rho^2 \dot{\varphi}^2}}$$

Де  $\omega$  - кутова швидкість обертання диска;  $\rho$  - радіальна координата;  $\varphi$  - відносний кут повороту частинки;  $f_1$  - коефіцієнт тертя по диску.

За початкових умов:  $t = 0, \dot{\rho} = v_0, \dot{\varphi} = 0$ . Та граничних умов:  $\rho = r_1$ .

Цей етап визначає розгін частинки та формування її початкової траєкторії перед взаємодією з лопатками.

Розглянемо рух уздовж лопатки. Після досягнення радіуса розміщення лопаток частинка переходить у режим примусового спрямованого руху вздовж лопатки. Динаміка описується рівнянням:

$$\ddot{\rho} - \rho(\omega - \dot{\phi})^2 = f_1(g + 2\omega\dot{\rho})$$

Тут додатковий член  $2\omega\dot{\rho}$  враховує вплив коріолісових прискорень, що суттєво змінюють характер руху.

Завдяки зазору  $\delta$  нижній шар матеріалу частково «розвантажується» від дії лопаток, що створює передумови для шарового розділення суміші.

Наступний етап, це рух по конічній поверхні. Подальший рух частинки відбувається по внутрішній поверхні розкидного конуса, для якого доцільно застосувати циліндричну систему координат  $(\rho, \theta, z)$ .

Абсолютна кутова швидкість:  $\theta = \omega - \dot{\phi}$ .

Рівняння руху частинки в проекціях [7]:

$$m(\ddot{\rho} - \rho\theta^2) = -N_\rho - F_\rho$$

$$m(\rho\ddot{\theta} + 2\dot{\rho}\dot{\theta}) = -F_\theta$$

$$m\ddot{z} = N_z - F_z - mg$$

Напрявні косинуси:

$$\cos \beta_\rho = \frac{\dot{\rho}}{\sqrt{\rho^2 + \rho^2\theta^2 + z^2}}, \cos \beta_\theta = \frac{\rho\dot{\theta}}{\sqrt{\rho^2 + \rho^2\theta^2 + z^2}}, \cos \beta_z = \frac{\dot{z}}{\sqrt{\rho^2 + \rho^2\theta^2 + z^2}}$$

Абсолютну швидкість частинки визначимо за:

$$v_a = \sqrt{\dot{\rho}^2 + \rho^2\dot{\theta}^2 + \dot{z}^2}$$

Ключовою умовою ефективної роботи розкидача є співвідношення коефіцієнтів тертя:  $f_2 > f_1$ . Даний ефект забезпечує: гальмування частинок біля поверхні конуса; накопичення важчих фракцій у приповерхневому шарі; переміщення легких частинок у верхні шари (ефект «спливання»); формування стратифікованого потоку перед входом у пневмосепараційну зону. Таким чином формується попередньо структурований матеріальний потік.

Слід відзначити що, розроблена математична модель комплексно описує рух зернової частинки на всіх етапах: по диску, лопатках та конічній поверхні, із використанням полярної та циліндричної систем координат.

Встановлено, що динаміка частинок визначається сумарною дією відцентрових, коріолісових, гравітаційних сил і сил тертя, причому їх співвідношення змінюється на різних ділянках траєкторії.

Конструктивний параметр  $\delta$  (зазор між лопатками і конусом) забезпечує часткове розшарування потоку ще до входу на конус.

Підвищений коефіцієнт тертя конічної поверхні ( $f_2 > f_1$ ) є визначальним фактором стратифікації суміші за густиною та аеродинамічними властивостями.

Отримана модель може бути використана для: оптимізації геометричних параметрів розкидача; підбору режимів обертання; підвищення ефективності пневмосепарації.

Практичне значення полягає у можливості керованого формування зернового потоку з попереднім розподілом частинок, що зменшує енергетичні витрати і підвищує якість сепарації.

### Література

1. С.П. Степаненко, В.Г. Мироненко, С.П. Погорілий, А.Я. Кузьмич, В.О. Швидя, І. С. Попадюк (2025). Аналіз та розвиток моделей вібраційного переміщення зернівки в процесах сепарування зернових матеріалів. Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету: електронне наукове фахове видання / ТДАТУ. Запоріжжя: ТДАТУ, 2025. Вип. 15, т. 1. С.136-146. <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-1-16>
2. S. Stepanenko, V. Kotov, A. Kuzmych, M. Aneliak, D. Volyk, V. Melnyk, & R. Kalinichenko. (2025) Mathematical modeling of grain movement dynamics in the processes of air-centrifugal separation of grain material. Journal of Central European Agriculture, 2025, 26(2), p.383-393. <https://doi.org/10.5513/JCEA01/26.2.4301>
3. Степаненко С.П., Кузьмич А.Я., Швидя В.О., Мельник В.А., Тіманов В.В. (2025). Обґрунтування параметрів процесу поділу зернового матеріала на конічному решеті. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. Вип. 55. – Кропивницький: ЦНТУ, 2025. – С. 97-111. <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2025.55.97-111>
4. Степаненко, С.П., Никифоров А.О. (2024). Дослідження впливу знакозмінного повітряного потоку на якість віброфрикційного розділення дрібнонасінневих матеріалів. Науковий журнал «Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів». ДБТУ, Харків. - 2024, № 24. С. 52-68. <https://doi.org/10.37700/ts.2024.24.52-68>
5. Stepanenko, S., Kuzmych, A., Melnyk, V., Volyk, D. (2025). Theoretical study of grain particle movement in vibro-aerodynamic field. ENGINEERING FOR RURAL DEVELOPMENT (с. 1091–1096). <https://doi.org/10.22616/ERDev.2025.24.TF278>
6. Степаненко С., Котов Б., Волик Д., Мельник В. (2025). Чисельне моделювання процесу коливального руху зерна на деку зі з пульсуючим повітряним середовищем. Праці Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного, 1(25), 54–63. <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2025-25-1-7>
7. Степаненко, С. П., Котов, Б. І., Волик, Д. А., Мельник, В. А. (2024). Дослідження процесів руху та розділення компонентів насінневих сумішей у вібропневматичному середовищі. Вібрації в техніці та технологіях, 14(2), 10. <https://doi.org/10.37128/2306-8744-2024-2-2>

УДК 631.362

## ЧИСЛОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПНЕВМАТИЧНОЇ СИСТЕМИ ВІБРОПНЕВМОІМПУЛЬСНОГО СЕПАРАТОРА

*Степаненко С.П., Волик Д.А.*

*Інститут механіки та автоматики агропромислового виробництва  
Національної академії аграрних наук України*

У роботі розглянуто результати числового моделювання газодинамічних процесів у пневматичній системі вібропневмоімпульсного сепаратора із застосуванням методів обчислювальної гідродинаміки (CFD). Моделювання виконано у двовимірній постановці, що відповідає осьовій площині симетрії реальної конструкції, що дозволяє суттєво зменшити обчислювальні витрати при збереженні фізичної адекватності процесу [1-3].

Обчислювальна область представлена у вигляді каналу постійного круглого перерізу діаметром 100 мм, у центральній частині якого розташовано керуючий елемент - обертальну заслінку. Геометрична модель доповнена розрахунковою сіткою рис. 1. з локальним згущенням у зоні руху заслінки та формування струменя, що забезпечує підвищену точність визначення градієнтів швидкості та тиску.

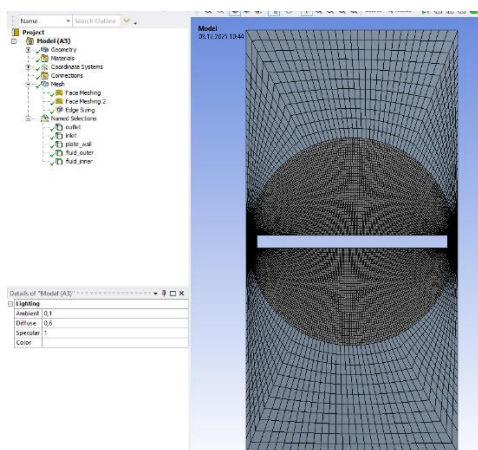


Рис. 1. Геометрія моделі та її сітка з додатковими налаштуваннями

Обертальна заслінка змодельована у вигляді жорсткої пластини, яка здійснює періодичний рух навколо осі, перпендикулярної до площини моделі та такої, що проходить через її геометричний центр. Для аналізу нестационарної течії розглянуто повний цикл коливального руху заслінки, який включає чотири характерні фази.

Розрахункова область представлена каналом діаметром  $D = 0,1$  м із розташованою в центральній частині обертальною заслінкою. Основною змінною, що визначає нестационарний характер течії, є кут повороту заслінки  $\theta(t)$ , який змінюється у часі:

$$\theta(t) = \theta_{max} \cdot \sin(\omega t),$$

$\theta_{max}$  - максимальний кут відкриття;  $\omega$  - кутова частота коливань.

У початковий момент заслінка знаходиться у повністю закритому положенні, перпендикулярному до осі каналу, що практично повністю блокує повітряний потік. У цих умовах витрата повітря мінімальна та визначається лише умовними зазорами, врахованими у моделі [4-6].

Під час фази відкриття заслінка інтенсивно обертається, що призводить до швидкого збільшення прохідного перерізу каналу. У цей період формується імпульсний струмінь стисненого повітря, який супроводжується значними градієнтами тиску, локальним відривом потоку та розвитком вихрових структур у прикордонних областях рис. 2.

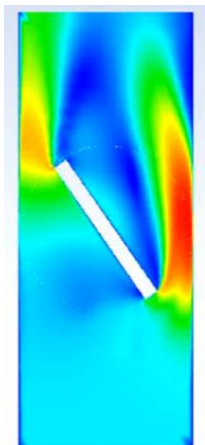


Рис. 2. Контури швидкості руху обертальної заслінки

У положенні повного відкриття заслінка орієнтована вздовж потоку, що забезпечує мінімальний гідравлічний опір системи та максимальну витрату повітря. Це відповідає стадії стабілізації течії перед наступним імпульсним впливом.

Динаміка повітряного середовища описується рівняннями Нав'є-Стокса для стисливого газу:

$$\rho \left( \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{v},$$

Де  $\rho$  - густина повітря;  $p$  - тиск;  $\mu$  - динамічна в'язкість.

Основний ефект вібропневмоімпульсної дії характеризується імпульсом тиску:

$$I = \int_{t_1}^{t_2} \Delta p(t) dt,$$

Де  $\Delta p(t)$  - миттєве перевищення тиску відносно середнього значення.

Фаза закриття характеризується швидким зменшенням прохідного перерізу, що викликає різке гальмування повітряного потоку. У результаті виникають явища зворотного гідродинамічного удару та формуються потужні імпульси тиску, які передаються у робочу камеру. Саме ці імпульси є

визначальним фактором формування вібраційно-ударної дії на зерновий матеріал.

Циклічне повторення процесів відкриття та закриття заслінки забезпечує генерацію серії пневматичних імпульсів із заданою частотою та амплітудою, що створює ефективне динамічне навантаження на зернову суміш та інтенсифікує процеси сепарації.

Для коректного опису турбулентних та швидкоплинних нестационарних явищ використано модель турбулентності SST  $k-\omega$ , яка поєднує переваги моделей  $k-\epsilon$  та  $k-\omega$  і забезпечує підвищену точність прогнозування відриву потоку, особливо в зонах із різкою зміною геометрії та на гострих кромках заслінки.

Додатково встановлено, що параметри руху заслінки (кутова швидкість, частота коливань, амплітуда відкриття) безпосередньо впливають на інтенсивність імпульсів тиску, структуру вихрових зон та енергетичні характеристики потоку, що відкриває можливості для оптимізації режимів роботи сепаратора.

### Література

1. Stepanenko, S., Kuzmych, A., Melnyk, V., Volyk, D. (2025). Theoretical study of grain particle movement in vibro-aerodynamic field. ENGINEERING FOR RURAL DEVELOPMENT (с. 1091–1096). <https://doi.org/10.22616/ERDev.2025.24.TF278>
2. Степаненко С., Котов Б., Волик Д., Мельник В. (2025). Чисельне моделювання процесу коливального руху зерна на деку зі з пульсуючим повітряним середовищем. Праці Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного, 1(25), 54–63. <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2025-25-1-7>
3. Степаненко, С. П., Котов, Б. І., Волик, Д. А., Мельник, В. А. (2024). Дослідження процесів руху та розділення компонентів насінневих сумішей у вібропневматичному середовищі. Вібрації в техніці та технологіях, 14(2), 10. <https://doi.org/10.37128/2306-8744-2024-2-2>
4. Степаненко, С. П., Котов, Б. І., Мельник, В. А., Волик, Д. А. (2024). Моделювання процесу переміщення зернового матеріалу в робочій зоні сепаратора. Праці Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного, 14(1). <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2024-24-1-3>
5. Степаненко, С., Кузьмич, А., Борис, А., Днесь, В., Волик, Д., Кузьмич, А. (2024). Дослідження фізико-механічних та оптичних характеристик зернових матеріалів. Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин, (54), 36–46. <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2024.54.36-46>
6. S. Stepanenko, B. Kotov, A. Kuzmych, M. Aneliak, D. Volyk, V. Melnyk, & R. Kalinichenko. (2025) Mathematical modeling of grain movement dynamics in the processes of air-centrifugal separation of grain material. Journal of Central European Agriculture, 2025, 26(2), p.383-393. <https://doi.org/10.5513/JCEA01/26.2.4301>

## ЗМІСТ

Стор.

РЕЗУЛЬТАТИ НАУКОВОЇ РОБОТИ КАФЕДРИ НГКГД.....	3
Пилипака С.Ф.	
ЗАРОДЖЕННЯ В УКРАЇНІ НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ.....	
«НАРИСНА ГЕОМЕТРИЯ» .....	5
Булгакова Оксана	
РОЗВИТОК НАУКОВОЇ ШКОЛИ ОБУХОВОЇ В. С.....	10
Воліна Т. М.	
ПЕРЕПАРАМЕТРИЗАЦІЯ ПОВЕРХОНЬ.....	16
Несвідомін В.М.	
КОНСТРУЮВАННЯ КАНАЛОПОДІБНИХ ГВИНТОВИХ ПОВЕРХОНЬ ІЗ СМУГ ТОРСІВ .....	20
Пилипака С.Ф., Несвідомін А.В.	
ПЕРЕХІДНІ КРИВІ ДЛЯ ПЛАВНОГО З'ЄДНАННЯ ЛІНІЙ ІЗ ЗАДАНИМИ КРИВИНАМИ НА ЇХ КІНЦЯХ .....	23
Несвідомін А.В.	
НЕПЕРЕРВНЕ ЗГИНАННЯ ВІДКРИТОГО ГЕЛІКОЇДА ДЛЯ ПОБУДОВИ РОЗГОРТКИ.....	24
Хропост <sup>1</sup> В.І., Пилипака С.Ф., Кресан Т.А.	
КРИВІ КОЛЕСА, ОДНЕ З ЯКИХ ОКРЕСЛЕНЕ КОЛОМ ЗІ ЗМІЩЕНИМ ЦЕНТРОМ ОБЕРТАННЯ .....	26
Кресан Т.А., Пилипака С.Ф., Хропост В.І. <sup>1</sup> , Федорина Т.П.	
МОДЕЛЬ НАДІЙНОСТІ ОДНОКІЛЬЦЕВОЇ МЕРЕЖІ З УРАХУВАННЯМ ДЕГРАДАЦІЇ ЕЛЕМЕНТІВ .....	27
Усенко В.Г.	
СТРУКТУРИЗАЦІЯ ДАНИХ У НАБОРАХ ПРАВИЛЬНИХ БАГАТОГРАННИКІВ.....	29
Морозова М.Ю., Сидоренко О.С.	
МОДЕЛЮВАННЯ ТРАНСМІСІЙНИХ ТЕПЛОВТРАТ В ХОДІ АРХІТЕКТУРНОГО ПРОЄКТУВАННЯ ПРИ ОПТИМІЗАЦІЇ ПРОПОРЦІЙ ЗЕЛЕНИХ БУДІВЕЛЬ .....	31
Мартинов В.Л., Мартинюк О. Л., Поляк Ю.Ю.	

СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧНЕ ФОРМОУТВОРЕННЯ ПРАВОСЛАВНИХ КАПЛИЦЬ.....	36
Вірченко Г.А., Терещук М.О.	
БАГАТОПАРАМЕТРИЧНА ОПТИМІЗАЦІЯ ФОРМИ ЗЕЛЕНИХ БУДІВЕЛЬ ДЛЯ П'ЯТИ АРХІТЕКТУРНО-КЛІМАТИЧНИХ РАЙОНІВ УКРАЇНИ .....	39
Мартинов В.Л., Стаднійчук Д.М., Банний Т.А.	
ПОВЕРХНЯ ТОЧКИ РОСИ .....	41
Зданевич В.А., Кундрат Т.М., Літніцький С.І., Пугачов Є В.	
ДВОВИМІРНА ДИСКРЕТНА ІНТЕРПОЛЯЦІЯ СУПЕРПОЗИЦІЯМИ КООРДИНАТ ТРЬОХ ТОЧОК .....	45
Воронцов О.В., Воронцова І.В.	
ГЕОМЕТРИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДИФЕРЕНЦІАЛЬНИЙ АНАЛІЗ СІМЕЙСТВА ГАУСІВСЬКО-МОДИФІКОВАНИХ ЦИКЛОЇДАЛЬНИХ КРИВИХ.....	47
Котляр Д.В.	
ENERGY EFFICIENT NETWORKS FOR SWARMS OF AUTONOMOUS AGRICULTURAL DRONES.....	51
Krushelnytskyi V.V., Skuriatin M.A.	
GREENING THE MANAGEMENT OF CONSTRUCTION WASTE GENERATED BY WAR-RELATED DESTRUCTION: SORTING, RECYCLING, AND THEIR ROLE IN ENSURING RESOURCE EFFICIENCY AND SUSTAINABLE RECOVERY IN UKRAINE .....	53
Melnyk Valentyna, Bastyllo Vladyslav	
НАУКОВО-МЕТОДИЧНІ ЗАСАДИ ОЦІНЮВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ДВОСТУПЕНЕВИХ СИСТЕМ ОЧИЩЕННЯ ПОВІТРЯ ДВИГУНІВ ТЕЛЕСКОПІЧНИХ НАВАНТАЖУВАЧІВ.....	55
Новицький А.В., Новицький Ю.А., Підвисоцький В.М.	
THE COPILOT PROJECT AS AN INNOVATIVE MODEL FOR MODERN HIGHER EDUCATION.....	57
Romasevych Yuriy, Tsyvenkova Nataliya	
ДОСЛІДЖЕННЯ ІНТЕНСИВНОСТІ НАКОПИЧЕННЯ ВТОМНОГО ПОШКОДЖЕННЯ У ЗРАЗКАХ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ НА ОСНОВІ СТАТИСТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЯСКРАВОСТІ СПЕКЛОГРАМ .....	59
Войналович О.В., Писаренко Г.Г., Майло А.М., Бялонович А.В.	

ТРАНСПОРТНІ СИСТЕМИ ЯК СКЛАДНІ ДИНАМІЧНІ СИСТЕМИ: АДАПТАЦІЯ ДО ЗОВНІШНІХ ЗБУРЕНЬ ТА ОСВІТНІ ІМПЛІКАЦІЇ .....	62
Мацюк Н.О.	
MODERN ASPECTS OF RELIABILITY AND SERVICE LIFE OF OIL FILTERS IN INTERNAL COMBUSTION ENGINES .....	64
Melnyk Valentyna, Novitskiy Andriy, Lisetskyi Vitalii	
ПЛАНУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ДИНАМІКИ РУХ ЕЛЕМЕНТІВ ЛАБОРАТОРНОЇ УСТАНОВКИ БАШТОВОГО КРАНА .....	66
Ромасевич Ю.О., Великоіваненко Д.І.	66
ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ «ДЕРЕВО ВІДМОВ» ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ ДОКОРІННИХ ПРИЧИН ТРАВМАТИЗМУ СЕРЕД ПРАЦІВНИКІВ СІЛЬСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА .....	67
Марчишина Є. І., Зубок Т.О.	
INVESTIGATION OF OPERATING MODES OF AN AEROTROUGH GRAIN DRYER.....	69
Kotov V.I., Stepanenko S.P., Kalinichenko R.A., Popadyuk I.S.	
МОДЕЛЮВАННЯ КОЛИВАНЬ НЕСКІНЧЕННИХ ПЕРІОДИЧНИХ БАЛОК ПІД ДІЄЮ ГАРМОНІЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ АЛЬТЕРНАТИВНИМ ДО ТЕОРІЇ ФЛОКЕ МЕТОДОМ .....	72
Куценко А.Г., Куценко О.Г., Бондар М.М.	
ЦИФРОВІЗАЦІЯ СИСТЕМ ТЕХНІЧНОГО СЕРВІСУ ОБЛАДНАННЯ ГОДІВЛІ ТВАРИН У КОНТЕКСТІ ТОЧНОГО ТВАРИННИЦТВА .....	74
Новицький А.В.	
РАЦІОНАЛЬНИЙ КОМПЛЕКС ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ОЛІЇ В УМОВАХ ФЕРМЕРСЬКИХ ГОСПОДАРСТВ .....	77
Єременко О.І., Загородний Н.Б., Гринюк В.С.	
ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В ОЦІНЦІ РИЗИКІВ ТРАВМУВАННЯ ПРАЦІВНИКІВ НА МЕХАНІЗОВАНИХ ПРОЦЕСАХ В АГРАРНІЙ СФЕРІ .....	81
Марчишина Є.І., Дідиченко М.	
ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ «5 WHY?» В ОЦІНЮВАННІ КОРЕНЕВИХ ПРИЧИН ВИРОБНИЧОГО ТРАВМАТИЗМУ МЕХАНІЗАТОРІВ.....	83
Марчишина Є.І., Зубок Т.О.	

ОСОБЛИВОСТІ ПРОВЕДЕННЯ АТЕСТАЦІЇ РОБОЧИХ МІСЦЬ ЗА УМОВАМИ ПРАЦІ У ВОЄННИЙ ПЕРІОД .....	85
Марчишина Є.І., Кузьменко В.М.	
СТАНДАРТИЗАЦІЯ ТА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЇ БІОГАЗОВИХ УСТАНОВОК .....	87
Дев'ятко О., Денисенко М.	
КОНСТРУКТИВНІ ОСОБЛИВОСТІ СИСТЕМ АГРОВОЛЬТАЇКИ .....	88
Голуб Г.А., Цивенкова Н.М., Роговський І.Л., Марус О.А.	
УДОСКОНАЛЕНА КОНСТРУКЦІЯ ПОДРІБНЮВАЧА КОНЦЕНТРОВАНИХ КОРМІВ .....	91
Монько Р.В., Потапова С.Є.	
МЕТОДИ ТА ПІДХОДИ ОПТИМІЗАЦІЇ РЕЖИМУ РУХУ РОБОТА З ОДНІЄЮ ПОСТУПАЛЬНОЮ ТА ДВОМА ОБЕРТАЛЬНИМИ ЛАНКАМИ .....	93
Ловейкін В.С., Кадикало І.О., Балюк Ю.А.	
АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЇ ТА ОСОБЛИВОСТЕЙ РОБОТИ СТРИЧКОВИХ КОНВЕЄРІВ .....	95
Ловейкін В.С., Кадикало І.О., Музика Н.С.	
МЕТОДИ ТА ПІДХОДИ ОПТИМІЗАЦІЇ РЕЖИМУ РУХУ РОБОТА З ТРЬОМА ПОСТУПАЛЬНИМИ ЛАНКАМИ .....	97
Ловейкін В.С., Кадикало І.О., М'язко М.В.	
МЕТОДИ ТА ПІДХОДИ ОПТИМІЗАЦІЇ РУХОМ МЕХАНІЗМУ ПОВОРОТУ РОБОТА .....	99
Ловейкін В.С., Кадикало І.О., Олексієнко Д.В.	
ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ МЕХАНІЗМУ ПОВОРОТУ СТІЛОВОГО КРАНА З ПОДВІЙНИМ МАЯТНИКОВИМ ПІДВІСОМ .....	101
Ловейкін В.С., Кадикало І.О., Чмуль О.А.	
МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ РОБОТІВ-МАНІПУЛЯТОРІВ З ВАЖІЛЬНИМ ЗАХВАТНИМ ПРИСТРОЄМ .....	103
Ловейкін В.С., Кадикало І.О., Юр'єв І.Ю.	
ПІДВИЩЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ МЕТАЛООБРОБНИХ ВЕРСТАТІВ....	105
Похиленко Г.М.	
ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ОПТИМАЛЬНОГО ЗА ШВИДКОДІЄЮ КЕРУВАННЯ МЕХАНІЗМОМ ПОВОРОТУ БАШТОВОГО КРАНА .....	107
Ловейкін В.С., Ромасевич Ю.О., Стехно О.В., Квасницький А.В.	

РОЗВ'ЯЗОК ЗАДАЧІ ОПТИМАЛЬНОГО ЗА ШВИДКОДІЄЮ КЕРУВАННЯ МЕХАНІЗМОМ ПОВОРОТУ БАШТОВОГО КРАНУ .....	111
Ловейкін В.С., Ромасевич Ю.О., Стехно О.В., Квасницький А.В.	
ЦИФРОВІ ДВІЙНИКИ В СІЛЬСЬКОМУ ГОСПОДАРСТВІ: ТЕХНОЛОГІЧНА РЕВОЛЮЦІЯ ТА ШЛЯХ ДО СТАЛОГО ФЕРМЕРСТВА .....	116
Ребенко В.І.	
ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАДАЧІ ПОЗИЦІЮВАННЯ МАНІПУЛЯЦІЙНОЇ РОБОТОТЕХНІЧНОЇ СИСТЕМИ.....	118
Черниш О.М.	
МЕХАНІЧНІ ВТРАТИ ЗЕРНА І ЇХ ВПЛИВ НА ПРОДУКТИВНІСТЬ КОМБАЙНА .....	121
Надточій О.В.	
ФОРМУВАННЯ КЛАСИФІКАЦІЙНИХ ОЗНАК ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗБИРАННЯ ЗЕРНОВИХ .....	124
Надточій О.В.	
ФОРМУВАННЯ ЕКОНОМІЧНИХ МОДЕЛЕЙ НАДІЙНОСТІ ЛАНЦЮГА ПОСТАЧАНЬ.....	127
Загурський О.М.	
НОВІТНІ МАТЕРІАЛИ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ЗАСОБІВ ІНДИВІДУАЛЬНОГО ЗАХИСТУ ПРАЦІВНИКІВ ПРОТИ ВІБРАЦІЇ .....	130
Марчишина Є.І., Таїрова Т.М.	
РИЗИКИ ВОЄННОГО СТАНУ ПРИ ПЕРЕВЕЗЕННІ ТАРНО-ШТУЧНИХ ВАНТАЖІВ У ПРИМІСЬКОМУ СПОЛУЧЕННІ НА ТЕРИТОРІЇ УКРАЇНИ. 133	
Дьомін О.А., Осадча О.В.	
ПЕРСПЕКТИВИ ПЕРЕВЕЗЕННЯ НЕГАБАРИТНИХ ВАНТАЖІВ В УКРАЇНІ .....	135
Дьомін О.А., Олійник Я.В.	
ВАНТАЖНІ ПЕРЕВЕЗЕННЯ МІНЕРАЛЬНИХ ДОБРИВ ДЛЯ ПОТРЕБ АПК УКРАЇНИ В ПЕРІОД РИЗИКІВ ВОЄННОГО СТАНУ .....	137
Дьомін О.А., Тонконог І.В.	
ПЕРЕДУМОВИ УДОСКОНАЛЕННЯ ПІДГОТОВКИ ҐРУНТУ.....	
ДО СІВБИ ЦУКРОВИХ БУРЯКІВ.....	139
Теслюк В.В., Вечера О.М., Ікальчик М.І.	

ОБҐРУНТУВАННЯ КОНСТРУКТИВНОГО УДОСКОНАЛЕННЯ БОРІН ДЛЯ ОБРОБІТКУ ҐРУНТУ.....	141
Теслюк В.В., Вечера О.М., Теслюк Б.В.	
ВПЛИВ ДІЇ РУШІЇВ МАШИН НАСИСТЕМУ «МАШИНА- БІОСЕРЕДОВИЩЕ».....	143
Теслюк В.В., Ікальчик М.І., Кривичун М.Д.	
ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ І РЕЖИМІВ СЕПАРУВАННЯ ЗЕРНОВИХ КУЛЬТУР.....	145
Теслюк В.В., Ікальчик М.І.	
АНАЛІЗ ТА УДОСКОНАЛЕННЯ КОПРА АПАРАТА ВОДІННЯ КОРЕНЕЗБИРАЛЬНОЇ МАШИНИ.....	147
Теслюк В.В., Барановський В.М.	
ЕФЕКТИВНІСТЬ СКЛАДСЬКОЇ ЛОГІСТИКИ ПІДПРИЄМСТВ АГРОПРОМИСЛОВОГО КОМПЛЕКСУ: МЕТОДОЛОГІЧНИЙ ПІДХІД ТА ПРАКТИКА ОЦІНЮВАННЯ.....	149
Савченко Л.А., Кульбачний І.	
МОДЕЛЮВАННЯ КІНЕМАТИЧНИХ ПАР ЗУБЧАСТОГО ЗАЧЕПЛЕННЯ В МЕХАНІЗМАХ ВІЙСЬКОВОЇ ТЕХНІКИ ТА ОЗБРОЄННЯ З ВИКЛЮЧЕННЯМ ІНТЕРФЕРЕНЦІЇ.....	153
Ісмаїлова Н.П., Мікрюков І.С., Бикова Л.Г.	
ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДУ ДИСКРЕТНИХ ЕЛЕМЕНТІВ (DEM) ДЛЯ ОБҐРУНТУВАННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ВИСІВНОГО ДИСКА ЯК ЧИННИКА БЕЗВІДМОВНОСТІ.....	155
Михайлюк О.О.	
ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ БЕЗПЛОТНИХ АВІАЦІЙНИХ СИСТЕМ ДЛЯ УЛЬТРАМАЛООБ'ЄМНОГО ОБПРИСКУВАННЯ В СУЧАСНОМУ РОСЛИННИЦТВІ.....	159
Вечера О.М., Теслюк Б.В.	
ТРАНСПОРТНО-ЕКСПЕДИТОРСЬКА ДІЯЛЬНІСТЬ В УКРАЇНІ: АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ТА НАПРЯМИ ОПТИМІЗАЦІЇ.....	162
Савченко Л.А., Володкевич А.	
УПРАВЛІННЯ ЗАПАСАМИ ПІДПРИЄМСТВ АПК НА ОСНОВІ ІНТЕГРОВАНОГО ABC/XYZ-АНАЛІЗУ.....	165
Савченко Л.А., Рожошенко І.	

КІНЕМАТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ МОТОВИЛА  
ЗЕРНОЗБИРАЛЬНОГО КОМБАЙНА ПРИ ЗБИРАННІ СОНЯШНИКУ ..... 168  
Степаненко С.П., Кузьмич А.Я., Анеляк М.М..

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РУХУ ЗЕРНОВОЇ СУМІШІ В  
РОТАЦІЙНОМУ ПНЕВМОВІДЦЕНТРОВОМУ РОЗКИДАЧІ  
СЕПАРАТОРА..... 171  
Степаненко С.П., Швидя В.О., Попадюк І.С., Мельник В.А.

ЧИСЛОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПНЕВМАТИЧНОЇ СИСТЕМИ  
ВІБРОПНЕВМОІМПУЛЬСНОГО СЕПАРАТОРА ..... 174  
Степаненко С.П., Волик Д.А.

Наукове видання

Збірник  
тез доповідей  
XX МІЖНАРОДНОЇ НАУКОВО-ПРАКТИЧНОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ  
«ОБУХОВСЬКІ ЧИТАННЯ»  
з нагоди 100-ї річниці від дня народження  
доктора технічних наук, професора, академіка ВШ України,  
Обухової Віолетти Сергіївни  
(1926-2005)

(30 березня 2026 року)

*Відповідальний за випуск:*

Несвідомін В.М. – професор кафедри нарисної геометрії, комп'ютерної графіки та дизайну НУБіП України.

*Адреса колегії – 03041, Україна, м. Київ, вул. Героїв Оборони, 12<sup>б</sup>, НУБіП України, навч. корп. 11, кімн. 220.*

---

Підписано до друку 22.03.2026. Формат 60×84 1/16.

Папір Maestro Print. Друк офсетний. Гарнітура Times New Roman та Arial.

Друк. арк. 5,4. Ум.-друк. арк. 5,5. Наклад 100 прим.

Зам. № 10097 від 22.03.2026.

Видавничий центр НУБіП України

03041, Київ, вул. Героїв оборони, 15. т. 527-80-49, к. 117

---

© НУБіП України, 2026