

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ

**ЯБЛОНСЬКИЙ ПЕТРО МИКОЛАЙОВИЧ**



УДК 514.18

**ІНТЕГРОВАНЕ КОМПЛЕКСНЕ ГЕОМЕТРИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ  
ГРУНТООБРОБНИХ ЗНАРЯДЬ**

05.01.01 – Прикладна геометрія, інженерна графіка

**РЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Київ – 2025

Дисертацією є рукопис

Роботу виконано в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України

**Офіційні опоненти:**

доктор технічних наук, професор

**ПИЛИПАКА Сергій Федорович,**

Національний університету біоресурсів і природокористування України (м. Київ) Міністерства освіти і науки України, завідувач кафедри нарисної геометрії, комп'ютерної графіки та дизайну;

доктор технічних наук, професор

**ВЕРЕЩАГА Віктор Михайлович,**

Мелітопольський державний педагогічний університету імені Богдана Хмельницького (м. Запоріжжя) Міністерства освіти і науки України, професор кафедри математики і фізики;

доктор технічних наук, професор

**ПУСТЮЛЬГА Сергій Іванович,**

Луцький національний технічний університет (м. Луцьк) Міністерства освіти і науки України, професор кафедри архітектури та дизайну.

Захист відбудеться «19» березня 2025 р. о 13 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.056.06 при Київському національному університеті будівництва і архітектури за адресою: 03037, м. Київ, проспект Повітряних Сил, 31, КНУБА, Вчена рада університету, ауд. 466.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Київського національного університету будівництва і архітектури за адресою: 03037, м. Київ, проспект Повітряних Сил, 31, КНУБА або за посиланням: <https://www.knuba.edu.ua/speczializovana-vchena-rada-d-26-056-06/>

Реферат розісланий «    » лютого 2025 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради



Вячеслав МАРТИНОВ

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Створення сучасних технічних об'єктів характеризується інтенсивним використанням інтегрованих CAD/CAM/CAE/PLM (Computer-Aided Design/ Computer-Aided Manufacturing/ Computer-Aided Engineering/Product Life-cycle Management) систем, які дозволяють підвищувати якість продукції та значно зменшувати витрати протягом усього життєвого циклу. Перспективність даного підходу засвідчується можливістю ефективного застосування в різноманітних галузях народного господарства. Методологія розвитку прикладної геометрії дозволяє здійснювати необхідні та ефективні наукові дослідження. Це забезпечує не тільки розширення меж наукової системи, але й розроблення якісно нових інноваційних методологічно обґрунтованих теорій для покращення конкурентоздатності виробничих систем, які, в свою чергу, дозволять скоротити витрати при нарощенні якості промислової продукції. Теоретичне ядро розвитку методології прикладної геометрії, розроблене д.т.н., проф. Плоским В.О., дозволяє проводити дослідження, пов'язані з розробленням *спеціальної теорії інтегрованого комплексного геометричного моделювання*. Це обумовлено тим, що одним із базових компонентів наукової підсистеми розвитку теоретичного ядра прикладної геометрії з позиції *інтегрованого комплексного геометричного моделювання* є розбудова спеціальної теорії комп'ютерного формоутворення. Така теорія реалізує визначення, створення спеціального інструментарію, що дає можливість візуалізувати геометрію опрацьовуваних об'єктів, сприяє здійсненню комплексної багатокритеріальної оптимізації. Такий інструментарій дозволить створити топологічного більш якісний ряд геометричних моделей, які під час ітераційного варіантного розроблення великої кількості технічних виробів для фахівців різного профілю комплексно виконують узгоджувальну та узагальнюючу роль. Зазначений підхід задовольняє вимогам стандартів ISO 9000 стосовно забезпечення належної якості промислової продукції.

Наведена вище актуальна науково-прикладна проблема визначила тематику даного дисертаційного дослідження. В окресленому аспекті важливим є подальший розвиток теоретичного ядра методології прикладної геометрії, а саме *розроблення спеціальної теорії інтегрованого комплексного геометричного моделювання*.

Розроблення такої спеціальної теорії визначається необхідністю систематизації, якісного оновлення та розвитку наявних наукових, науково-практичних та прикладних підходів наукової школи «Геометричне моделювання об'єктів, процесів та явищ» (керівник д.т.н., проф. Ванін В.В.) КПІ ім. Ігоря Сікорського. Саме в такому розумінні здійснюється інтеграція напрямків структурно-параметричного формоутворення технічних об'єктів, розроблення сільсько-господарських машин, розвідок у галузі багатовимірної геометрії. Гостра потреба у високоефективних засобах комп'ютерних побудов різноманітної промислової продукції, в тому числі діджиталізації процесів виготовлення та експлуатації ґрунтообробних знарядь, вимагає новітніх якісних ефективних науково-прикладних рішень. У нинішніх складних умовах воєнного часу в Україні промислова продукція розглядається як необхідність для сталого розвитку народного господарства. Оскільки, Україна є аграрною країною, а сільське господарство відіграє визначну роль в економіці нашої держави, то вдосконалення відповідного виробництва є нагальним та важливим із точки зору національної безпеки нашої держави.

Таким чином, вирішення окреслених вище проблем полягає в необхідності розширення не тільки теоретичного ядра прикладної геометрії, але й інструментарію геометричного моделювання шляхом *розроблення спеціальної теорії інтегрованого комплексного геометричного моделювання* для якісного нового дослідження *багатопараметричних складних технічних об'єктів і процесів*, зокрема для розвитку методології прикладної геометрії в рамках нарощення ефективності та якості сільськогосподарських ґрунтообробних знарядь.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертацію виконано в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» на кафедрі нарисної геометрії, інженерної та комп'ютерної графіки згідно з науково-дослідною темою 0114U002701 «Автоматизоване варіантне геометричне моделювання технічних об'єктів».

Дисертація задовольняє вимогам, визначеним МОН України до докторських дисертацій. За змістом та результатами робота відповідає паспорту спеціальності 05.01.01 – Прикладна геометрія, інженерна графіка, а саме за такими пунктами в порядку пріоритетності в роботі: за п. 1 у частині «... розвитку теоретичних основ прикладної геометрії та розширення її інструментарію шляхом розроблення спеціальної теорії інтегрованого комплексного геометричного моделювання»; за п. 2 у частині «... створення та практичної реалізації методів геометричного моделювання розроблено спосіб інтегрованих класифікацій та спосіб узагальненого контуру»; за п. 3 у частині «... методів візуального комп'ютерного аналізу геометричних моделей на прикладі профілів борозни»; за п. 4 у частині «... дослідження кривих Безье та поверхонь змінювання кутів розпушення, обертання і зсуву ґрунтообробних знарядь»; за п. 8 у частині «... прийняття рішень на основі графічного інтерпретування моделей розробленим способом зменшення області проектних розв'язків».

**Мета та завдання дослідження.** Мета роботи полягає в необхідності розширення теоретичного ядра прикладної геометрії шляхом розроблення спеціальної теорії інтегрованого комплексного геометричного моделювання для якісно нового дослідження багатопараметричних складних технічних об'єктів і процесів на прикладі ґрунтообробних знарядь.

Для досягнення визначеної мети поставлено наступні завдання.

1. *Проаналізувати* сучасний стан розвитку прикладної геометрії в частині моделювання ґрунтообробних знарядь.

2. *Обґрунтувати необхідність та доцільність* інноваційного розвитку базових компонентів наукової підсистеми теоретичного ядра прикладної геометрії з позиції інтегрованого комплексного формоутворення.

3. *Розробити* спеціальну теорію, методологію та інструментарій інтегрованого комплексного геометричного моделювання для якісно нового дослідження багатопараметричних складних технічних об'єктів і процесів на прикладі ґрунтообробних знарядь.

4. *Розробити* спосіб інтегрованих класифікацій для ефективного автоматизованого формоутворення груп технічних об'єктів; спосіб узагальненого контуру, який базується на структурно-параметричному підході до формоутворення; спосіб зменшення області проектних розв'язків, що дозволить визначати раціональні величин параметрів і характеристик опрацьовуваних технічних об'єктів та процесів.

5. *Розробити* узагальнену геометричну модель робочих поверхонь широкої номенклатури полицевих і чизельних знарядь з метою здійснення їхньої комплексної оптимізації.

6. *Провести* аналіз змінювання кутів розпушення, обертання та зсуву ґрунту різноманітних полицевих робочих поверхонь, що особливо важливо для забезпечення високих агротехнічних показників сільськогосподарських знарядь.

7. *Створити* математичну модель профілю борозни для дискових робочих органів у залежності від їхніх конструкційних та експлуатаційних параметрів.

8. *Розробити* спеціалізований геометрично-математичний інструментарій для вдосконалення конструкції пружинного запобіжника лапових культиваторів-сошників, який дозволяє ефективно враховувати наявні умови експлуатації.

9. *Упровадити* отримані наукові результати у практику сільськогосподарського виробництва.

10. *Визначити* напрямки подальшого розвитку запропонованої методології інтегрованого комплексного геометричного моделювання технічних об'єктів.

**Об'єктом дослідження** є автоматизоване геометричне моделювання технічних об'єктів і процесів.

**Предметом дослідження** є інтегроване комплексне геометричне моделювання ґрунтообробних знарядь.

**Методи дослідження.** Для виконання поставлених завдань застосовувалися методи аналітичної, диференціальної, обчислювальної, нарисної геометрії; апроксимації та інтерполяції; математичного аналізу; теорії множин і графів; комп'ютерної графіки; теорії алгоритмів; програмування; проектування, виготовлення та експлуатації ґрунтообробних знарядь; структурно-параметричної оптимізації.

**Теоретичною базою** виконаних досліджень є праці вітчизняних і закордонних учених з теорії кривих та поверхонь, обчислювальної геометрії, моделювання об'єктів, процесів і явищ, конструювання, виготовлення та експлуатації сільськогосподарської техніки.

**Наукова новизна отриманих результатів.**

*Уперше:*

– *розроблено* спеціальну теорію, методологію та інструментарій інтегрованого комплексного геометричного моделювання для якісно нового дослідження багатопараметричних складних технічних об'єктів і процесів на прикладі ґрунтообробних знарядь;

– *розроблено* нові способи комп'ютерного інтегрованого комплексного геометричного моделювання (спосіб інтегрованих класифікацій для автоматизованого формоутворення груп технічних об'єктів; спосіб узагальненого контуру; спосіб зменшення області проектних розв'язків);

– *розроблено* на основі напрацьованих способів нові інтегровані комплексні геометричні моделі полицевих, дискових і чизельних сільськогосподарських знарядь;

– *розроблено* узагальнену геометричну модель робочих поверхонь широкої номенклатури полицевих і чизельних знарядь з метою здійснення комплексної оптимізації;

– *визначено* залежності змінювання кутів розпушення, обертання та зсуву ґрунту полицевих робочих поверхонь, що особливо важливо для забезпечення високих агротехнічних показників сільськогосподарських знарядь;

– *обґрунтовано* можливість використання методології інтегрованого комплексного геометричного моделювання в інших, крім сільського господарства, сферах життєдіяльності.

*Удосконалено:*

– базові положення структурно-параметричного формоутворення методологією інтегрованого комплексного геометричного моделювання.

*Отримали подальший розвиток:*

– теоретичне ядро прикладної геометрії в частині розроблення спеціальної теорії інтегрованого комплексного геометричного моделювання для якісно нового дослідження багатопараметричних складних технічних об'єктів і процесів;

– теорія автоматизованого проєктування технічних об'єктів у вигляді запропонованих інтегрованих комплексних геометричних моделей на прикладі ґрунтообробних знарядь.

**Обґрунтованість і достовірність результатів** забезпечено належним використанням математичного апарату для досліджуваних геометричних фігур, опрацьовуваних технічних об'єктів і процесів, здійсненням комп'ютерних експериментів та виконаними впровадженнями.

**Практичне значення отриманих результатів** полягає в забезпеченні актуальних потреб у нових високоефективних засобах комп'ютерного моделювання технічних об'єктів із метою підвищення їхньої якості під час проєктування, виготовлення та експлуатації. Отримані здобутки проілюстровано на прикладі методології інтегрованого комплексного автоматизованого формоутворення ґрунтообробних знарядь. Напрацьовані результати впроваджено: в Іванівській дослідно-селекційній станції Інституту біоенергетичних культур і цукрових буряків Національної академії аграрних наук України при виконанні обробітку ґрунту дисками, виготовленими за запропонованими в дисертації геометричними моделями (Акт №11 від 20.06.2021); у фермерському господарстві «Павільйон флори» Миргородського району Полтавської області під час проведення лабораторно-польових експериментальних досліджень дискових поверхонь, виконаних згідно з методикою здобувача (Акт №145 від 27.09.2021); у навчальний процес КПІ ім Ігоря Сікорського при викладанні дисципліни «Інженерна та комп'ютерна графіка» студентам машинобудівних спеціальностей (Акт №3 від 22.12.2022) і на факультеті інформатики та обчислювальної техніки під час формування комплексних комп'ютерних геометричних моделей технічних об'єктів (Акт №69/1 від 26.12.2023); у Науково-виробничому підприємстві «Техногаз» м. Полтави застосуванням розробленого підходу та способів комп'ютерного моделювання, що сприяють покращенню інтеграції складових комплексної підготовки газу (Акт №04/Т/10-22/2 від 04.10.2022); у ТОВ «Інноваційні інженерні рішення» м. Києва використанням напрацьованої методології при створенні проєктів будівельно-монтажних робіт (Акт №67/1 від 20.09.2023).

**Особистий внесок здобувача.** Усі положення, що виносяться на захист і складають наукову новизну отримано особисто автором даного дисертаційного дослідження. У виданнях за участю співавторів результати здобувача вказано у списку його публікацій за темою дисертації.

**Апробація матеріалів дисертації.** Матеріали дисертації доповідалися на 21 конференції, а саме: I, II, III, V, VII міжнародній науково-практичній конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Прикладна геометрія, дизайн, об'єкти інтелектуальної власності та інноваційна діяльність» (м. Київ, 2012 р., 2013 р., 2014 р., 2016 р., 2018 р.); 19 і 21 міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні проблеми геометричного моделювання» (м. Мелітополь, 2017 р., 2019 р.); XVIII міжнародній конференції з математичного моделювання (м. Херсон, 2017 р.); XIV, XV, XVII, XVIII міжнародній науково-практичній конференції «Обухівські

читання» (м. Київ, 2019 р., 2020 р., 2023 р., 2024 р.); міжнародній науково-практичній конференції «Графічні технології моделювання об'єктів, процесів та явищ» (м. Одеса, 2020 р.); 16 International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems (м. Львів, 2021 р.); XI, XII та XIII міжнародній науково-практичній конференції «Прикладна геометрія, інженерна графіка та об'єкти інтелектуальної власності» (м. Київ, 2022 р., 2023 р., 2024 р.); 24 та 26 міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні проблеми геометричного моделювання» (Запоріжжя, 2022 р., 2024 р.); XIII та XIV міжнародній науково-практичній конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» (Чернігів, 2023 р., 2024 р.).

**Публікації.** За темою дисертаційного дослідження опубліковано 64 роботи, зокрема: 2 – монографії; 4 – у виданнях, проіндексованих у базах даних Scopus/WoS; 24 – у наукових фахових виданнях України; 2 – у наукових періодичних виданнях інших держав; 5 – патентів на корисну модель; 25 – у матеріалах конференцій; 2 – додаткові публікації.

**Структура та обсяг дисертації.** Робота складається з анотацій, вступу, шести розділів, загальних висновків, списку використаних джерел із 369 найменувань та 3 додатків. Повний обсяг дисертації (з анотаціями) становить 424 сторінки, містить 153 рисунки, 16 таблиць. Основна частина – 277 сторінок, список використаних джерел – 45 сторінок, додатки – 73 сторінки.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

У **вступі** подано загальну характеристику дисертації, обґрунтовано актуальність обраної теми, визначено мету та завдання виконаного дослідження, наведено наукову новизну отриманих результатів, відомості про їхню апробацію і впровадження у практику, кількість публікацій здобувача.

У **першому розділі** «Сучасний стан геометричного моделювання ґрунтообробних знарядь» опрацьовані літературні джерела систематизовано за такими напрямками, як: геометричне моделювання технічних об'єктів, процесів їхнього виготовлення та експлуатації; комп'ютерне автоматизоване формування; методологія структурно-параметричного геометричного моделювання; системи землеробства; створення сільськогосподарської техніки, підвищення її якості, перспективи автоматизації; актуальні задачі землеробської механіки; моделювання технологічних процесів обробітку ґрунту.

Було зроблено наступні висновки.

1. Для сучасного автоматизованого проектування технічних об'єктів фундаментальну складову становлять теоретичні засади, методологія та інструментарій прикладної геометрії. Тому важливою науково-прикладною проблемою є розширення теоретичного ядра прикладної геометрії шляхом розроблення спеціальної теорії інтегрованого комплексного геометричного моделювання для якісно нового дослідження багатопараметричних складних технічних об'єктів і процесів, зокрема на прикладі ґрунтообробних знарядь. Нині доволі розповсюджене використання створюваних на основі раціональних параметричних кривих різноманітних ліній, поверхонь і тіл, що забезпечує гнучкі продуктивні побудови та належне змінювання геометрії об'єктів для їхньої оптимізації. Це дозволило визначити перспективні напрямки проведення наукових досліджень для покращення відповідних засобів.

2. Сучасне автоматизоване конструювання технічних об'єктів реалізується в середовищі інтегрованих CAD/CAM/CAE/PLM систем, наприклад, Inventor, SolidWorks та ін. Для здійснення розрахунків, побудови графіків, діаграм тощо застосовуються математичні пакети, наприклад, Matlab, Maple та ін. Наведені два класи комп'ютерних програм взаємно доповнюють один одного. Тому актуальні задачі поєднання можливостей цих засобів автоматизованого формоутворення.

3. Для параметричного конструювання структурно-параметричне формоутворення є теоретичним узагальненням, оскільки зберігає кращі властивості зазначеної методології і збільшує її можливості завдяки поєднанню теорії кривих та поверхонь, множин і графів, оптимізації. На поточному етапі цей інструментарій потребує подальшого покращення шляхом як удосконалення базових теоретичних засад, так і розширення сфери практичного впровадження.

4. Створення нової інноваційної методології інтегрованого комплексного геометричного моделювання, за рахунок якісного формоутворення сільськогосподарських знарядь, дозволить підвищувати врожайність, зберігати родючість ґрунтів, забезпечувати заощадження ресурсів.

5. Стосовно сільськогосподарської техніки акцентовано важливість підвищення продуктивності ґрунтообробних знарядь, визначення оптимальних параметрів і характеристик їхнього виготовлення та експлуатації. Зазначено, що ефективно розв'язання наведених задач можливе з використанням запропонованої в даній дисертації методології інтегрованого комплексного геометричного моделювання.

6. Для землеробської механіки актуальні питання формування вдосконалених теоретичних засад обробляння ґрунтів, застосування прогресивних методів конструювання, розрахунків на міцність, використання досягнень інших наук, зокрема, прикладної геометрії та інженерної графіки. У багатьох випадках проектування основою для узгодження суперечливих вимог різних дисциплін під час оптимізації ґрунтообробних знарядь постають їхні геометричні моделі. Це підтверджує перспективність зазначеної методології для даної галузі.

7. Опрацювання технологічних процесів обробки ґрунту включає математичні описи використовуваних машин і механізмів, їхніх робочих органів, методики вибору конструкцій відповідно до умов господарювання тощо. Успішне виконання окреслених завдань значною мірою спирається на якісні геометричні моделі, що визначає необхідність відповідного вдосконалення останніх.

Отже, подані вище висновки суттєвим чином обумовили зміст і характер виконаних далі наукових розвідок.

У **другому розділі** «*Теоретичні засади інтегрованого комплексного геометричного моделювання ґрунтообробних знарядь*» напрацьовано спеціальну теорію, методологію та інструментарій інтегрованого комплексного формоутворення технічної продукції, що проілюстровано на прикладі ґрунтообробних знарядь. Акцентовано, що під «комплексним» розуміється взяття до уваги вимог багатьох дисциплін (конструкції, міцності, технології виготовлення, експлуатації, економіки, екології тощо) на певній стадії життєвого циклу технічного об'єкта, тобто його проектування, виробництва, експлуатації, а під «інтегрованим» – забезпечення ефективного поєднання зазначених стадій із метою їхньої оптимізації.

Опрацьований динамічний геометричний об'єкт  $O$  (або процес) описується як функціональна залежність  $f$  у наступному узагальненому вигляді



$$O = f(p_1, \dots, p_i, \hat{p}_1, \dots, \hat{p}_j, \tilde{p}_1, \dots, \tilde{p}_k), \quad (1)$$

де  $p_i$  та  $\hat{p}_j$  – неперервні та дискретні геометричні параметри;  
 $\tilde{p}_k$  – параметри інших дисциплін.

У виразі (1) наведені величини можуть бути пов'язані математичними залежностями, а параметри інших дисциплін також поділятися на неперервні та дискретні. У даному співвідношенні динамічним вважається об'єкт  $O$  при варіюванні довільних його параметрів. Останнє становить узагальнення випадку, коли під динамічною мається на увазі система, змінювана тільки від часу, як це робиться, наприклад, у теоретичній механіці. Тоді дефініція радіус-вектора  $\mathbf{r}$  точок об'єкта  $O$  в динамічному аспекті має вигляд

$$\mathbf{r} = f(p_1(t), \dots, p_i(t), \hat{p}_1(t), \dots, \hat{p}_j(t), \tilde{p}_1(t), \dots, \tilde{p}_k(t)), \quad (2)$$

де  $t$  – це деяка множина з параметрів (1).

Таким чином, незалежними залишаються величини  $t$ , а решта стають залежними, тобто характеристиками об'єкта  $O$ . Завдяки параметрам інших дисциплін подані формули для технічних виробів мають вимірність простору, більшу за три. В описаний спосіб здійснюється інтеграція геометричних моделей реальних фізичних тіл з ідеалізованим проектним простором.

Отже, технічний об'єкт  $O$  визначається в багатовимірному  $N_{p_o}$ -просторі

$$N_{p_o} = N_p + N_{\hat{p}} + N_{\tilde{p}}, \quad (3)$$

де  $N_p$  та  $N_{\hat{p}}$  – число неперервних і дискретних геометричних параметрів;

$N_{\tilde{p}}$  – кількість параметрів інших дисциплін.

При цьому

$$N_p = 0 \dots i, \quad N_{\hat{p}} = 0 \dots j, \quad N_{\tilde{p}} = 0 \dots k. \quad (4)$$

де  $i, j, k$  – відповідають множині (1).

Як видно з приведених формул (1) ... (4), ймовірно неперервне, дискретне або неперервно-дискретне подання геометричного об'єкта  $O$ . Це стосується також і його описів іншими дисциплінами. Конкретні приклади належного формоутворення розглядаються в наступних матеріалах дисертації.

Згідно з напрацьованою науковою школою геометричного моделювання КПШ ім. Ігоря Сікорського структурно-параметричною методологією склад модельованого об'єкта  $O$  подається упорядкованою множиною

$$O = (o_i)_{i=1}^N, \quad (5)$$

де  $o_i$  – частини, компоненти тощо цього об'єкта,

$N$  – їхня кількість.

Можливі різновиди  $o_i$  відтворюються кортежем

$$o_i = (o_{ij})_{j=1}^{N_i}, \quad (6)$$

та векторами параметрів

$$P_{ij} = (p_{ijk})_{k=1}^{N_{pij}}, \quad (7)$$

де  $N_{pij}$  – кількість параметрів  $j$ -го варіанта  $i$ -ї частини.

Структурний зв'язок між зазначеними різновидами відображають матриці суміжності

$$C_{n,m} = [c_{nr,ms}] \quad (8)$$

де  $c_{n_r, m_s} \neq 0$  при можливій взаємодії варіантів  $o_{n_r}$  та  $o_{m_s}$ ,  $c_{n_r, m_s} = 0$  – у протилежному випадку.

Після комбінаторного синтезу системи з окремих її частин (5) ... (8) отримуємо множину різновидів проєктованого об'єкта

$$O = (O_n)_{n=1}^{N_o} \quad (9)$$

Наявні базові принципи структурно-параметричного формоутворення, тобто системного підходу, варіантності, оптимальності, відкритості та розвитку, комплексного підходу доповнено *принципом інтеграції*, який полягає не тільки в поєднанні етапів життєвого циклу промислової продукції, а й відповідних засобів геометричного моделювання у вигляді належного математичного апарату.

Останнє забезпечує продуктивне виконання комплексного оптимального формоутворення технічних об'єктів під час їхнього проєктування, виготовлення та експлуатації. Так отримуємо якісно нові інтегровані комплексні геометричні моделі. Автором дисертації доповнено залежності (5) ... (9) використанням для їхніх елементів *циклічних* операцій формоутворення. За даних умов, зокрема, кортеж (5) розглядається як мультимножина, до складу якої можуть входити повторювальні елементи  $o_i$ . Це дозволяє узагальнити існуючий математичний апарат, підвищити ефективність його практичного використання. Тоді кортеж (5) переписується у вигляді

$$O = (o_{k_i})_{i=1}^N, \quad (10)$$

де компоненти

$$o_{k_i} = (o_i)_{i=1}^{k_i} = k_i o_i, \quad (11)$$

а  $k_i$  – коефіцієнт кратності елемента  $o_i$ , тобто кількість його екземплярів.

Приклади застосування циклічних операцій (10) та (11) подано в четвертому розділі дисертації для дискових робочих органів сільськогосподарських знарядь.

Розглянуті загальні теоретичні положення послугували основою нових способів, які взаємно доповнюють один одного, для комп'ютерного інтегрованого комплексного геометричного моделювання промислової продукції, процесів її виготовлення та експлуатації.

#### *Спосіб інтегрованих класифікацій для автоматизованого геометричного моделювання груп технічних об'єктів*

Відомо, що геометричні моделі поєднують поміж собою в єдине ціле інші моделі опрацьовуваних промислових виробів, наприклад, їхньої міцності, технології виготовлення, експлуатації і т. д. Цим забезпечується проведення комплексної оптимізації створюваної продукції для всього її життєвого циклу. У зв'язку з великою номенклатурою останньої, з одного боку, та певною подібністю її різновидів, з іншого, важлива задача ефективного формоутворення належних груп технічних об'єктів. Мається на увазі розробляння не індивідуальних геометричних моделей, а узагальнених. Це потребує проведення відповідної класифікації як засобів формоутворення, так й опрацьовуваної продукції.

В основу запропонованої класифікації засобів автоматизованого формоутворення, яка є інваріантною по відношенню до різноманітних технічних об'єктів, покладено систематизацію фігур за вимірністю та способами їхнього моделювання.

Геометричні фігури  $\Gamma\Phi$  становлять множину

$$G\Phi = (G\Phi_i)_{i=0}^{N_{G\Phi}} = (G\Phi_i)_{i=0}^5, \quad (12)$$

де  $G\Phi_0 = TЧ$  – точки,  $G\Phi_1 = ЛН$  – лінії,  $G\Phi_2 = ПВ$  – поверхні,  $G\Phi_3 = ТЛ$  – тіла,  $G\Phi_4 = БФ$  – багатовимірні фігури,  $G\Phi_5 = КФ$  – комбіновані фігури.

Геометричні способи  $ГС$  моделювання фігур (12) визначаються кортежем

$$ГС = (ГС_i)_{i=1}^{N_{ГС}} = (ГС_i)_{i=1}^2, \quad (13)$$

де  $ГС_1 = ГСС$  – способи створення,  $ГС_2 = ГСМ$  – способи модифікації.

Далі елементи (13) подаються у вигляді

$$ГС_1 = (ГС_{1j})_{j=1}^{N_{ГС_1}} = (ГС_{1j})_{j=1}^2, \quad (14)$$

де  $ГС_{11} =$  кінематичні,  $ГС_{12} =$  аналітичні;

$$ГС_2 = (ГС_{2j})_{j=1}^{N_{ГС_2}} = (ГС_{2j})_{j=1}^3, \quad (15)$$

де  $ГС_{21} =$  рух і симетрія,  $ГС_{22} =$  деформація,  $ГС_{23} =$  булеві операції.

Компоненти множин (14) та (15) уточнюються наступним чином

$$ГС_{11} = (ГС_{11k})_{k=0}^{N_{ГС_{11}}} = (ГС_{11k})_{k=0}^5, \quad (16)$$

де для  $ГС_{11k}$  індексу  $k$  відповідають твірні фігури формули (12);

$$ГС_{12} = (ГС_{12k})_{k=1}^{N_{ГС_{12}}} = (ГС_{12k})_{k=1}^2, \quad (17)$$

де  $ГС_{121} =$  алгебраїчні,  $ГС_{122} =$  трансцендентні;

$$ГС_{21} = (ГС_{21k})_{k=1}^{N_{ГС_{21}}} = (ГС_{21k})_{k=1}^4, \quad (18)$$

де  $ГС_{211} =$  прямолінійний,  $ГС_{212} =$  обертальний,  $ГС_{213} =$  складний,  $ГС_{214} =$  симетрія;

$$ГС_{22} = (ГС_{22k})_{k=1}^{N_{ГС_{22}}} = (ГС_{22k})_{k=1}^2, \quad (19)$$

де  $ГС_{221} =$  зміна розмірів,  $ГС_{222} =$  зміна форми;

$$ГС_{23} = (ГС_{23k})_{k=1}^{N_{ГС_{23}}} = (ГС_{23k})_{k=1}^3, \quad (20)$$

де  $ГС_{231} =$  віднімання,  $ГС_{232} =$  об'єднання,  $ГС_{233} =$  перетин.

Для конкретних умов геометричного моделювання множини (16) ... (20) подаються більш докладно.

На засадах літературних джерел і структурно-параметричного підходу систематизовано ґрунтообробні знаряддя  $ГЗ$  у вигляді

$$ГЗ = (ГЗ_i)_{i=1}^{N_{ГЗ}} = (ГЗ_i)_{i=1}^3, \quad (21)$$

де  $ГЗ_1 = ГЗО$  – основного,  $ГЗ_2 = ГЗП$  – поверхневого,  $ГЗ_3 = ГЗС$  – спеціального обробітку.

За глибиною обробіток ґрунту  $ОГ$  визначається кортежем

$$ОГ = (ОГ_i)_{i=0}^{N_{ОГ}} = (ОГ_i)_{i=0}^5, \quad (22)$$

де  $ОГ_0 = БО$  – без обробітку,  $ОГ_1 = ПВ$  – поверхневий (до 8 см),  $ОГ_2 = МЛ$  – мілкий (8 ... 16 см),  $ОГ_3 = СР$  – середній (16 ... 24 см),  $ОГ_4 = ГЛ$  – глибокий (24 ... 35 см),  $ОГ_5 = МЛР$  – меліоративний (понад 35 см).

ґрунтообробні знаряддя для основного обробітку представимо множиною

$$ГЗО = (ГЗО_i)_{i=1}^{N_{ГЗО}} = (ГЗО_i)_{i=1}^3, \quad (23)$$

де  $ГЗО_1 = ПГЗ$  – полицеві,  $ГЗО_2 = ДГЗ$  – дискові,  $ГЗО_3 = ЧГЗ$  – чизельні.

У дисертації компоненти кортежів (21) ... (23) проаналізовано докладно, що засвідчило велике розмаїття конкретних знарядь. Це стосується й поданої вище систематизації геометричних засобів. Тому для підвищення ефективності комп'ютерного проектування продукції сільськогосподарського машинобудування та інших промислових виробів напрацьовано спосіб інтегрованих класифікацій. Викладено загальну методику його застосування. Використання розглянуто на прикладі ґрунтообробних дисків у четвертому розділі.

#### *Спосіб зменшення області проектних розв'язків*

Одним із ключових моментів запропонованої методології моделювання є інтеграція засобів та об'єктів формоутворення, зокрема, параметрів і характеристик геометричних та інших дисциплін, див. вираз (1). Спосіб зменшення області проектних розв'язків теж становить одну з інваріантних складових напрацьованої інтегрованої комплексної методології. Її головною ідеєю полягає в поступовій раціональній дефініції одного або кількох варіантів створюваного виробу, які з геометричних позицій являють собою певні точки в  $N_{Po}$ -вимірному просторі, див. формули (1) ... (4).

Рекомендований порядок дій зводиться до послідовного зменшення для проєктованого об'єкта (1) вихідної багатовимірної області допустимих розв'язків, що визначена в деякому вигляді, наприклад проміжками

$$p_i \in [p_{i_{\min}}, p_{i_{\max}}], \hat{p}_j \in [\hat{p}_{j_{\min}}, \hat{p}_{j_{\max}}], \tilde{p}_k \in [\tilde{p}_{k_{\min}}, \tilde{p}_{k_{\max}}]. \quad (24)$$

При цьому в конкретних випадках застосовуються такі операції, як перетин ліній, поверхонь, тіл тощо. Зауважимо, що наявний простір інтегрований та комплексний, оскільки охоплює геометричні параметри й характеристики проєктованих технічних об'єктів та їхні належні величини інших дисциплін. Типовими прийомами є широке використання переваг геометричних моделей щодо їхньої наочності у дво- і тривимірному просторі. Тому досліджуваний багатовимірний об'єкт (1) відтворюється необхідною сукупністю ліній та поверхонь

$$F = ((f_i(u_i))_{i=1}^{N_{f_i}}, (f_n(u_{j_n}, v_{k_n}))_{n=1}^{N_{f_n}}), \quad (25)$$

де  $u_i, u_{j_n}, v_{k_n}$  – параметри об'єкта  $O$ ;

$(f_i(u_i))_{i=1}^{N_{f_i}}, (f_n(u_{j_n}, v_{k_n}))_{n=1}^{N_{f_n}}$  – множини функціональних залежностей ліній і поверхонь.

Практичне застосування даного способу, виразів (24) та (25) для деталей загального машинобудування проаналізовано у другому, а для ґрунтообробних знарядь – у п'ятому розділі дисертації.

#### *Спосіб узагальненого контуру*

З представлених вище теоретичних положень інтегрованого комплексного автоматизованого геометричного моделювання видно, що головний акцент робиться на створенні відповідної узагальненої методології. Відомо, що при комп'ютерному формоутворенні для багатьох деталей важливий етап побудови їхніх контурів, які становлять основу для визначення потрібних поверхонь і тіл.

Запропонований спосіб доволі універсальний, придатний для проектування груп технічних об'єктів. Її головною перевагою полягає в забезпеченні продуктивного аналізу чисельних різновидів виробів. При цьому необхідний узагальнений контур  $UK$  формується на засадах використання певних ліній

$$UK = (UK_i)_{i=1}^{N_{UK}}. \quad (26)$$

На основі кортежу (26) створюється множина  $KД$  контурів деталей

$$KД = (KД_j)_{j=1}^{N_{KД}}, \quad (27)$$

де

$$KД_j = (KД_{jk})_{k=1}^{N_{KДj}}, \quad KД_{jk} \in UK. \quad (28)$$

Завдяки структурно-параметричному підходу до множин (26) ... (28) реалізується компроміс між кількістю  $N_{KД}$  елементів  $KД_j$  та їхньою складністю щодо охоплення геометрії деякої групи виробів. У якості компонентів  $UK_i$  можуть застосовуватися всілякі лінії, наприклад, алгебраїчні та трансцендентні. Практичне використання даного підходу для варіантного автоматизованого конструювання різального інструменту наведено у другому, а для робочих органів полицевих і чизельних знарядь – у третьому розділі дисертації.

#### *Криві Безьє зі степеневою параметризацією*

Завдяки простоті та передбачуваності криві Безьє доволі популярні для комп'ютерного геометричного моделювання багатьох промислових виробів. При цьому застосовуються вказані лінії різних степенів, серед яких найбільш розповсюджені кубічні і квадратичні, що пов'язано з їхньою достатньою гнучкістю, прогнозованим характером формоутворення, ефективністю програмної реалізації. Однак, у певних випадках виникає необхідність у кривих Безьє й вищих степенів. Наведені факти обумовлюють потребу подальшого покращення відповідного математичного апарату. У дисертації проаналізовано вдосконалення обчислення площ трапецій, обмежених лініями Безьє різних степенів. Головний же здобуток у зазначеному плані становить запропоноване узагальнення даних кривих на основі їхньої степеневої параметризації.

Відомий вираз для радіус-вектора  $\mathbf{r}(u)$  лінії Безьє  $n$ -го степеня має вигляд

$$\mathbf{r}(u) = \sum_{k=0}^n \frac{n!}{k!(n-k)!} u^k (1-u)^{n-k} \mathbf{r}_k, \quad (29)$$

де  $\mathbf{r}_k$  – радіус-вектори вершин характеристичної ламаної (опорних точок);

$u \in [0, 1]$  – параметр;

$n \in \mathbb{N}$ .

Геометричну інтерпретацію залежності (29) становить алгоритм де Кастельє. Послідовність його дій полягає спочатку в поєднанні всіх опорних точок відрізками прямих з отриманням належної характеристичної ламаної з числом ланок  $n$ . Далі кожна з них поділяється у співвідношенні

$$u : (1-u) \quad (30)$$

і з'єднуються вказані точки. Таким чином маємо нову ламану з кількістю ланок  $n-1$ . Описаний процес повторюється до дефініції лише однієї точки.

Кількість ланок-відрізків становить

$$N_L = \sum_{k=1}^n k. \quad (31)$$

Запропоновано узагальнення лінійної параметризації вигляду (30) степеневою

$$u^{mk} : (1-u^{mk}), \quad (32)$$

де індекс  $k$  відповідає залежності (31).

При  $m_k=1$ ,  $k \in (1 \dots N_L)$  співвідношення (32) відтворює вираз (30).

Проаналізовано криві Безьє другого степеня, тобто коли  $n=2$ . Згідно з формулами (29) ... (32) для лінійної параметризації маємо

$$\mathbf{r}(u) = (1-u)^2 \mathbf{r}_0 + 2u(1-u) \mathbf{r}_1 + u^2 \mathbf{r}_2, \quad u \in [0, 1], \quad (33)$$

а для степеневий

$$\mathbf{r}(u) = ((1-u^{m_1}) \mathbf{r}_0 + u^{m_1} \mathbf{r}_1)(1-u^{m_3}) + u^{m_3} ((1-u^{m_2}) \mathbf{r}_1 + u^{m_2} \mathbf{r}_2), \quad u \in [0, 1]. \quad (34)$$

Залежність (33) одержуємо з виразу (34) за умови  $m_1=m_2=m_3=1$ .

Обґрунтовано деякі властивості досліджуваної кривої вигляду

$$\mathbf{r}(u) = ((1-u^{m_1}) \mathbf{r}_0 + u^{m_1} \mathbf{r}_1)(1-u) + u((1-u^{m_2}) \mathbf{r}_1 + u^{m_2} \mathbf{r}_2), \quad u \in [0, 1]. \quad (35)$$

Важливим для конструювання багатьох технічних об'єктів у середовищі комп'ютерних інформаційних технологій є реалізація побудов складених обводів нульового, першого та другого порядку гладкості.

Підстановка до виразу (35) величин  $u=0$  та  $u=1$  засвідчує, що

$$\mathbf{r}(0) = \mathbf{r}_0 \text{ і } \mathbf{r}(1) = \mathbf{r}_2, \quad (36)$$

тобто при цих значеннях параметра  $u$  крива проходить через точки  $\mathbf{r}_0$  та  $\mathbf{r}_2$ .

Показано, що опрацьовувана дуга на кінцях (36) має дотичні, які за своїм напрямом збігаються з належними ланками характеристичного трикутника. Дотична лінії (35) у декартовій системі координат  $Oxy$  обчислюється за формулою

$$\frac{dy}{dx} = \frac{dy}{dx}(u) = \frac{dy(u)}{dx(u)} = \frac{dy(u)/du}{dx(u)/du} = \frac{d\mathbf{r}_y(u)}{d\mathbf{r}_x(u)}, \quad (37)$$

де

$$d\mathbf{r}_y(u) = (u^{m_1} - 1)y_0 - (u^{m_2} - 1)y_1 + m_1 u^{m_1-1}(u-1)(y_0 - y_1) - m_2 u^{m_2}(y_1 - y_2) - u^{m_1} y_1 + u^{m_2} y_2, \quad (38)$$

$$d\mathbf{r}_x(u) = (u^{m_1} - 1)x_0 - (u^{m_2} - 1)x_1 + m_1 u^{m_1-1}(u-1)(x_0 - x_1) - m_2 u^{m_2}(x_1 - x_2) - u^{m_1} x_1 + u^{m_2} x_2. \quad (39)$$

На підставі виразів (37) ... (39) для  $m_1 > 1$  та  $m_2 > 0$  отримуємо

$$\frac{dy}{dx}(0) = \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0}, \quad \frac{dy}{dx}(1) = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}. \quad (40)$$

Співвідношення (40) підтверджують збереження дотичних на кінцях кривої Безьє зі степеневою параметризацією. Для промислової продукції актуальне змінювання кривини проєктованих обводів. Для плоских ліній, що аналізуються, ця величина визначається залежністю

$$k(u) = \left| \frac{dx(u)}{du} \cdot \frac{dy^2(u)}{du^2} - \frac{dx^2(u)}{du^2} \cdot \frac{dy(u)}{du} \right| / \left( \left( \frac{dx(u)}{du} \right)^2 + \left( \frac{dy(u)}{du} \right)^2 \right)^{3/2}. \quad (41)$$

Для звичайної кривої Безьє другого степеня

$$\frac{dx(u)}{du} = 2 \cdot U \cdot X, \quad \frac{dx^2(u)}{du^2} = C \cdot X, \quad \frac{dy(u)}{du} = 2 \cdot U \cdot Y, \quad \frac{dy^2(u)}{du^2} = C \cdot Y, \quad (42)$$

де  $U=[u-1 \ 1-2u \ u]$ ,  $C=[2 \ -4 \ 2]$ ,  $X=[x_0 \ x_1 \ x_2]^T$ ,  $Y=[y_0 \ y_1 \ y_2]^T$ .

Для кривої Безьє зі степеневою параметризацією

$$\frac{dx(u)}{du} = U_1 \cdot X, \quad \frac{dy(u)}{du} = U_1 \cdot Y, \quad (43)$$

де  $U_1=[f_1 \ -(f_1+f_2) \ f_2]$ ,  $f_1=(m_1+1)u^{m_1}-m_1u^{m_1-1}-1$ ,  $f_2=(m_2+1)u^{m_2}$ ,

$$\frac{dx^2(u)}{du^2} = U_2 \cdot X, \quad \frac{dy^2(u)}{du^2} = U_2 \cdot Y, \quad (44)$$

де  $U_2 = [f_3 \quad -(f_3 + f_4) \quad f_4]$ ,  $f_3 = m_1(m_1 + 1)u^{m_1 - 1} - m_1(m_1 - 1)u^{m_1 - 2}$ ,  $f_4 = m_2(m_2 + 1)u^{m_2 - 1}$ .

Співвідношення (41) ... (44) дозволяють обчислювати кривину ліній Безьє, що розглядаються. Аналіз формул (43), (44) показує, що  $m_1$  та  $m_2$  повинні задовольняти умові

$$m_1 \geq 2, \quad m_2 \geq 1. \quad (45)$$

Підстановка до залежностей (44)  $u=0$ , а потім отриманих значень до виразу (41) доводить, що для

$$m_1 > 2, \quad m_2 > 1 \quad (46)$$

кривина  $k$  у цій точці дорівнює нулю.

Досліджено вплив величин (45) і (46), див. для прикладу рис. 1, де більш товстою зображено криву Безьє з лінійною параметризацією, а тоншою – зі степеневою. Штрихові прямі відтворюють дотичні в початковій та кінцевій точках. Рівняння (33) свідчить, що форма звичайної кривої Безьє стала. У випадку (34) варіювання параметрів  $m_k$  призводить до певних модифікацій.

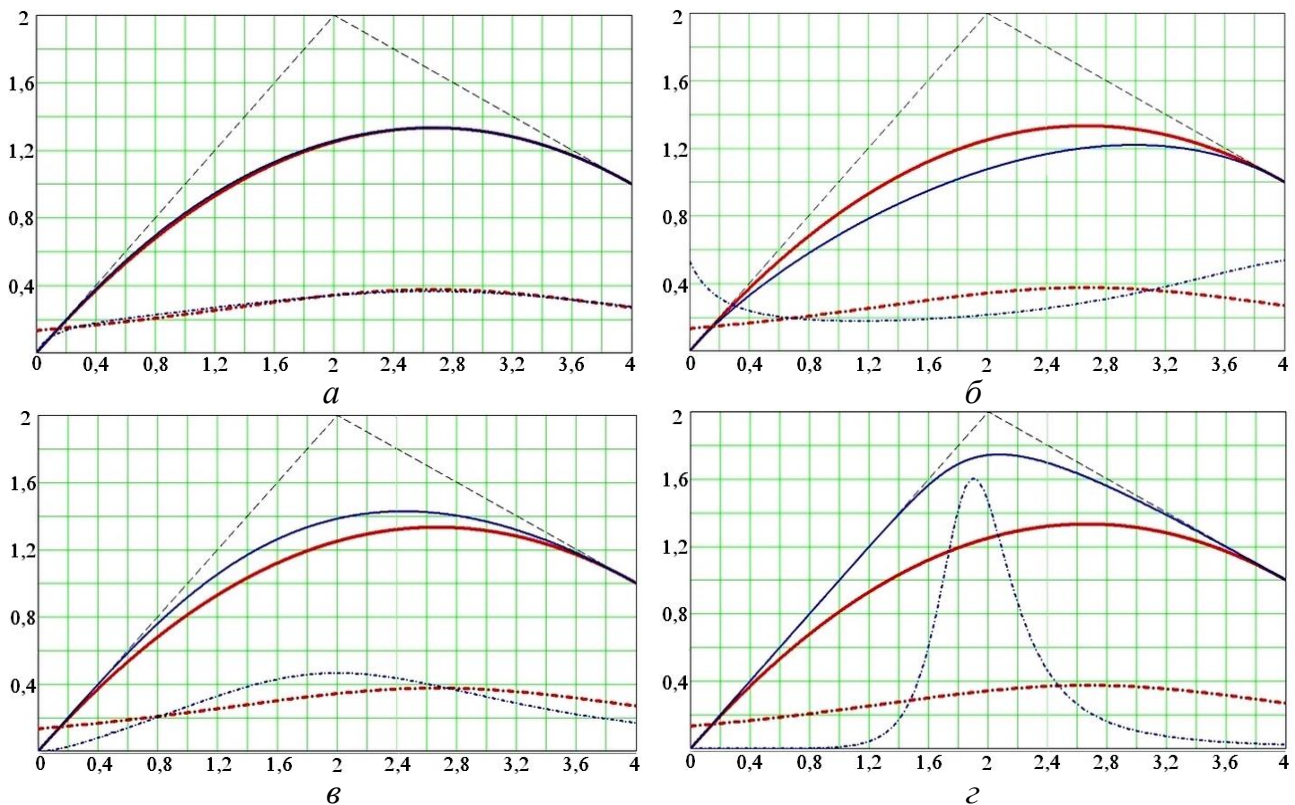


Рис. 1. Лінії Безьє другого степеня та їхня кривина:  
 а –  $m_1=2$  і  $m_2=1,8$ ; б –  $m_1=2$  та  $m_2=1$ ; в –  $m_1=2,5$  і  $m_2=3$ ; г –  $m_1=2,5$  та  $m_2=10$

На рис. 1, а криві зі степеневою та лінійною параметризацією практично збігаються. Це стосується і змінювання кривини, яке відтворюють штрихпунктирні лінії. Головна відмінність полягає у кривині в початковій точці, що для першого випадку дорівнює нулю. Даний інваріант для значень (46) забезпечує зручне додавання до складених обводів відрізків прямих, поширених при моделюванні технічних об'єктів, реалізуючи гладкість другого порядку. Цього звичайна лінія Безьє другого степеня зробити не може.

Також маємо незалежність кривини в точці  $\mathbf{r}_0$  від положення  $\mathbf{r}_1$  та  $\mathbf{r}_2$ . Тобто розташування останніх модифікується довільно, зберігаючи гладкість другого порядку в  $\mathbf{r}_0$ . Описане виконується, зокрема, якщо до прямолінійного відрізка додається ще одна крива Безьє зі степеневою параметризацією. Можливе їхнє гладке поєднання й без проміжного відрізка.

Ненульову кривину в точці  $\mathbf{r}_0$  ілюструє рис. 1, б, коли лінія зі степеневою параметризацією розміщується нижче звичайної кривої Безьє, а рис. 1, в – якщо вище. Більш відмінний варіант відтворює зображення рис. 1, г. Як видно, існують механізми прогнозованого керування формою та розмірами запропонованої лінії, її дотичними на кінцях і змінюванням кривини. Степенева параметризація, порівняно зі звичайною кривою Безьє, забезпечує додаткову гнучкість для формоутворення технічних об'єктів. Це продемонстровано на прикладі геометричного моделювання серединних поверхонь газових балонів із дотриманням гладкості другого порядку.

Отже, в цій частині дисертації напрацьовано теоретичні основи, методологію та інструментарій інтегрованого комплексного геометричного моделювання багатопараметричних складних технічних об'єктів і процесів, які послуговували базою для виконаного далі автоматизованого формоутворення ґрунтообробних знарядь.

У **третьому розділі** «Геометричне моделювання робочих органів полицевих та чизельних знарядь» основний акцент спрямовано на доцільність запропонованих узагальнених моделей для підвищення продуктивності комп'ютерних побудов. Підкреслено важливий в аспекті інтеграції та комплексного підходу момент, що такі засоби здатні ефективно охоплювати також доволі різні знаряддя з точки зору обробітку ґрунту. У даному разі це полицеві та чизельні, див. вираз (23).

Аналіз літературних джерел показав, що для зазначених робочих органів застосовуються лінійчасті поверхні, зовнішній контур яких можна розглядати як топологічний чотирикутник. Основними недоліками наявних методик є їхня придатність до виконання тільки графічними методами, відсутність орієнтації на комп'ютерну техніку, значна трудомісткість побудови великого числа варіантів проєктованих поверхонь, брак гнучкого і прогнозованого змінювання форми та розмірів досліджуваних робочих органів, неможливість точної реалізації в системах CAD/CAM/CAE. Це послуговувало вихідними вимогами для напрацювання відповідного нового математичного апарату формоутворення поверхонь ґрунтообробних знарядь.

У якості узагальненої моделі запропоновано поверхню Кунса, див. рис. 2, з обмежуючими векторними раціональними кривими другого порядку

$$\mathbf{r}(u) = \frac{(1-u)^2 \mathbf{r}_0 + 2w_1 u(1-u) \mathbf{r}_1 + u^2 \mathbf{r}_2}{(1-u)^2 + 2w_1 u(1-u) + u^2}, \quad (47)$$

де  $u \in [0, 1]$  – параметр;  $w_1 \geq 0$  – ваговий коефіцієнт вершини  $\mathbf{r}_1$ .

Ця поверхня на основі обмежуючих ліній  $\mathbf{R}_0(u)$ ,  $\mathbf{R}_1(u)$ ,  $S_0(v)$ ,  $S_1(v)$ , які стикаються в точках  $\mathbf{r}_{0,0}$ ,  $\mathbf{r}_{0,1}$ ,  $\mathbf{r}_{1,0}$ ,  $\mathbf{r}_{1,1}$ , визначається рівнянням

$$\begin{aligned} \mathbf{R}(u, v) = & (1-v)\mathbf{R}_0(u) + v\mathbf{R}_1(u) + (1-u)S_0(v) + uS_1(v) - \\ & - (1-v)(1-u)\mathbf{r}_{0,0} - (1-v)u\mathbf{r}_{0,1} - v(1-u)\mathbf{r}_{1,0} - vu\mathbf{r}_{1,1}, \end{aligned} \quad (48)$$

де  $u \in [0, 1]$ ,  $v \in [0, 1]$  – параметри;  $\mathbf{r}_{0,0} = \mathbf{R}_0(0) = S_0(0)$ ,  $\mathbf{r}_{0,1} = \mathbf{R}_0(1) = S_1(0)$ ,  $\mathbf{r}_{1,0} = \mathbf{R}_1(0) = S_0(1)$ ,  $\mathbf{r}_{1,1} = \mathbf{R}_1(1) = S_1(1)$ .



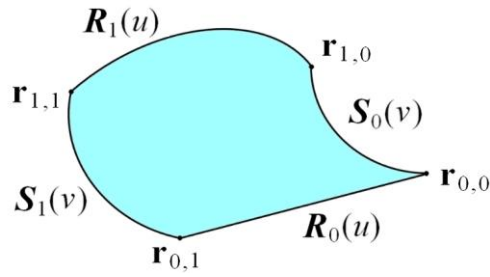


Рис. 2. Поверхня Кунса

Акцентовано придатність для модифікацій моделі (47), (48). За потреби обмежуючі лінії замінюються на інші. Зокрема, на криві Безьє (35). Тоді, див. рис. 2, у показаній нижній частині з прямолінійним відрізком  $R_0(u)$  завдяки зазначеним лініям  $S_0(v)$  та  $S_1(v)$  реалізується неперервність кривини з плоскою ділянкою. На підставі способу узагальненого контуру можливості геометричної моделі, яка розглядається, розширюються наступним чином.

У даному випадку кортеж складових узагальненого контуру  $УК$  має вигляд

$$УК = (УК_i)_{i=1}^{N_{УК}} = (УК_i)_{i=1}^2, \quad (49)$$

де  $УК_1=K2П$  – крива другого порядку (33),  $УК_2=КБС$  – лінія Безьє (35) зі степеневою параметризацією.

На основі виразу (49) створюємо множину контурів моделі

$$КМ = (КМ_j)_{j=1}^{N_{КМ}} = (КМ_j)_{j=1}^2, \quad (50)$$

де

$$\begin{aligned} КМ_1 &= (КМ_{1_k})_{k=1}^{N_{КМ1}} = (КМ_{1_k})_{k=1}^4 = (УК_{1_k})_{k=1}^4 = \\ &= (К2П, К2П, К2П, К2П), \end{aligned} \quad (51)$$

$$\begin{aligned} КМ_2 &= (КМ_{2_k})_{k=1}^{N_{КМ2}} = (КМ_{2_k})_{k=1}^4 = (УК_{2_1}, УК_{2_2}, УК_{1_1}, УК_{1_2}) = \\ &= (К2П, К2П, КБС, КБС). \end{aligned} \quad (52)$$

У кортежах (51) і (52) лінії подаються в наступній послідовності, див. рис. 2: спочатку крива, що виходить із точки  $r_{0,0}$  і залежить від  $u$ ; потім інша лінія цього параметра; далі крива, яка починається у вершині  $r_{0,0}$  і є функцією від  $v$ ; нарешті інша лінія даного параметра. Для контуру  $КМ_1$  усі чотири його складові (47). Обвід  $КМ_2$  містить дві такі та стільки ж кривих (35). У якості ліній  $R_0(u)$ ,  $R_1(u)$ ,  $S_0(v)$ ,  $S_1(v)$  можуть застосовуватися і трансцендентні криві. Отже, вирази (49) ... (52) засвідчують відкритість, тобто пристосованість до внесення потрібних змін, запропонованої узагальненої геометричної моделі для формоутворення таких ґрунтообробних знарядь, як полицеві та чизельні.

Для відвалів плугів найпоширенішими робочими поверхнями є лінійчасті з площиною паралелізму. Це стосується циліндричних і коноїдальних поверхонь, гіперболічних параболоїдів та ін. Зауважимо, що всі вони є різновидами циліндроїдальних поверхонь. Проілюструємо як за допомогою обмежень з наведеної узагальненої геометричної моделі можна отримати зазначені. Використовуватимемо контур  $КМ_1$ , див. множину (51). Для центральних характеристичних точок та їхніх вагових коефіцієнтів ліній  $R_0(u)$ ,  $R_1(u)$ ,  $S_0(v)$ ,  $S_1(v)$  вживатимемо відповідно позначення  $(P_1, w_1)$ ,  $(P_2, w_2)$ ,  $(P_3, w_3)$ ,  $(P_4, w_4)$ .

Нехай (рис. 3) необхідно створити належну циліндроїдальну поверхню.

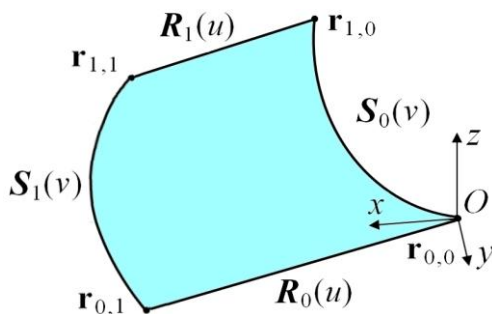


Рис. 3. Схема побудови циліндродальної поверхні

У декартовій системі координат  $Oxyz$  оберемо  $Oxy$  площиною паралелізму. Для іншої площини наведені подальші міркування застосовуються за аналогією. Як криволінійні напрямні візьмемо

$$S_0(v) = \frac{(1-v)^2 \mathbf{r}_{0,0} + 2w_3 v(1-v) \mathbf{P}_3 + v^2 \mathbf{r}_{1,0}}{(1-v)^2 + 2w_3 v(1-v) + v^2}, S_1(v) = \frac{(1-v)^2 \mathbf{r}_{0,1} + 2w_4 v(1-v) \mathbf{P}_4 + v^2 \mathbf{r}_{1,1}}{(1-v)^2 + 2w_4 v(1-v) + v^2}, \quad (53)$$

де  $\mathbf{r}_{0,0}=(x_{0,0}; y_{0,0}; z_{0,0})$ ,  $\mathbf{r}_{0,1}=(x_{0,1}; y_{0,1}; z_{0,1})$ ,  $\mathbf{r}_{1,0}=(x_{1,0}; y_{1,0}; z_{1,0})$ ,  $\mathbf{r}_{1,1}=(x_{1,1}; y_{1,1}; z_{1,1})$ .

При цьому у виразах (53) необхідно мати

$$z_{0,1} = z_{0,0}; \quad z_{1,1} = z_{1,0}, \quad (54)$$

що впливає з початкових і кінцевих умов побудови поверхні, рівняння якої

$$\mathbf{R}(u, v) = (1-u)S_0(v) + uS_1(v). \quad (55)$$

Зі співвідношень (53) та (55) видно, що для паралельності твірних площині  $Oxy$  треба забезпечити

$$\frac{(1-v)^2 z_{0,0} + 2w_3 v(1-v) z_{P_3} + v^2 z_{1,0}}{(1-v)^2 + 2w_3 v(1-v) + v^2} = \frac{(1-v)^2 z_{0,1} + 2w_4 v(1-v) z_{P_4} + v^2 z_{1,1}}{(1-v)^2 + 2w_4 v(1-v) + v^2}, \quad (56)$$

де  $z_{P_3}, z_{P_4}$  – аплікати точок  $\mathbf{P}_3, \mathbf{P}_4$ .

На основі виразів (54) і (56) остаточними умовами для реалізації циліндродальної поверхні у вигляді (48) є

$$z_{0,1} = z_{0,0}; \quad z_{1,1} = z_{1,0}; \quad z_{P_4} = z_{P_3}; \quad w_4 = w_3. \quad (57)$$

Визначено подібні до (57) обмеження для кривих Безьє (35) та контуру (52).

У даному разі

$$\begin{aligned} S_0(v) &= ((1-v^{m_{13}}) \mathbf{r}_{0,0} + v^{m_{13}} \mathbf{P}_3)(1-v) + v((1-v^{m_{23}}) \mathbf{P}_3 + v^{m_{23}} \mathbf{r}_{1,0}), \\ S_1(v) &= ((1-v^{m_{14}}) \mathbf{r}_{0,1} + v^{m_{14}} \mathbf{P}_4)(1-v) + v((1-v^{m_{24}}) \mathbf{P}_4 + v^{m_{24}} \mathbf{r}_{1,1}), \end{aligned} \quad (58)$$

де  $\mathbf{r}_{0,0}=(x_{0,0}; y_{0,0}; z_{0,0})$ ,  $\mathbf{r}_{0,1}=(x_{0,1}; y_{0,1}; z_{0,1})$ ,  $\mathbf{r}_{1,0}=(x_{1,0}; y_{1,0}; z_{1,0})$ ,  $\mathbf{r}_{1,1}=(x_{1,1}; y_{1,1}; z_{1,1})$ .

При цьому виконуються умови (54), (55). З них та співвідношень (58) бачимо, що для паралельності твірних площині  $Oxy$  треба мати

$$\begin{aligned} (1-v^{m_{13}})(1-v)z_{0,0} + ((1-v)v^{m_{13}} + v(1-v^{m_{23}}))z_{P_3} + v^{m_{23}+1}z_{1,0} = \\ = (1-v^{m_{14}})(1-v)z_{0,1} + ((1-v)v^{m_{14}} + v(1-v^{m_{24}}))z_{P_4} + v^{m_{24}+1}z_{1,1}, \end{aligned} \quad (59)$$

де  $z_{P_3}, z_{P_4}$  – аплікати відповідно точок  $\mathbf{P}_3, \mathbf{P}_4$ .

Спираючись на вираз (59), результуючими обмеженнями для дефініції циліндродальної поверхні з використанням формули (35) є

$$z_{0,1} = z_{0,0}; \quad z_{1,1} = z_{1,0}; \quad z_{P_4} = z_{P_3}; \quad m_{14} = m_{13}; \quad m_{24} = m_{23}. \quad (60)$$

Отже, умови (57) і (60) тільки обмежують суттєво більші можливості геометричного моделювання за допомогою поданих вище математичних засобів. За описаною методикою здійснено комп'ютерне варіантне формоутворення циліндричних (параболічних, еліптичних, гіперболічних), циліндроїдальних загального вигляду, квазіконоїдальних і гелікоїдальних поверхонь та гіперболічних параболоїдів. Особливу увагу приділено дефініції аналітичних залежностей змінювання кутів розпушення  $\alpha$ , обертання  $\beta$  та зсуву  $\gamma$  ґрунту проєктованих робочих поверхонь відвалів плугів, що доволі важливо для досягнення необхідних високих агротехнічних показників. Уявлення про це дають рис. 4 ... рис. 6.

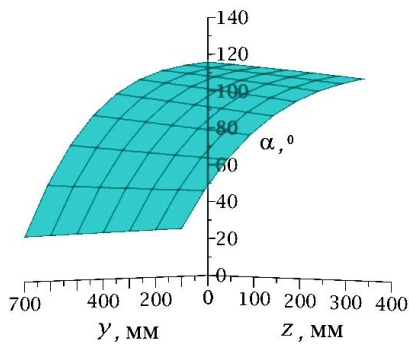


Рис. 4. Залежність кута  $\alpha$  від координат  $y, z$

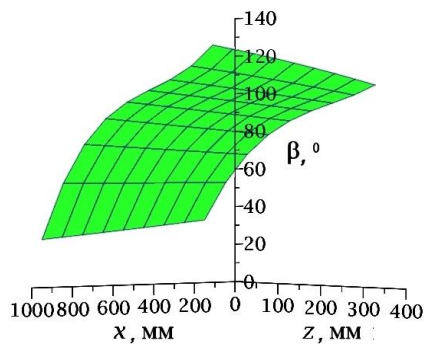


Рис. 5. Змінювання кута  $\beta$  від координат  $x, z$

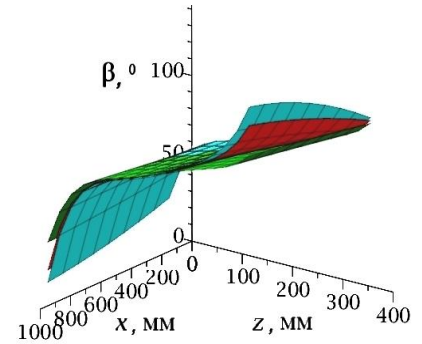


Рис. 6. Узагальнена залежність кута  $\beta$

За створеними теоретичними робочими поверхнями виконано комп'ютерне варіантне конструювання плугів, див. рис. 7.



Рис. 7. Деталі та складання одиниця із застосуванням поверхонь відвалу:

$a$  – відвал і леміш;  $b$  – корпус плуга

При цьому для забезпечення інтегрованого комплексного опрацювання таких питань, як вибір належного матеріалу плуга, його конструкційних, виробничих, експлуатаційних та інших властивостей, розроблено методику автоматизованого експертного оцінювання техніко-економічних показників відвалів плугів.

Розглянуто формоутворення з використанням запропонованої узагальненої моделі (47), (48) чизельних знарядь, див. елемент  $\Gamma_{3O_3}$  виразу (23), на прикладі стрілочастих лап (СЛ). Схему побудови їхніх робочих поверхонь представлено на рис. 8. Склад параметрів визначається множиною

$$P_{СЛ} = (P_{СЛi})_1^{N_{СЛ}} = (P_{СЛi})_1^6 = (\alpha, \beta, 2\gamma, B, L, H(L)), \quad (61)$$

де  $\alpha$  – кут входження у ґрунт,  $\beta$  – кут кришення ґрунту,  $2\gamma$  – кут розхилу,  $B$  – ширина (захват),  $L$  – довжина ріжучого леза,  $H(L)$  – висота крила в залежності від  $L$ .

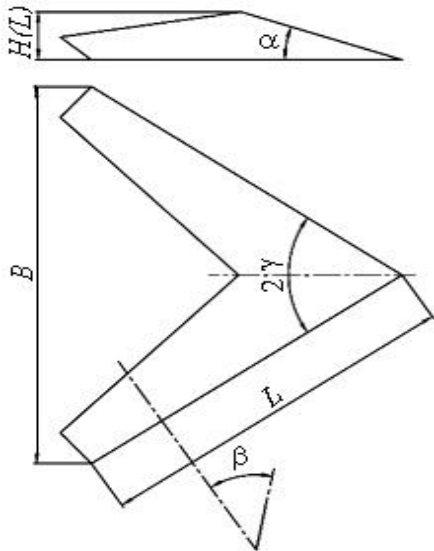


Рис. 8. Геометричні параметри лапи

Згідно з призначенням лапи поділяються на плоскорізальні (ПЛ) та універсальні (УЛ)

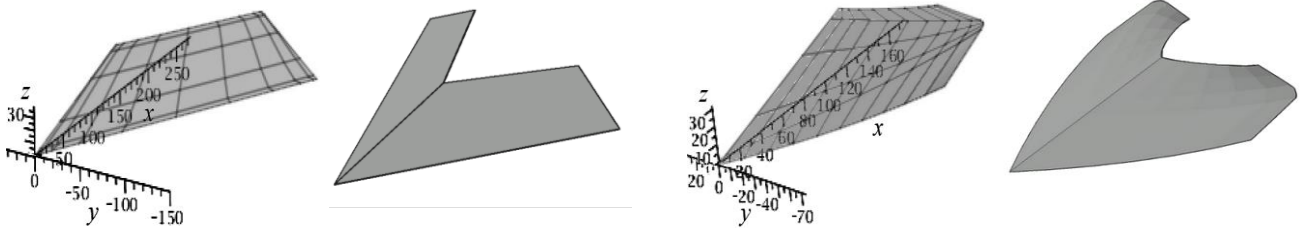
$$СЛ = (ПЛ, УЛ). \quad (62)$$

Наступні вирази визначають проміжки змінювання наведених у формулі (61) параметрів лап (62)

$$P_{ПЛ1} = \alpha = [5^0 \dots 9^0], P_{ПЛ2} = \beta = [10^0 \dots 22^0], \\ P_{ПЛ3} = 2\gamma = [60^0 \dots 70^0], P_{ПЛ4} = B = [140 \text{ мм} \dots 260 \text{ мм}], \\ P_{ПЛ5} = L = [120 \text{ мм} \dots 210 \text{ мм}]; \quad (63)$$

$$P_{УЛ1} = \alpha = [11^0 \dots 18^0], P_{УЛ2} = \beta = [18^0 \dots 30^0], \\ P_{УЛ3} = 2\gamma = [60^0 \dots 70^0], P_{УЛ4} = B = [220 \text{ мм} \dots 410 \text{ мм}], \\ P_{УЛ5} = L = [240 \text{ мм} \dots 350 \text{ мм}]. \quad (64)$$

Для покращення показників обробітку ґрунту застосовуються також лапи з криволінійними обводами. Виконано формоутворення розглянутих знарядь із параметрами (63), (64) за поданою вище методикою, див. рис. 9.



$\alpha=15^\circ, 2\gamma=60^\circ, B=300 \text{ мм}, L=300 \text{ мм}, \max H(L)=40 \text{ мм}$      $\alpha_0=15^\circ, 2\gamma_0=70^\circ, B=150 \text{ мм}, L=150 \text{ мм}, \max H(L)=35 \text{ мм}$

Рис. 9. Теоретичні поверхні, їхні параметри та відповідні комп'ютерні твердотільні моделі лап

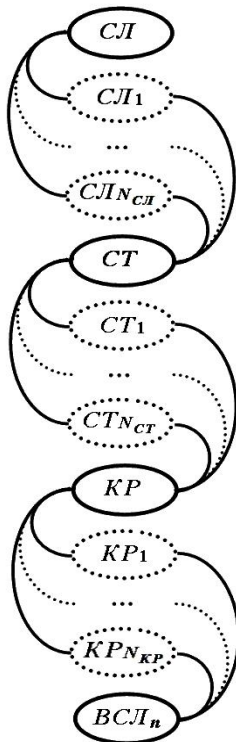


Рис.10. Структурно-параметрична модель вузла стрілкової лапи

Здійснено оптимізацію вузлів конструкції стрічастих лап із використанням структурно-параметричної геометричної моделі, показаної на рис. 10.

Визначено склад опрацьовуваного вузла, див. рис. 11, а,

$$ВСЛ = (всл_i)_{i=1}^{N_{всл}} = (всл_i)_{i=1}^3, \quad (65)$$

де  $всл_1 = СЛ$  – стрілиста лапа,  $всл_2 = СТ$  – стояк,  $всл_3 = КР$  – кріплення.

Кожен із компонентів (65) має певну множину проєктних різновидів

$$всл_i = (всл_{ij})_{j=1}^{N_{всл_i}}, \quad (66)$$

де  $N_{всл_i}$  – їхнє число, та векторів параметрів

$$P_{ij} = (p_{ijk})_{k=1}^{Np_{ij}}, \quad (67)$$

де  $Np_{ij}$  – їхня кількість для  $j$ -го варіанта  $i$ -го елемента.

Використання виразів (65) ... (67) ілюструє рис. 11, б.

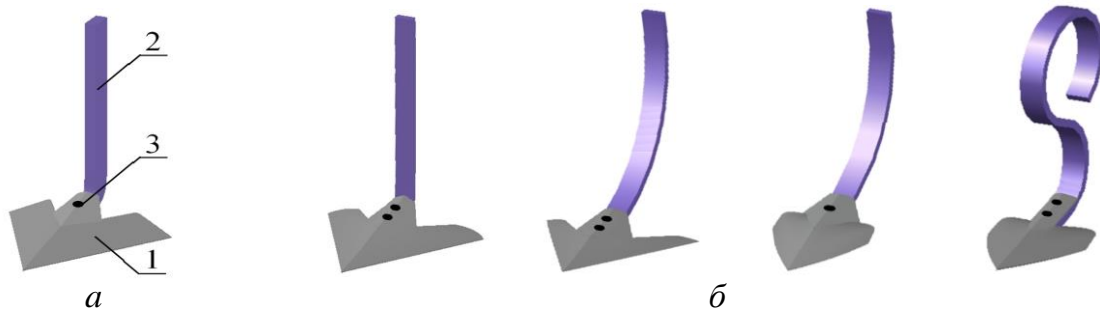


Рис. 11. Конструкційний вузол лапи:  
 а – структура (1 – стрілочаста лапа, 2 – стояк, 3 – кріплення);  
 б – різновиди комп'ютерних моделей

Розроблено спеціалізований геометрично-математичний інструментарій для вдосконалення конструкції пружинного запобіжника лапових культиваторів-сошників, який дозволяє ефективно враховувати наявні умови експлуатації.

Таким чином, у даній частині дослідження висвітлено практичну реалізацію напрацьованих у другому розділі дисертації теоретичних положень, методології та інструментарію інтегрованого комплексного геометричного моделювання на прикладі формоутворення робочих поверхонь полицевих і чизельних знарядь.

**Четвертий розділ** «Інтегроване комплексне геометричне моделювання дискових робочих органів» присвячено сільськогосподарським дискам. Основну увагу зосереджено на ще не проаналізованих аспектах запропонованого інструментарію інтегрованого комплексного формоутворення промислової продукції. Це стосується методології раціонального вибору типу ротаційних знарядь, узагальненої класифікації ґрунтообробних дисків, геометричного моделювання даних робочих органів, відтворення технологічних операцій їхнього виготовлення.

Важливим моментом проектування технічних об'єктів є обрання принципової їхньої схеми, певного базового різновиду, типу і т. д. Останнє обумовлено тим, що здійснені на вказаному етапі помилки надалі досить важко виправляти. Окреслену задачу проілюстровано на прикладі ротаційних знарядь. Ідея запропонованої методики полягає у формуванні множини робочих органів, кортежу оцінок і матриць належних величин, наданні геометричної інтерпретації останнім та графічній візуалізації зазначеної інформації у зручному для проведення аналізу вигляді. Описана модель гнучко адаптується до мінливих обставин, здатна перерозподіляти важливість оцінок наданням їм відповідних вагових коефіцієнтів. У практичному плані розглянуті засоби дозволяють ефективно визначати перспективні напрямки покращення сільськогосподарської техніки.

У попередньому розділі велику увагу приділено новій узагальненій моделі комп'ютерного формоутворення. Універсальність цього математичного апарату дозволила надалі охопити доволі широку номенклатуру технічних об'єктів, однак докладна її систематизація не наводилась. У випадку застосування вже існуючих геометричних засобів для визначення конкретного потрібного їхнього складу при опрацюванні певної групи промислової продукції необхідна ретельна її класифікація. Це продемонстровано далі на прикладі сільськогосподарських дисків.

Оснoву систематизації цих робочих органів, див. вираз (23), становлять такі геометричні властивості: *форма базової поверхні (ФБП)*, яка визначає тип диска; *вирізи (ВРЗ)*; *отвори (ОТВ)* під вісь і кріплення.

Форма базової поверхні подається множиною

$$\Phi БП = (\Phi БП_i)_{i=1}^{N_{\Phi БП}} = (\Phi БП_i)_{i=1}^4, \quad (68)$$

де  $\Phi БП_1$  – плоска,  $\Phi БП_2$  – конічна,  $\Phi БП_3$  – сферична,  $\Phi БП_4$  – комбінована.

Для останнього варіанта можливі різновиди

$$\Phi БП_4 = (\Phi БП_{4j})_{j=1}^{N_{\Phi БП_4}} = (\Phi БП_{4j})_{j=1}^4, \quad (69)$$

де  $\Phi БП_{4_1}$  – плоско-конічна,  $\Phi БП_{4_2}$  – плоско-сферична,  $\Phi БП_{4_3}$  – з двох конічних,  $\Phi БП_{4_4}$  – з двох сферичних.

Застосовані вирізи визначаються кортежем

$$ВРЗ = (ВРЗ_i)_{i=1}^{N_{ВРЗ}} = (ВРЗ_i)_{i=1}^5, \quad (70)$$

де  $ВРЗ_1$  – без вирізів,  $ВРЗ_2$  – складені прямолінійні контури,  $ВРЗ_3$  – дуги кіл,  $ВРЗ_4$  – хвилясті,  $ВРЗ_5$  – асиметричні.

Елементи множини (70)

$$ВРЗ_2 = (ВРЗ_{2j})_{j=1}^{N_{ВРЗ_2}} = (ВРЗ_{2j})_{j=1}^2, \quad (71)$$

де  $ВРЗ_{2_1}$  – V-подібні,  $ВРЗ_{2_2}$  – трапецеїдальні;

$$ВРЗ_4 = (ВРЗ_{4j})_{j=1}^{N_{ВРЗ_4}} = (ВРЗ_{4j})_{j=1}^2, \quad (72)$$

де  $ВРЗ_{4_1}$  – циклоїдальні,  $ВРЗ_{4_2}$  – синусоїдальні.

Отвори подаються кортежем

$$ОТВ = (ОТВ_i)_{i=1}^{N_{ОТВ}} = (ОТВ_i)_{i=1}^3, \quad (73)$$

де  $ОТВ_1$  – круглі,  $ОТВ_2$  – некруглі,  $ОТВ_3$  – комбіновані.

Компоненти множини (73)

$$ОТВ_2 = (ОТВ_{2j})_{j=1}^{N_{ОТВ_2}} = (ОТВ_{2j})_{j=1}^2, \quad (74)$$

де  $ОТВ_{2_1}$  – квадратні,  $ОТВ_{2_2}$  – шестигранні,

$$ОТВ_3 = (ОТВ_{3j})_{j=1}^{N_{ОТВ_3}} = (ОТВ_{3j})_{j=1}^2, \quad (75)$$

де  $ОТВ_{3_1}$  – круглі і квадратні,  $ОТВ_{3_2}$  – круглі та шестигранні.

Зауважимо, що склад кортежів (68) ... (75) коригується відповідно до наявних умов формоутворення проаналізованих технічних об'єктів. Приклади комп'ютерних твердотільних моделей дисків зображені на рис. 12.

Популярність цих сільськогосподарських знарядь обумовлена сучасними прогресивними тенденціями стосовно мінімального обробітку землі. Порівняно з плугами зазначені технології забезпечують зменшення витрат пального, сприяють збереженню вологи у ґрунті, його структури, зміцнюють протиерозійні фактори тощо. Велике розмаїття обставин застосування вказаних дисків спричинило належні їхні чисельні різновиди.

Розглянуто використання побудованих комп'ютерних твердотільних моделей для виконання розрахунків на міцність методом скінченних елементів, головна ідея якого полягає в поділі вихідного об'єкта на окремі дрібні взаємопов'язані складові. Це здійснюється за допомогою такої процедури, як формування сітки.

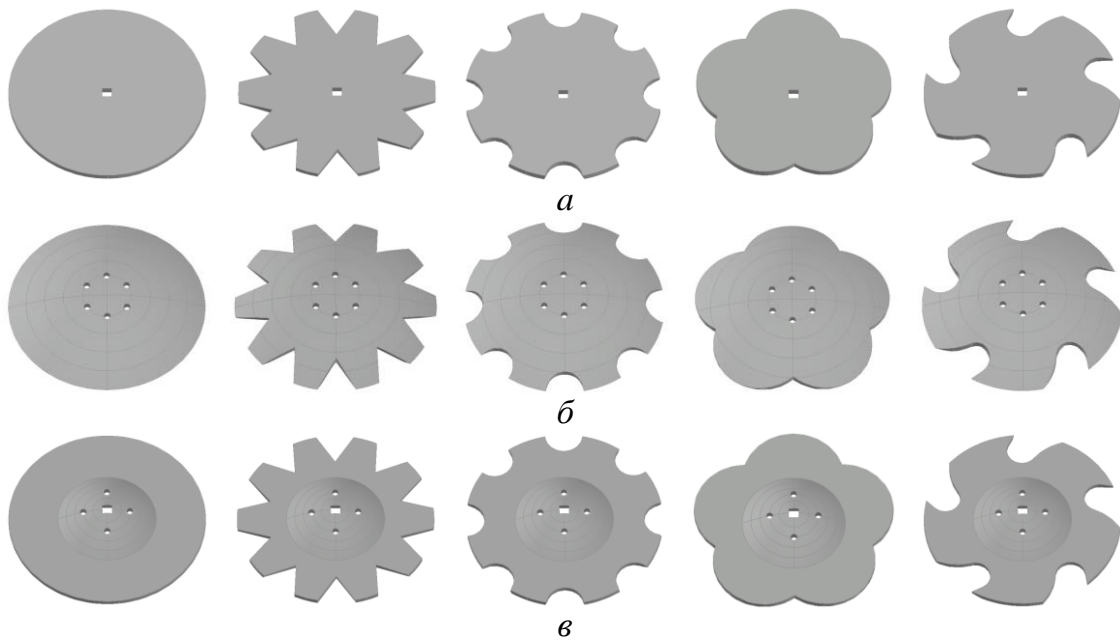


Рис. 12. Варіанти дисків із різною базовою поверхнею:  
*a* – плоскою; *б* – сферичною; *в* – комбінованою

На рис. 13 показано вихідну твердотільну геометричну модель опрацьованого ґрунтообробного диска, її заміну на множину скінченних елементів, проілюстровано результати обчислень у вигляді кольорової гами діючих напружень.

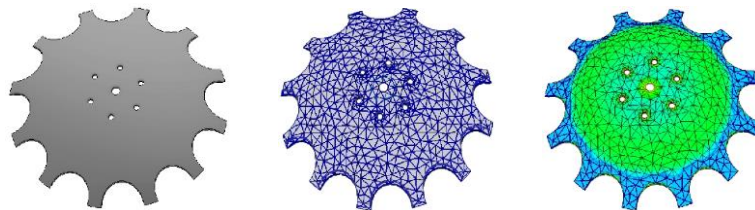


Рис. 13. Розрахунки на міцність методом скінченних елементів

Зауважено, що з позицій інтегрованого комплексного підходу при оптимізації геометрії сільськогосподарських знарядь їхнє визначення з точки зору агротехнічних вимог обов'язково треба поєднувати не тільки з розрахунками на міцність, а й питаннями технології виробництва, експлуатації, економічними, екологічними та ін. Акцентований підхід становить фундаментальну основу даного наукового дослідження.

Для нинішніх комп'ютерних технологій в аспекті реалістичного відображення життєвого циклу промислової продукції важливе належне моделювання виробничих процесів. Виготовлення дисків (68)...(75) включає послідовність технологічних операцій

$$TO = (TO_i)_{i=1}^{N_{TO}} = (TO_i)_{i=1}^4, \quad (76)$$

де  $TO_1$  – обрізати зовнішній контур заготовки,  $TO_2$  – сформувати отвори,  $TO_3$  – зробити вирізи,  $TO_4$  – деформувати диск.

Дії (76) виконуються фрезеруванням, свердлінням, лазерним променем, штампуванням тощо. Зазначені операції стосуються, зокрема, комп'ютерного твердотілого формоутворення з використанням розглянутих у другому розділі таких інструментів, як фрези, свердла і т. д. Ці динамічні процеси реалізуються на засадах виразу (2).

Для реалізації отворів та вирізів диска за допомогою штампування необхідно мати математичну модель відповідного інструменту у вигляді прямої призми або циліндра. Потрібні векторні параметричні рівняння в декартовій системі координат  $Oxyz$  на базі способу узагальненого контуру мають вигляд

$$\mathbf{r}(u, v, w) = (vr_x(u), vr_y(u), wH), \quad (77)$$

де  $\mathbf{r}(u, v, w)$  – радіус-вектор точок фігури;  $u \in [0, 1]$ ,  $v \in [0, 1]$ ,  $w \in [0, 1]$  – параметри;  $r_x(u)$ ,  $r_y(u)$  – абсциса та ордината замкненого зовнішнього контуру  $\mathbf{r}(u)$  нижньої основи у площині  $z=0$ ;  $H$  – висота призми або циліндра.

Залежність (77) відповідає засобу  $ГС_{112}$ , див. вираз (16), тобто кінематичному створенню тіла за допомогою поверхні (належного поперечного перерізу інструмента). Для виготовлення дисків із неплоскою базовою поверхнею застосовуються всі чотири технологічні операції (76), а для плоских – тільки перші дві або три. Під час автоматизованого комп'ютерного формоутворення дії  $ТО_1$ ,  $ТО_2$  та  $ТО_3$  можуть бути здійснені геометричними способами модифікації  $ГС_{231}$ , див. кортеж (20), тобто у вигляді віднімання від опрацьовуваного виробу потрібних точок інструмента. Даний процес моделюється як миттєвий або динамічний (у часі). Для операції  $ТО_4$  підходить спосіб  $ГС_{222}$ , див. співвідношення (19). Належну модель виготовлення дисків показано на рис. 14.

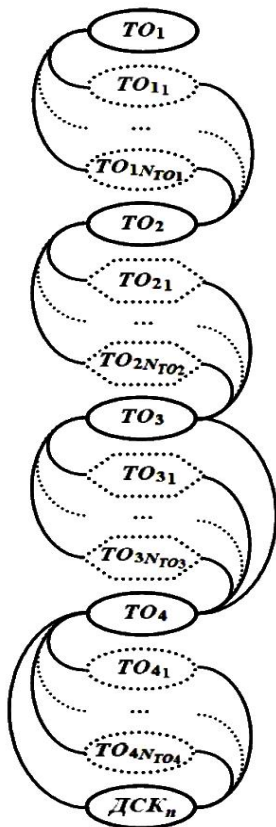


Рис.14. Структурно-параметрична модель виготовлення дисків

До її складу входять множини варіантів виконання технологічних операцій (76)

$$TO_1 = (TO_{1j})_{j=1}^{NTO_1}, \quad TO_2 = (TO_{2j})_{j=1}^{NTO_2},$$

$$TO_3 = (TO_{3j})_{j=1}^{NTO_3}, \quad TO_4 = (TO_{4j})_{j=1}^{NTO_4}. \quad (78)$$

У кортежах (78) друга та третя операція формоутворення є циклічно повторюваною (побудова отворів та вирізів), див. належні зображення у вигляді шестикутників на рис. 14. Також бачимо, що дії  $ТО_3$  та  $ТО_4$  необов'язкові.

Рис. 15 ілюструє наведену технологію виробництва проаналізованих сільськогосподарських знарядь.

Коли не виконувати третю та четверту операції, то одержимо плоский диск без вирізів. Не здійснювати третю – матимемо такий же неплоский диск. Без останньої – плоский із вирізами. Зрозуміло, що в описаних випадках базові поверхні, вирізи та отвори здатні бути довільними з множин (68) ... (75).

Розроблено математичну модель деформації вихідної заготовки у вигляді диска (прямого кругового циліндра з висотою, тобто товщиною  $\delta$ , яка суттєво менша за діаметр  $D_3$  його основи) в оболонку тієї ж товщини з серединною поверхнею у вигляді сферичного сегмента радіусом  $R$  та висотою  $H$ .



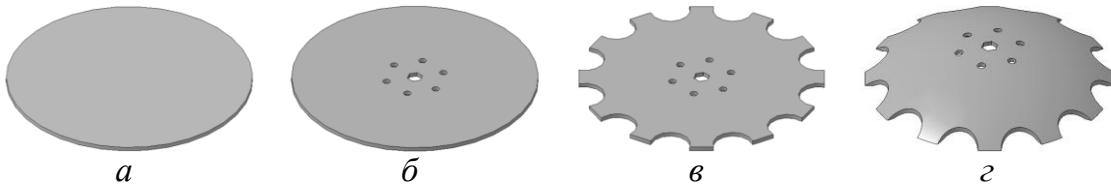


Рис. 15. Комп'ютерні моделі послідовності виготовлення дисків:  
*a* – плоска заготовка після обрізання зовнішнього контуру ( $TO_1$ );  
*б* – сформовані отвори ( $TO_2$ ); *в* – зроблені вирізи ( $TO_3$ );  
*г* – отримана сферична поверхня ( $TO_4$ )

Розглянуто технологічний процес листового штампування без потоншення вихідного матеріалу. На рис. 16 для диска діаметром  $D=700$  мм, радіусом  $R=750$  мм і висотою  $H=86,675$  мм сферичного сегмента, діаметром плоскої заготовки  $D_3=721,15$  мм подано графік динамічного змінювання поточних величин  $H$  та  $R$ . Проміжок деформування за висотою поділено на десять частин, крок  $8,6675$  мм. Першу з них не показано, оскільки при нульовій висоті радіус кривини  $R=\infty$  мм.

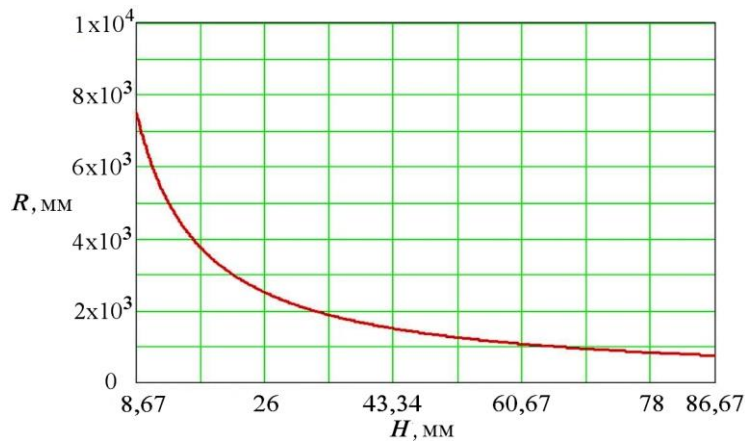


Рис. 16. Динамічне формоутворення диска

Рис. 17 унаочнює даний технологічний процес у моменти часу, які відповідають наведеним висотам деформації. Додатково подано також довжину  $L$  вказаних дуг.

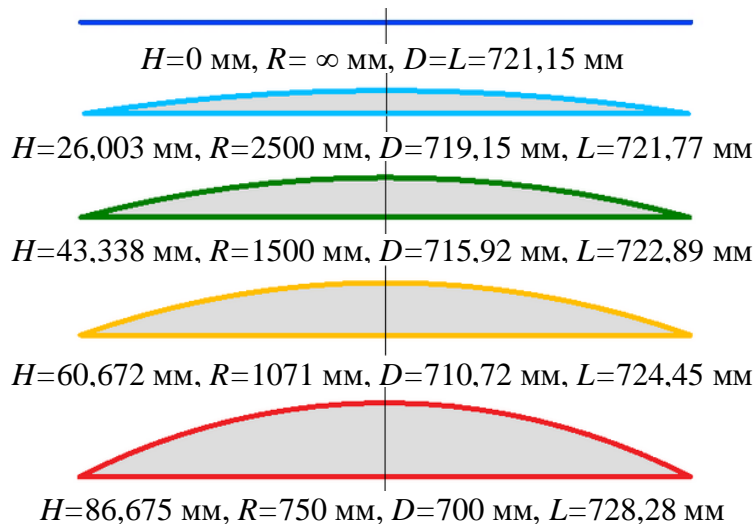


Рис. 17. Динаміка процесу виготовлення диска

Отже, в цьому розділі на прикладі дисків висвітлено деякі додаткові питання методології інтегрованого комплексного геометричного моделювання технічних об'єктів, які належним чином доповнюють наведені вище відомості щодо полицевих і чизельних робочих органів.

У п'ятому розділі «Моделювання процесів обробітку ґрунту» подано опис процесів із використанням знарядь, розглянутих у попередніх частинах дисертації. Це стосується як деяких загальних питань, наприклад опрацювання траєкторій руху машинних агрегатів, так і конкретних технологій із застосуванням полицевих, дискових та чизельних робочих органів.

При експлуатації сільськогосподарської техніки через вплив багатьох факторів часто спостерігається недотримання визначених напрямів її руху, що призводить не тільки до порушення аграрних вимог, а й підвищує енергетичні витрати. Ґрунтообробні знаряддя призначені, як правило, для здійснення технологічних операцій на прямолінійних ділянках. Тому відхилення від них погіршують агротехнічні характеристики. Наявні на полях рельєфні нерівності обумовлюють коливання у вертикальній, а інколи навіть у горизонтальній площині. Стосовно окресленого питання було розроблено методику уточнених розрахунків траєкторій руху ґрунтообробних знарядь, напрацьовано відповідну узагальнену аналітичну модель, сформульовано рекомендації щодо її використання. Важливість даної задачі полягає не тільки в теоретичному, а й у практичному плані. В останньому випадку мається на увазі можливість підвищення якості сільськогосподарських процесів за рахунок більш точного дотримання агротехнічних вимог обробітку ґрунту та економії паливно-мастильних матеріалів.

Удосконалено компонування лемішно-полицевих плугів шляхом графічної візуалізації відповідних аналітичних залежностей та побудови належних комп'ютерних твердотільних моделей. Застосовано відомі вирази для дефініції ширини  $B$  захвату плуга, співвідношення ширини захвату  $b$  його корпусу та глибини  $a$  оранки. Для розташування корпусів плуга в поздовжньому напрямі, поданого в літературних джерелах, див. рис. 18, *а*, розроблено необхідну візуалізацію (рис. 18, *б*).

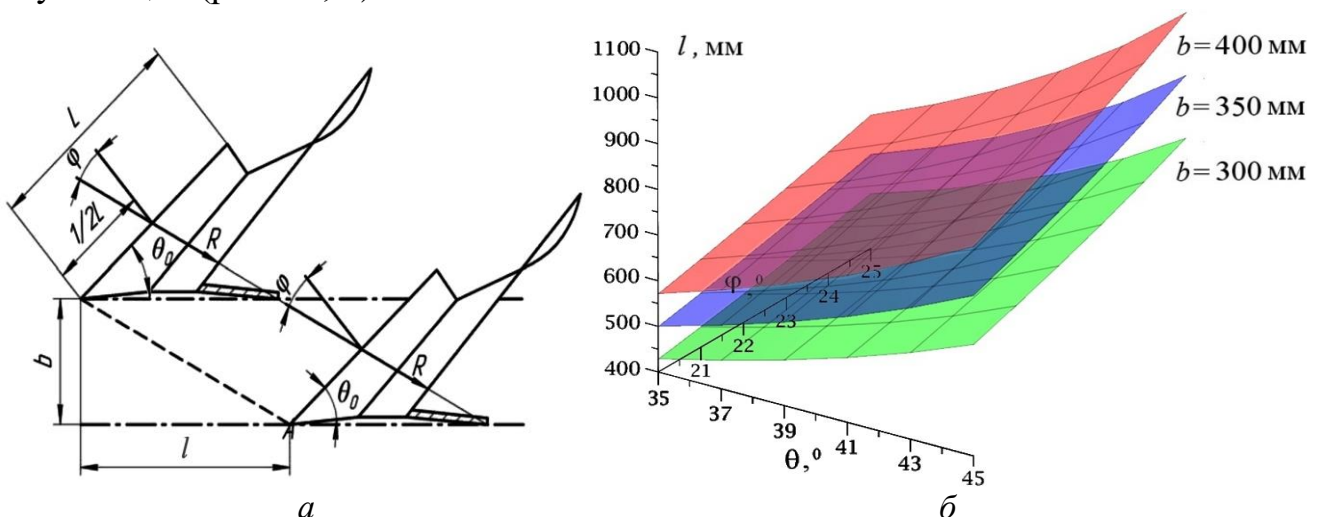


Рис. 18. Розміщення корпусів плуга в поздовжньому напрямі

В останньому зображенні використано позначення:  $\theta_0$  – кут нахилу леза лемеша до стінки борозни;  $\varphi$  – кут тертя.

На рис. 19 показано комп'ютерну твердотільну геометричну модель одного з варіантів компонування плуга. Це представлення стосується стадії ескізного проєктування, коли визначаються принципові рішення для створюваної конструкції, які дають загальне уявлення про призначення, головні параметри та характеристики опрацьовуваного виробу.

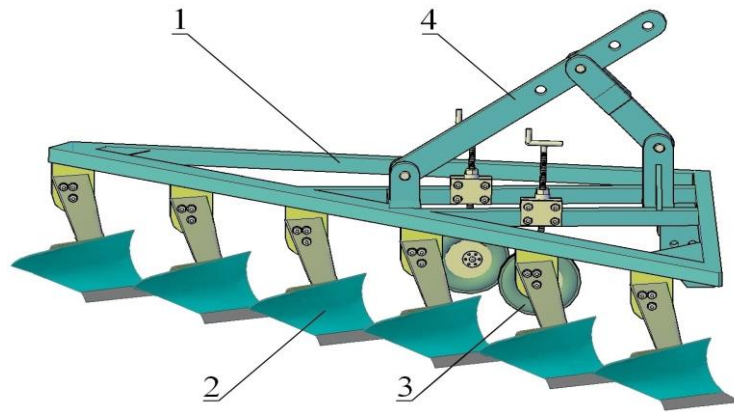


Рис. 19. Компонування конструкції плуга:  
1 – рама; 2 – корпус; 3 – опорне колесо з гвинтовим механізмом; 4 – начіпний пристрій

Глибина оранки змінюється вертикальним переміщенням опорних коліс. Рама зварена з труб прямокутного перерізу. Можливе застосування її розбірної шарнірної конструкції, що забезпечує безступінчасте регулювання взаємного положення основного та поперечного брусів для варіювання ширини захвату плуга. Кути орієнтації полиць змінюються гвинтовими механізмами на стояках корпусів. Найважливішим робочим органом плуга є його леміш із полицею, геометрія яких суттєво впливає на якість обробітку ґрунту. Тому зазначеним аспектам було приділено значну увагу у третьому розділі дисертації. Залежно від наявних умов використовуються полиці різних форм і розмірів.

Для дискових знарядь напрацьовано нову математичну модель профілю борозни, виконано компонування конструкцій, досліджено вплив їхніх параметрів на показники обробітку ґрунту. Під час експлуатації диски утворюють борозну з гребенями висотою  $c$ , яка залежить від діаметра  $D$  дисків та кутів їхнього встановлення ( $\alpha$  – атаки,  $\beta$  – відхилення від вертикалі), див. рис. 20,  $a$ , де  $v$  – вектор швидкості знаряддя,  $a$  – глибина обробітку,  $Dc$  – хорда диска, яка відповідає  $c$ ,  $b_c$  – ширина захвату,  $b$  та  $l$  – параметри, що визначають відстань між дисками.

Для якості процесів обробітку ґрунту доволі важлива величина  $c$  висоти гребенів. Шляхом матричних перетворень визначено математичну модель профілю борозни залежно від діаметра  $D$ , кутів  $\alpha$  та  $\beta$ . При цьому використано вихідну декартову систему координат  $Oxyz$  із початком у центрі кола з діаметром  $D$ , абсцисою протилежною швидкості  $v$ , горизонтальною площиною  $Oxy$ , спрямованою вертикально вгору аплікатою. У кінцевій системі координат  $Oxyz$ , площина  $Oxy$  якої зміщена по відношенню до вихідного свого положення вздовж осі  $z$  до рівня глибини обробітку  $a$ , профіль борозни у проекції на площину  $Oyz$ , з урахуванням обмежень працездатності диска щодо занурення його у ґрунт, має вигляд

$$\begin{aligned} y &= 0,5D \cdot (\cos(u) \sin \alpha + \sin(u) \sin \beta \cos \alpha), \\ z &= 0,5D \cdot \cos \beta (1 - \sin(u)), \quad u \in [u_{\min}, 180^\circ - u_{\min}], \quad u_{\min} = 19,5^\circ, \end{aligned} \quad (79)$$

де  $u$  – параметр.

Для певної розрахункової висоти  $c$  гребенів параметр  $u_{\min}$  обумовлюється співвідношенням

$$u_{\min} = \arcsin(1 - 2c / (D \cos \beta)) \cdot 180 / \pi^\circ. \quad (80)$$

Рис. 20,  $b$  ілюструє профілі борозни, побудовані згідно з виразами (79), (80). Після виконання різноманітних розрахунків, пов'язаних із моделюванням процесів обробітку ґрунту, зокрема, агротехнічних, енергетично-силових, на міцність,

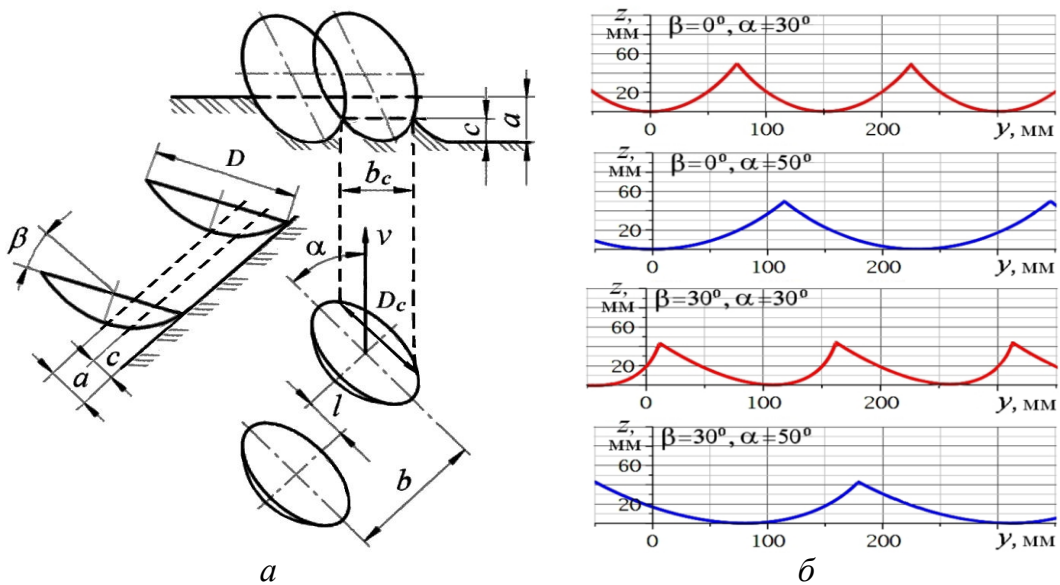


Рис. 20. Гребінчасті борозни:

*a* – схема формування; *б* – профілі диска діаметром  $D=500$  мм

експлуатаційних, економічних тощо на стадії ескізного проектування здійснюється варіантне компонування конструкції. Головна мета полягає у формуванні комплексних раціональних різновидів, дефініції відповідних принципів рішень.

Існує велике розмаїття дискових ґрунтообробних знарядь, наприклад, луцильники, борони, плуги та ін. Розглянути докладно їх усіх у даній науковій праці практично неможливо. Тому далі акцентуються тільки найбільш важливі моменти. Донедавна базовим компонентом дискових луцильників і борін була батарея, що містить закріплений на рамі в підшипникових опорах вал, на якому рівномірно розташовані диски з можливістю спільного варіювання їхнього кута атаки. Головний недолік такої схеми полягає в тому, що через велику свою протяжність батарея погано копіює наявний рельєф. Нині застосовуються диски з індивідуальними стояками на пружинах. Це дозволяє плавно долати нерівності поля. У дискових плугів робочі органи теж розміщені аналогічно із забезпеченням, зазвичай, покрокового регулювання кутів атаки, а інколи й відхилення від вертикалі. Зазначені засоби сприяють адаптації сільськогосподарських знарядь до умов їхнього використання. На рис. 21 представлено комп'ютерну твердотільну геометричну модель компонування на стадії ескізного проектування конструкції дискатора, в якого робочі органи встановлені на індивідуальних стояках із кутом атаки  $\alpha$  та відхиленням  $\beta$  від вертикалі.

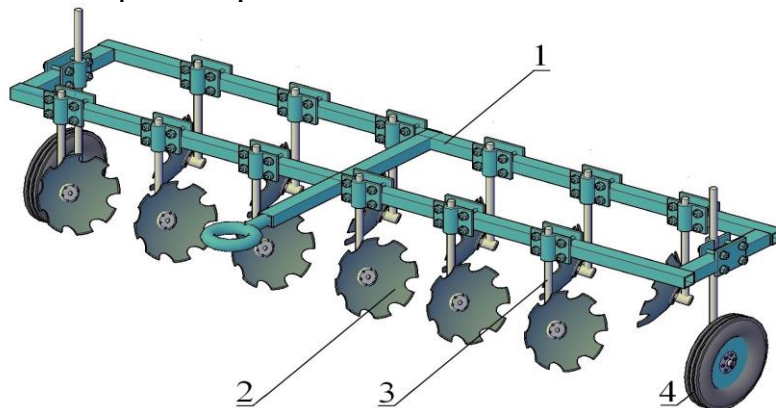


Рис. 21. Конструкція дискатора:

1 – рама з причіпом; 2 – ґрунтообробний диск; 3 – стояк; 4 – опорне колесо

Диски розташовані у два зміщені ряди з обертанням ґрунту у протилежних напрямках. До складу цього знаряддя, як правило, входять також котки, які на наведеному рисунку не показані. Останнє обумовлено тим, що зазначені об'єкти в дисертації не розглядалися і становлять наступний етап конструювання даної конструкції. Кожен диск забезпечується пристроєм для керування кутами  $\alpha$  та  $\beta$ , що сприяє мінімізації висоти гребенів, тобто покращується оброблюваність шару ґрунту.

Проаналізовано залежність агротехнічних показників від конструкційних параметрів дисків. Нині при моделюванні сільськогосподарських технологічних процесів важливе опрацювання наявної теоретичної та експериментальної інформації. Продемонстровано це на прикладі застосування запропонованого способу зменшення області проектних розв'язків. У літературних джерелах наводяться відомості стосовно впливу конструкційних параметрів на технологічні показники роботи дисків, див. рис. 22. Видно, що зі зменшенням діаметра  $D$  диска зростає середня висота  $c$  гребенів, а зі збільшенням кута атаки  $\gamma$  – спадає. Його велика величина покращує підрізання  $N$  рослинних залишків, однак може спричинити забивання дисків ґрунтом. Відношення висоти гребенів  $c$  до глибини обробітку  $a$  зі зростанням кута атаки зменшується.

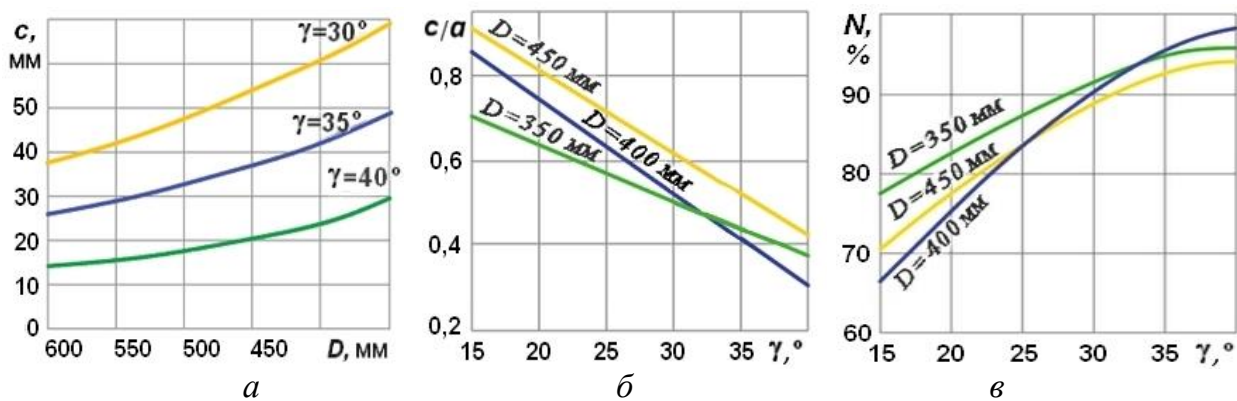


Рис. 22. Залежності агротехнічних показників:

$a$  – висоти  $c$  гребенів від діаметра  $D$  диска, кута атаки  $\gamma$ ;

$b$  – відношення  $c$  до глибини  $a$  обробітку від  $\gamma$ ,  $D$ ;

$v$  – ступеня  $N$  підрізання рослинних залишків від  $\gamma$ ,  $D$

На підставі формул (24) в даному випадку маємо вихідну область допустимих розв'язків

$$D \in [350 \text{ мм}; 600 \text{ мм}], c \in [0 \text{ мм}; 70 \text{ мм}], c/a \in [0,2; 0,9],$$

$$\gamma \in [15^0; 40^0], N \in [60\%; 100\%]. \quad (81)$$

З множин (81) видно, що це п'ятивимірний інтегрований комплексний простір параметрів

$$(D, c, a, \gamma, N),$$

де перші чотири геометричні, а останній – агротехнічний.

На основі загального підходу стосовно представлення багатовимірних об'єктів певними простішими фігурами виконано апроксимацію наявних графіків рис. 22 належними аналітичними залежностями, що є прикладами конкретного застосування виразів (25).

Далі з міркувань проектування, конструювання та експлуатації вводяться додаткові обмеження на початкову область допустимих розв'язків, наприклад,

$$\begin{aligned}
D &\in (350 \text{ мм}, 400 \text{ мм}, 450 \text{ мм}), \\
a &\in [50 \text{ мм} \dots 100 \text{ мм}], \quad c \in [0 \text{ мм} \dots 50 \text{ мм}], \\
c/a &\in [0 \dots 0,5], \quad \gamma \in [15^{\circ}; 40^{\circ}], \quad N \in [90\%; 100\%].
\end{aligned}
\tag{82}$$

Тобто з неперервного вихідного проміжку значень діаметра  $D$  виокремлено три необхідні його дискретні величини, визначено потрібну глибину обробітку  $a$  та висоту гребенів  $c$ , їхнє можливе співвідношення, варіювання кута атаки  $\gamma$  залишено без змін, обмежено належним чином ступень  $N$  підрізання рослинних залишків.

Проаналізовано змінювання області проєктних розв'язків через умови (82), унаслідок чого отримано зменшені діапазони кутів атаки для дисків:

$$\begin{aligned}
D=350 \text{ мм}, \quad \gamma \in [27,7^{\circ}; 40^{\circ}]; \quad D=400 \text{ мм}, \quad \gamma \in [29,1^{\circ}; 40^{\circ}]; \\
D=450 \text{ мм}, \quad \gamma \in [31,5^{\circ}; 40^{\circ}].
\end{aligned}
\tag{83}$$

Застосувавши проміжки (83) та залежності рис. 22, б, уточнюємо відношення висоти  $c$  гребенів до глибини  $a$  обробітку ґрунту:

$$\begin{aligned}
D = 350 \text{ мм}, \quad c/a \in [0,38; 0,54]; \quad D = 400 \text{ мм}, \quad c/a \in [0,3; 0,54]; \\
D = 450 \text{ мм}, \quad c/a \in [0,42; 0,59].
\end{aligned}
\tag{84}$$

З виразів (84), взявши до уваги обмеження (82), одержуємо

$$\begin{aligned}
D = 350 \text{ мм}, \quad c/a \in [0,38; 0,5]; \quad D = 400 \text{ мм}, \quad c/a \in [0,3; 0,5]; \\
D = 450 \text{ мм}, \quad c/a \in [0,42; 0,5].
\end{aligned}
\tag{85}$$

Маючи розрахунково-експериментальні дані рис. 22, а для висоти гребенів  $c$  залежно від дискретних кутів атаки  $\gamma \in (30^{\circ}; 35^{\circ}; 40^{\circ})$ , коригуємо проміжки (83):

$$\begin{aligned}
D=350 \text{ мм}, \quad \gamma \in (30^{\circ}; 35^{\circ}; 40^{\circ}); \quad D=400 \text{ мм}, \quad \gamma \in (30^{\circ}; 35^{\circ}; 40^{\circ}); \\
D=450 \text{ мм}, \quad \gamma \in (35^{\circ}; 40^{\circ}).
\end{aligned}
\tag{86}$$

Для елементів декартового добутку  $D \times \gamma$  множин (86) з використанням належних аналітичних співвідношень, див. рис. 22, а, отримуємо кортежі формату  $(D, \gamma, c)$ :

$$\begin{aligned}
(350 \text{ мм}; 30^{\circ}; 69,8 \text{ мм}), \quad (350 \text{ мм}; 35^{\circ}; 49 \text{ мм}), \quad (350 \text{ мм}; 40^{\circ}; 29,6 \text{ мм}), \\
(400 \text{ мм}; 30^{\circ}; 61,4 \text{ мм}), \quad (400 \text{ мм}; 35^{\circ}; 43 \text{ мм}), \quad (400 \text{ мм}; 40^{\circ}; 24,7 \text{ мм}), \\
(450 \text{ мм}; 35^{\circ}; 37,6 \text{ мм}), \quad (450 \text{ мм}; 40^{\circ}; 20,7 \text{ мм}).
\end{aligned}
\tag{87}$$

З урахуванням обмежень (82) із множин (87) залишаються наступні:

$$\begin{aligned}
(350 \text{ мм}; 35^{\circ}; 49 \text{ мм}), \quad (350 \text{ мм}; 40^{\circ}; 29,6 \text{ мм}), \\
(400 \text{ мм}; 35^{\circ}; 43 \text{ мм}), \quad (400 \text{ мм}; 40^{\circ}; 24,7 \text{ мм}), \\
(450 \text{ мм}; 35^{\circ}; 37,6 \text{ мм}), \quad (450 \text{ мм}; 40^{\circ}; 20,7 \text{ мм}).
\end{aligned}
\tag{88}$$

Висоти гребенів у виразах (88) та формули (85) дозволяють обчислити відповідні проміжки величин глибини  $a$  обробітку ґрунту з взяттям до уваги вимог (82). Остаточно зменшена початкова область проєктних розв'язків (81) за розглянутих обмежень отримує вигляд у форматі  $(D, \gamma, c, a, N)$ :

$$\begin{aligned}
(350 \text{ мм}; 35^{\circ}; 49 \text{ мм}; [98 \text{ мм}, 100 \text{ мм}]; [90\%, 100\%]), \\
(350 \text{ мм}; 40^{\circ}; 29,6 \text{ мм}; [59 \text{ мм}, 78 \text{ мм}]; [90\%, 100\%]), \\
(400 \text{ мм}; 35^{\circ}; 43 \text{ мм}; [86 \text{ мм}, 100 \text{ мм}]; [90\%, 100\%]), \\
(400 \text{ мм}; 40^{\circ}; 24,7 \text{ мм}; [49 \text{ мм}, 82 \text{ мм}]; [90\%, 100\%]), \\
(450 \text{ мм}; 35^{\circ}; 37,6 \text{ мм}; [75 \text{ мм}, 90 \text{ мм}]; [90\%, 100\%]), \\
(450 \text{ мм}; 40^{\circ}; 20,7 \text{ мм}; [41 \text{ мм}, 49 \text{ мм}]; [90\%, 100\%]).
\end{aligned}
\tag{89}$$

Як видно, множини (89) задовольняють умовам (82). Отже, на прикладі аналізу впливу конструкційних параметрів дисків на їхні експлуатаційні показники продемонстровано практичне застосування запропонованого способу зменшення області проектних розв'язків. Отриманий результат дозволяє спеціалізованим дисциплінам здійснювати подальше опрацювання з метою оптимізації описаних сільськогосподарських процесів.

Подано конструювання культиваторів на стадії ескізного проектування. Рис. 23 ілюструє комп'ютерну твердотільну геометричну модель одного з варіантів, що в якості робочих органів використовує наведені у третьому розділі лапи.

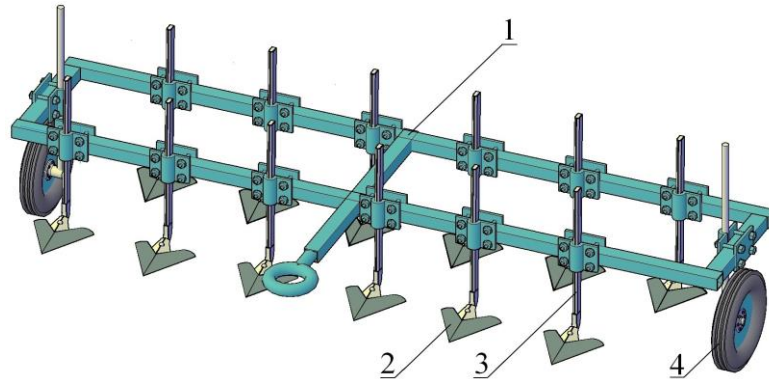


Рис. 23. Конструкція культиватора:  
1 – рама з причіпом; 2 – лапа; 3 – стояк; 4 – опорне колесо

Акцентовано важливий аспект інтегрованого комплексного підходу стосовно уніфікації застосовуваних конструкційних елементів. Порівнюючи рис. 19 (плуги), рис. 21 (дискатори) та рис. 23 (культиватори) можна зазначити певну їхню схожість, особливо у двох останніх випадках. Це стосується деталей рам, опорних коліс, кронштейнів, стояків тощо, не кажучи вже про стандартизовані кріпильні вироби. Підвищення рівня уніфікації сільськогосподарських знарядь поліпшує їхню якість та зменшує вартість, що доволі актуально для України в нинішній важкий історичний період.

Таким чином, у цій частині дослідження розглянуто належні питання математичного та комп'ютерного моделювання процесів обробки ґрунту.

У шостому розділі «Перспективи подальшого розвитку інтегрованого комплексного геометричного моделювання» викладено відомості стосовно аналізу отриманих у дисертації наукових результатів із точки зору теорії та практики, визначено напрямки вдосконалення запропонованої методології інтегрованого комплексного геометричного моделювання, розширення сфери її використання.

До одержаних практичних результатів, зокрема, відносяться:

– проведений всебічний аналіз літературних джерел з обраної тематики, що дозволило оцінити сучасний стан розвитку прикладної геометрії в частині моделювання ґрунтообробних знарядь, визначити існуючі проблеми, окреслити шляхи їхнього вирішення. Розроблено методологію інтегрованого комплексного формоутворення, яка забезпечила основу для напрацювання нових способів, прийомів, алгоритмів та методик побудови моделей різноманітних технічних об'єктів, процесів їхнього виготовлення та експлуатації. Доповнено базові положення теорії структурно-параметричного геометричного моделювання принципом інтеграції, що полягає в поєднанні етапів життєвого циклу промислової продукції та належних засобів формоутворення.

- узагальнена аналітична модель поверхонь полицевих і чизельних ґрунтообробних знарядь, орієнтована на ефективне використання сучасних комп'ютерних засобів;

- розроблений математичний апарат визначення кутів розпушення, обертання та зсуву ґрунту полицевих робочих поверхонь, що особливо важливо для забезпечення високих агротехнічних показників сільськогосподарських знарядь;

- інструментарій для формування області проєктних розв'язків з метою підвищення ефективності процесів опрацювання технічної продукції, який проілюстровано на прикладі дослідження впливу конструкційних параметрів сільськогосподарських дисків на експлуатаційні показники обробітку ґрунту;

- комп'ютерні геометричні моделі полицевих і чизельних знарядь, що для дефініції належних варіантів застосовують метод експертних оцінок та графової структурно-параметричної оптимізації;

- методика раціонального вибору типу ґрунтообробних знарядь, яка ґрунтується на використанні запропонованих графоаналітичних комп'ютерних моделей;

- структурно-параметрична класифікація ґрунтообробних дисків, що підвищує продуктивність їхнього автоматизованого проєктування;

- математична модель вдосконалення конструкції пружинного запобіжника лапових культиваторів-сошників, яка враховує наявні умови експлуатації;

- інструментарій для уточнення розрахунків траєкторій руху сільськогосподарських знарядь, що сприяє поліпшенню обробітку ґрунту та економії паливно-мастильних матеріалів;

- математична модель побудови профілю борозни дискових робочих органів у залежності від їхніх конструкційних та експлуатаційних параметрів, що важливо для теоретичних і практичних досліджень землеробської механіки, агроґрунтознавства та інших спеціалізованих наук;

- інтегроване комплексне геометричне комп'ютерне моделювання лемішно-полицевих плугів, дискаторів і лапових культиваторів, які поєднують варіантний розрахунок робочих поверхонь, дефініцію та оптимізацію компоновання конструкції.

Визначено основні напрямки подальшого вдосконалення запропонованої методології інтегрованого комплексного геометричного моделювання технічних об'єктів. Зокрема, це стосується:

- виконання на основі поданої загальної класифікації ґрунтообробних знарядь уточнення її елементів, побудови необхідних узагальнених геометричних моделей, які охоплюють достатньо широку номенклатуру інших виробів;

- дослідження нових властивостей запропонованих кривих Безье зі степеневою параметризацією, наприклад цих ліній вищих порядків;

- інтегрованого комплексного геометричного моделювання ґрунтообробних знарядь не тільки основного, а і спеціального обробітку;

- наскрізного охоплення всіх стадій створення промислової продукції, тобто ескізного, технічного та робочого проєкта;

- оптимального компоновання машинно-тракторних агрегатів;

- комп'ютерного динамічного варіантного моделювання різноманітних технологій обробітку ґрунту;

- опрацювання суміжних сільськогосподарських процесів, наприклад сівби, збирання врожаю, його транспортування тощо.



Матеріали цього розділу дисертації свідчать про розвиток теоретичного ядра прикладної геометрії, її методології та інструментарію шляхом розроблення спеціальної теорії інтегрованого комплексного геометричного моделювання технічних об'єктів і процесів, яку проілюстровано на прикладі ґрунтообробних знарядь. Окреслено можливі напрямки розширення застосування в загальному та галузевому машинобудуванні, енергетиці, металургії, газовій та нафтопереробній промисловості, медицині, освіті і т. д.

### **ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ**

Дану дисертаційну роботу присвячено важливій науково-прикладній проблемі підвищення якості автоматизованого геометричного моделювання технічних об'єктів на прикладі розробки методології інтегрованого комплексного комп'ютерного формоутворення сільськогосподарських ґрунтообробних знарядь.

*Значення для науки* полягає в узагальненні та подальшому розвитку напрацьованих теорій і методологій наукової школи «Геометричне моделювання об'єктів, процесів та явищ» КПІ ім. Ігоря Сікорського (рішення Вченої Ради від 20.02.2023 протокол № 2, <https://rada.kpi.ua/node/1693>), створенні нового наукового напрямку «інтегрованого комплексного геометричного моделювання технічних об'єктів» у прикладній геометрії та інженерній графіці.

*Значення для практики* полягає в побудові для різноманітних ґрунтообробних знарядь нових комп'ютерних інтегрованих комплексних геометричних моделей, які ефективно відтворюють стадію ескізного проектування зазначених виробів, реалізують їхню багатоаспектну оптимізацію.

*При виконанні поставлених завдань отримано наступні результати, що мають теоретичну і практичну цінність.*

1. Проаналізовано сучасний стан розвитку прикладної геометрії в частині моделювання ґрунтообробних знарядь. На підставі цього встановлено існуючі проблеми, окреслено напрямки їхнього вирішення, зокрема шляхом напрацювання якісно нових методологічних основ та інструментарію автоматизованого формоутворення, належних узагальнених геометричних моделей, способів, прийомів, алгоритмів, методик, класифікацій тощо.

2. Обґрунтовано необхідність та доцільність інноваційного розвитку базових компонентів наукової підсистеми теоретичного ядра прикладної геометрії з позиції інтегрованого комплексного формоутворення.

3. Розроблено спеціальну теорію, методологію та інструментарій інтегрованого комплексного геометричного моделювання для якісно нового дослідження багатопараметричних складних технічних об'єктів і процесів на прикладі ґрунтообробних знарядь. Це дозволило узагальнити такі напрацювання наукової школи геометричного моделювання КПІ ім. Ігоря Сікорського, як структурно-параметричне моделювання промислової продукції, процесів її виготовлення та експлуатації, сільськогосподарське машинобудування, багато-вимірна геометрія.

4. Розроблено:

– спосіб інтегрованих класифікацій для автоматизованого формоутворення груп технічних об'єктів, який реалізує продуктивне комп'ютерне геометричне моделювання належної номенклатури. Це забезпечено за рахунок взаємної адаптації систематизованих графічних засобів і відтворюваних промислових виробів; Зазначений спосіб спрямований на побудову не індивідуальних геометричних моделей, а узагальнених;

– спосіб узагальненого контуру, що базується на структурно-параметричному підході до формоутворення, доволі універсальний, оскільки придатний для проєктування різноманітних груп технічних об'єктів. Основною перевагою є забезпечення продуктивного аналізу комп'ютерними засобами чисельних варіантів опрацьовуваної промислової продукції;

– спосіб зменшення області проєктних розв'язків, який дозволяє визначати раціональні величини параметрів і характеристик опрацьовуваних технічних об'єктів та процесів. Є інваріантною складовою запропонованої спеціальної інтегрованої комплексної методології автоматизованого формоутворення. Головна ідея полягає в поступовому визначенні належного варіанта опрацьовуваного виробу, який із геометричних позицій являє собою певну точку в багатовимірному функціональному просторі.

5. Розроблено узагальнену геометричну модель робочих поверхонь полицевих і чизельних знарядь, орієнтовану на ефективне застосування комп'ютерних засобів завдяки використанню гнучкого математичного апарату, створеного на основі інтеграції раціональних параметричних кривих і поверхонь Кунса. Це забезпечило уніфікований підхід до формоутворення широкої номенклатури компонентів сільськогосподарської техніки.

6. Проведено аналіз змінювання кутів розпушення, обертання та зсуву ґрунту різноманітних полицевих робочих поверхонь, що особливо важливо для забезпечення високих агротехнічних показників сільськогосподарських знарядь. Розроблено належний математичний апарат, отримано необхідні аналітичні залежності. Це дозволяє точніше моделювати процеси обробітку ґрунту з метою здійснення їхньої комплексної оптимізації.

7. Створено узагальнену математичну модель профілю борозни для дискових робочих органів у залежності від їхніх конструкційно-експлуатаційних параметрів. Отримані результати важливі для теоретичних і практичних досліджень багатьох сільськогосподарських наук.

8. Розроблено спеціалізований геометрично-математичний інструментарій для вдосконалення конструкції пружинного запобіжника лапових культиваторів-сошників, який ефективно враховує наявні умови експлуатації. Це дозволяє оцінити переміщення сошника у вертикальній площині при зустрічі з перешкодами в залежності від сили опору ґрунту, довжини, жорсткості та кута нахилу осі пружини запобіжного пристрою. Дану інформація враховується при конструюванні зазначених знарядь.

9. Упроваджено отримані наукові результати у практику: в Іванівській дослідно-селекційній станції Інституту біоенергетичних культур і цукрових буряків Національної академії аграрних наук України; у фермерському господарстві «Павільйон флори» Миргородського району Полтавської області; в навчальний процес КПІ ім. Ігоря Сікорського; в Науково-виробничому підприємстві «Техногаз» м. Полтави; в ТОВ «Інноваційні інженерні рішення» м. Києва.

10. Визначено напрямки подальшого розвитку запропонованої методології інтегрованого комплексного формоутворення технічних об'єктів, її поширення в інші, ніж сільське господарство, сфери життєдіяльності. Це стосується, зокрема, загального та галузевого машинобудування, енергетики, металургії, газової та нафтопереробної промисловості, медицини, освіти і т. д.

Головним досягненням дисертаційної роботи є розширення теоретичного ядра прикладної геометрії шляхом розроблення спеціальної теорії інтегрованого комплексного геометричного моделювання для якісно нового дослідження багатопараметричних складних технічних об'єктів і процесів, яку проілюстровано на прикладі ґрунтообробних знарядь. Отримали подальший розвиток напрацьовані теорії та методології наукової школи геометричного моделювання КПІ ім. Ігоря Сікорського, створено новий науковий напрямок «інтегрованого комплексного геометричного моделювання технічних об'єктів» у прикладній геометрії та інженерній графіці, побудовано нові інтегровані комплексні геометричні моделі для різноманітних ґрунтообробних знарядь, які реалізують багатоаспектну оптимізацію, впроваджено отримані результати у практику.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### Монографії

1. Яблонський П.М., Подкоритов А.М., Юрчук В.П. Використання теорії спряжених поверхонь під час конструювання робочих органів коренезбиральних машин. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 363 с. URL: <https://irbis-nbuv.gov.ua/publ/REF-0000780205> Особистий внесок здобувача: досліджено зв'язок геометрії ґрунтообробних знарядь з процесами обробітку ґрунту, сформульовано рекомендації щодо раціонального їхнього конструювання. Розроблено нові комп'ютерні геометричні моделі ґрунтообробних знарядь, які дозволяють зменшити кількість проведених натурних експериментів.

2. Яблонський П.М., Ванін В.В., Вірченко Г.А. Теоретичні основи структурно-параметричного геометричного моделювання виробів машинобудування. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 223 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/50383> Особистий внесок здобувача: опрацьовано питання використання розробленої методології та інструментарію геометричного моделювання в галузі сільсько-господарського машинобудування, зокрема для автоматизованого проєктування ґрунтообробних знарядь.

### Статті в наукових виданнях, проіндексованих у базах даних Scopus/ WoS

3. Yablonskyi P., Kutsenko L., Vanin V., Shoman O., Zapolskiy L., et al. Synthesis and classification of periodic motion trajectories of the swinging spring load. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 2, Issue 7 (98). P. 26–37. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.161769> Особистий внесок здобувача: запропоновано опрацювати з розглянутих теоретичних позицій конкретні приклади задач техніки, зокрема механічних пристроїв, де пружини впливають на траєкторії коливання їхніх вантажів.

4. Yablonskyi P., Kutsenko L., Vanin V., Shoman O., et al. Modelling the resonance of a swinging spring based on the synthesis of a motion trajectory of its load. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 3, Issue 7 (99). P. 53–64. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.168909> Особистий внесок здобувача: запропоновано використання хитних пружин в якості механічної моделі для аналізу сучасних технологічних процесів як динамічних систем.

5. Yablonskyi P., Volokha M., Rogovskii I., Fryshev S., Sobczuk H., Virchenko G. Modelling of transportation process in technological complex of beet harvesting machines. *Journal of Engineering Sciences*. 2023. Vol. 10(2). P. F1–F9. URL: [https://doi.org/10.21272/jes.2023.10\(2\).f1](https://doi.org/10.21272/jes.2023.10(2).f1) Особистий внесок здобувача: виконано

комп'ютерне геометричне моделювання технологічних сільськогосподарських процесів із метою їхньої оптимізації.

6. *Yablonskyi P., Rogovskii I., Sobczuk H., Virchenko G., Volokha M., Vorobiov O.* Computational approach to geometric modelling of plow bodies. *Journal of Engineering Sciences*, 2024. Vol. 11(1). P. E9–E18. URL: [https://doi.org/10.21272/jes.2024.11\(1\).e2](https://doi.org/10.21272/jes.2024.11(1).e2)  
**Особистий внесок здобувача:** розроблено математичний апарат комп'ютерного варіантного геометричного моделювання відвалів плугів.

**Статті у наукових виданнях, включених до Переліку  
наукових фахових видань України**

7. *Яблонський П.М., Гумен О.М.* Геометричне моделювання робочого органу ґрунтообробної фрези. *Праці Таврійського державного агротехно-логічного університету. Прикладна геометрія та інженерна графіка*. Мелітополь: ТДАТУ, 2012. Вип. 4. Т. 54. С. 43–47. URL: <http://search.nbuv.gov.ua/publ/REF-0000369942>  
**Особистий внесок здобувача:** удосконалено робочі органи ґрунтообробних знарядь шляхом використання їхніх раціональних конструктивних параметрів із метою підвищення ефективності кришіння ґрунту та зниження енергоємності застосовуваних процесів.

8. *Яблонський П.М., Юрчук В.П., Гумен О.М.* Алгоритм визначення граничного радіуса вирізу круглої форми сферичного ґрунтообробного диска за умови відсутності інтерференції. *Прикладна геометрія та інженерна графіка*. Київ: КНУБА, 2012. Вип. 89. С. 397–399. URL: <https://scholar.google.com.ua>  
**КНУБА Вип. 89 Особистий внесок здобувача:** отримано залежності між конструкційними параметрами та експлуатаційними характеристиками дискових ґрунтообробних знарядь.

9. *Яблонський П.М.* Деякі аспекти проектування ґрунтообробних дисків. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. Прикладна геометрія та інженерна графіка*. Мелітополь: ТДАТУ, 2013. Вип. 4. Т. 56. С. 258–262. URL: <https://scholar.google.com.ua> ТДАТУ Вип. 4. Т. 56

10. *Яблонський П.М., Подкоритов А.М., Юрчук В.П.* Використання теорії спряжених поверхонь при конструюванні сільськогосподарських знарядь. *Сучасні проблеми моделювання*. Мелітополь: МДПУ, 2017. Вип. 8. С. 159–164. URL: <http://magazine.mdpu.org.ua/index.php/spm/article/view/2226>  
**Особистий внесок здобувача:** обґрунтовано необхідність та ефективність використання нових методів геометричного моделювання поверхонь робочих органів сільськогосподарських машин.

11. *Яблонський П.М., Юрчук В.П.* Визначення параметрів спряжених поверхонь при коченні без ковзання в системі «вилка–диск». *Вісник Херсонського національного технічного університету*. Херсон: ХНТУ, 2017. Вип. 3(62). Т. 2. С. 348–351. URL: <https://kntu.net.ua> **ВІСНИК №3(62) Том 2.pdf**  
**Особистий внесок здобувача:** запропоновано застосування методу спряження поверхонь для геометричного моделюванні робочих органів ґрунтообробних знарядь.

12. *Яблонський П.М.* Деякі питання узагальнення засобів геометричного моделювання для проектування технічних об'єктів. *Сучасні проблеми моделювання*. Мелітополь: МДПУ, 2018. Вип. 13. С. 192–198. URL: <http://magazine.mdpu.org.ua/index.php/spm/article/view/2662>

13. *Яблонський П.М.* Деякі питання узагальнення формоутворення різального інструменту. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. Херсон: ХНТУ, 2019. Вип. 1(68). С. 73–77. URL: [https://kntu.net.ua/index.php/ukr/content/download/82033/475645/file/Вісник\\_№1\(68\).pdf](https://kntu.net.ua/index.php/ukr/content/download/82033/475645/file/Вісник_№1(68).pdf)

14. Яблонський П.М., Ванін В.В. Геометричне моделювання зони активної дії гвинтових робочих органів ґрунтообробних знарядь. *Сучасні проблеми моделювання*. Мелітополь: МДПУ, 2019. Вип. 15. С. 200–207. URL: <https://doi.org/10.33842/2313-125X/2019/15/200/207> Особистий внесок здобувача: визначено зону активної дії ґрунтообробного знаряддя шляхом її геометричного моделювання.

15. Яблонський П.М., Ванін В.В., Вірченко Г.А. Деякі геометричні аспекти класифікації дискових робочих органів ґрунтообробних знарядь. *Сучасні проблеми моделювання*. Мелітополь: МДПУ, 2019. Вип. 16. С. 70–75. URL: <https://doi.org/10.33842/2313-125X/2019/16/70/75> Особистий внесок здобувача: запропоновано спосіб класифікації дисків ґрунтообробних знарядь на базі структурно-параметричного підходу до формоутворення.

16. Яблонський П.М., Ванін В.В., Вірченко Г.А. Автоматизоване геометричне моделювання дискових робочих органів технічних об'єктів. *Інформаційні системи, механіка та керування*. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. Вип. 21. С. 5–13. URL: <https://doi.org/10.20535/2219-3804212019197602> Особистий внесок здобувача: розроблено теоретичні основи автоматизованого геометричного моделювання групи технічних об'єктів на прикладі ґрунтообробних дисків шляхом узагальнення засобів комп'ютерного формоутворення на засадах принципу інтеграції.

17. Яблонський П.М., Ванін В.В., Вірченко Г.А., Гетьман О.Г. Структурно-параметричне формоутворення як засіб інтеграції автоматизованого проектування технічних об'єктів. *Прикладна геометрія та інженерна графіка*. Київ: КНУБА, 2019. Вип. 95. С. 46–50. URL: <https://scholar.google.com.ua> КНУБА Вип. 95 Особистий внесок здобувача: виконано аналіз здобутків школи прикладної геометрії КПІ ім. Ігоря Сікорського щодо комп'ютерного формоутворення технічних об'єктів, показано узагальнюючий теоретичний характер напрацьованої методології геометричного моделювання.

18. Яблонський П.М., Ванін В.В., Вірченко Г.А., Незенко А.Й. Деякі актуальні задачі сучасного комп'ютерного геометричного моделювання технічних об'єктів. *Прикладна геометрія та інженерна графіка*. Київ: КНУБА, 2020. Вип. 97. С. 16–22. URL: <https://doi.org/10.32347/0131-579x.2020.97.16-22> Особистий внесок здобувача: визначено перспективний підхід до комп'ютерного формоутворення різної промислової продукції, зроблено прогноз необхідних способів, прийомів, алгоритмів і методик автоматизованого геометричного моделювання технічних об'єктів.

19. Яблонський П.М., Ванін В.В., Вірченко Г.А. До питання геометричного моделювання з використанням кривих Безьє. *Прикладна геометрія та інженерна графіка*. Київ: КНУБА, 2020. Вип. 98. С. 29–34. URL: <https://doi.org/10.32347/0131-579x.2020.98.29-34> Особистий внесок здобувача: розроблено математичний апарат для розрахунку площ криволінійних трапецій, обмежених кривими Безьє третього степеня.

20. Яблонський П.М., Вірченко Г.А. Деякі аспекти комп'ютерного геометричного моделювання з використанням кривих Безьє. *Прикладні питання математичного моделювання*. Херсон: ХНТУ, 2020. Т. 3, №1. С. 41–48. URL: <https://doi.org/10.32782/2618-0340/2020.1-3.4> Особистий внесок здобувача: вдосконалено обчислення площ криволінійних трапецій, обмежених кривими Безьє різних степенів.

21. Яблонський П.М., Ванін В.В., Вірченко Г.А., Юрчук В.П. Інтегрований комплексний підхід до геометричного моделювання дискових робочих органів

грунтообробних знарядь. *Сучасні проблеми моделювання*. Мелітополь: МДПУ, 2020. Вип. 18. С. 52–60. URL: <https://doi.org/10.33842/22195203/20210/18/52/60> Особистий внесок здобувача: опрацьовано деякі питання інтегрованого комплексного геометричного моделювання технічних об'єктів на прикладі дисків ґрунтообробних знарядь.

22. Яблонський П.М., Ванін В.В., Вірченко Г.А. До питання узагальнення структурно-параметричного формоутворення технічних об'єктів. *Прикладна геометрія та інженерна графіка*. Київ: КНУБА, 2020. Вип. 99. С. 56–64. URL: <https://doi.org/10.32347/0131-579x.2020.99.56-64> Особистий внесок здобувача: запропоновано узагальнення структурно-параметричних геометричних моделей застосуванням до їхніх елементів циклічних операцій формоутворення.

23. Яблонський П.М. Використання геометричних параметрів комбінованого сошника для визначення тягового опору при прямій сівбі. *Прикладна геометрія та інженерна графіка*. Київ: КНУБА, 2022. Вип. 103. С. 209–217. URL: <http://ageg.knuba.edu.ua/article/view/273599>

24. Яблонський П.М., Вірченко Г.А., Волоха М.П., Воробйов О.М., Лазарчук-Воробйова Ю.В. До питання аналізу геометричних моделей сучасних ґрунтообробних знарядь. *Сучасні проблеми моделювання*. Мелітополь: МДПУ, 2022. Вип. 24. С. 182–189. URL: <https://doi.org/10.33842/2313125X-2022-24-182-189> Особистий внесок здобувача: запропоновано спосіб інтегрованих класифікацій для автоматизованого формоутворення груп технічних об'єктів.

25. Яблонський П.М. Особливості конструкції пружинного запобіжного пристрою сошників для прямої сівби. *Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія: Механізація та автоматизація виробничих процесів*. Суми: СНАУ, 2022. Вип. 4 (50). С. 144–148. URL: <https://doi.org/10.32845/msnau.2022.4.21>

26. Яблонський П.М., Ванін В.В., Вірченко Г.А., Волоха М.П., Воробйов О.М. Вплив геометричних параметрів стрілчастої лапи на енергетичні показники комбінованого культиватора-сошника. *Прикладна геометрія та інженерна графіка*. Київ: КНУБА, 2023. Вип. 104. С. 30–37. URL: <http://ageg.knuba.edu.ua/article/view/283604> Особистий внесок здобувача: розроблено комп'ютерні геометричні моделі різних типів стрільчастих лап, виконано їхню інтеграцію з належними математичними описами енергетичних показників комбінованого культиватора-сошника.

27. Яблонський П.М., Ванін В.В., Вірченко Г.А., Лазарчук-Воробйова Ю.В., Воробйов О.М. Модульно-геометричний підхід в автоматизованому проєктуванні виробів машинобудування. *Прикладна геометрія та інженерна графіка*. Київ: КНУБА, 2023. Вип. 105. С. 16–22. URL: <http://ageg.knuba.edu.ua/article/view/297600> Особистий внесок здобувача: запропоновано деякі аспекти модульно-геометричного підходу до формоутворення технічних об'єктів у середовищі сучасних машинобудівних CAD/CAM/CAE систем.

28. Яблонський П., Волоха М., Лазарчук М., Лазарчук-Воробйова Ю., Воробйов О. Аналіз методів і особливостей цифровізації даних польових досліджень як бази для управління рослинництвом. *Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України*. Дослідницьке: УкрНДПВТ ім. Л. Погорілого, 2023. Вип. 33 (47). С. 22–34. URL: [https://doi.org/10.31473/2305-5987-2023-2-33\(47\)-2](https://doi.org/10.31473/2305-5987-2023-2-33(47)-2) Особистий внесок здобувача: запропоновано проаналізувати та систематизувати наявні методи цифровізації польових досліджень як бази для управління рослинництвом.

29. Яблонський П.М., Вірченко Г.А., Терещук М.О. Криві Безье зі степеневою параметризацією. *Прикладні питання математичного моделювання*. Херсон: ХНТУ, 2024. Т. 7, №1. С. 23–31. URL: <https://doi.org/10.32782/mathematical-modelling/2024-7-1-2> Особистий внесок здобувача: запропоновано математичний апарат степеневої параметризації для кривих Безье.

30. Yablonskyi P.M., Virchenko G.A., Voloha M.P, Lazarchuk-Vorobiova Y.V., Hrubych M.V. Structural-parametric shaping of soil tillage tools. *Прикладна геометрія та інженерна графіка*. Київ: КНУБА, 2024. Вип. 106. С. 17–26. URL: <http://ageg.knuba.edu.ua/article/view/307328> Особистий внесок здобувача: узагальнено деякі існуючі напрацювання наукової школи геометричного моделювання КПІ ім. Ігоря Сікорського щодо ґрунтообробних знарядь, визначено подальші перспективні напрямки досліджень.

### **Статті у наукових періодичних виданнях інших держав**

31. Yablonskyi P., Gumen O., Kolomiets N., Spodyniuk N. Computer graphics technologies in temperature space research of industrial building interiors. *Budownictwo o zoptymalizowanym potencjale energetycznym*, 2018. Vol. 7. № 2. P. 51–57. URL: <https://doi.org/10.17512/bozpe.2018.2.06> Особистий внесок здобувача: запропоновано поєднання інтегрованого комплексного підходу із засобами фізичного, математичного та комп'ютерного геометричного моделювання складних технічних об'єктів та належних технологічних процесів.

32. Yablonskyi P., Gumen O., Spodyniuk N. Studying the space of microclimate parameters of production premises. *Budownictwo o zoptymalizowanym potencjale energetycznym*, 2019. Vol. 8. № 2. P. 147–153. URL: <https://doi.org/10.17512/bozpe.2019.2.17> Особистий внесок здобувача: запропоновано застосування інтегрованого комплексного підходу для аналізу складних динамічних технічних систем на прикладі опрацювання параметрів мікроклімату виробничого приміщення за допомогою засобів геометричного моделювання.

### **Патенти на корисну модель**

33. Яблонський П.М., Юрчук В.П., Карпюк В.В., Бакалова В.М., Святина М.А. Комбінований ґрунтообробний диск. Патент на корисну модель № 81749. Номер заявки u201300775. Дата заявки 22.01.2013. Патент опубліковано 10.07.2013. Бюл. № 13. 3 с. URL: <https://uapatents.com/5-81749-kombinovanijj-runtoobrobniijj-disk.html> Особистий внесок здобувача: визначено геометрію комбінованого ґрунтообробного диска з послідовно поєднаними поясами, які утворюють випукло-ввігнутий профіль твірної диска.

34. Яблонський П.М., Юрчук В.П., Карпюк В.В., Макаров В.І., Святина М.А. Дисківий копач. Патент на корисну модель № 84233. Номер заявки u201305691. Дата заявки 30.04.2013. Патент опубліковано 10.10.2013. Бюл. № 19. 3 с. URL: <https://uapatents.com/5-84233-diskovijj-kopach.html> Особистий внесок здобувача: запропоновано покращення руйнування пласта землі за рахунок дисків, що створюють русло стискання та розширення пласта.

35. Яблонський П.М., Юрчук В.П., Вознюк Т.А., Святина М.А., Изволенська А.Є., Глінський Є.М. Дисківа борона. Патент на корисну модель № 85964. Номер заявки u201306664. Дата заявки 28.05.2013. Патент опубліковано 10.12.2013. Бюл. № 23. 2 с. URL: <https://uapatents.com/4-85964-diskova-borona.html> Особистий внесок здобувача: розроблено дисківу борону зі щілинами та змонтованими різальними ножами, розміщеними вздовж циклоїд.

36. Яблонський П.М., Кувшинов О.В., Юрчук В.П. Сортувальний стіл картоплезбирального комбайна. Патент на корисну модель № 138616. Номер заявки u201904387. Дата заявки 23.04.2019. Патент опубліковано 10.12.2019. Бюл. № 23. 2 с. URL: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1396020/> Особистий внесок здобувача: удосконалено сортувальний стіл, що містить чотирирядні калібровані диски з комірками, які змінюють свій зазор, адаптуючись до розміру картоплі.

37. Яблонський П.М., Ванін В.В., Вірченко Г.А., Кувшинов О.В., Юрчук В.П. Плуг ротаційний ґрунтообробний. Патент на корисну модель № 150362. Номер заявки u202105694. Дата заявки 08.10.2021. Патент опубліковано 02.02.2022. Бюл. № 5. 2 с. URL: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1676046/> Особистий внесок здобувача: запропоновано П-подібні ножі поділяти на частини раціональної геометричної форми

### **Матеріали конференцій**

38. Яблонський П.М., Григорович О.О., Юрчук В.П., Мазуренко П.Т., Огороднік Б.М. Геометричне конструювання пірамідальної робочої поверхні зубів землерійних машин. *Тези доповідей I конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Прикладна геометрія, дизайн та інноваційна діяльність»*. Київ: НТУУ «КПІ», 2012. С. 20–22. URL: <https://scholar.google.com.ua> КПІ Конф. 1 Особистий внесок здобувача: розроблено нову поверхню зубів землерійних машин, яка знижує енергоємність обробітку ґрунту.

39. Яблонський П.М., Мудрак Ю.М. Побудова тривимірної моделі сферичного ґрунтообробного диска з використанням САПР. *Тези доповідей I конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Прикладна геометрія, дизайн та інноваційна діяльність»*. Київ: НТУУ «КПІ», 2012. С. 153–155. URL: <https://scholar.google.com.ua> КПІ Конф. 1 Особистий внесок здобувача: розроблено комп'ютерну тривимірну геометричну модель сферичного ґрунтообробного диска.

40. Яблонський П.М., Глінський Є.М., Святина М.А., Юрчук В.П. Моделювання траєкторії розміщення зубців дискової борони. *Матеріали II міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Прикладна геометрія, дизайн та об'єкти інтелектуальної власності»*. Київ: ДІА, 2013. С. 41–42. URL: [https://geometry.kpi.ua/files/IIconference\\_geometry\\_FMF.pdf](https://geometry.kpi.ua/files/IIconference_geometry_FMF.pdf) Особистий внесок здобувача: розроблено геометричний підхід до моделювання робочої поверхні дискової борони, яка містить щілини з ножами.

41. Яблонський П.М., Жищинський В.П., Ковалюк Т.В. Графоаналітичне моделювання поверхні зуба землерійної машини. *Матеріали II міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Прикладна геометрія, дизайн та об'єкти інтелектуальної власності»*. Київ: ДІА, 2013. С. 64–65. URL: [https://geometry.kpi.ua/files/IIconference\\_geometry\\_FMF.pdf](https://geometry.kpi.ua/files/IIconference_geometry_FMF.pdf) Особистий внесок здобувача: запропоновано зміну геометричної форми робочих граней зуба землерійної машини.

42. Яблонський П.М., Гребелюк І.В., Святина М.А. Конструювання пристрою для викопування коренеплодів та інших клубнів. *Матеріали III міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Прикладна геометрія, дизайн та об'єкти інтелектуальної власності»*. Київ: ДІА, 2014. С. 68–70. URL: [https://geometry.kpi.ua/files/IIIconference\\_geometry\\_FMF.pdf](https://geometry.kpi.ua/files/IIIconference_geometry_FMF.pdf) Особистий внесок здобувача: вдосконалено ґрунтообробну складову конструкції коренезбиральних пристроїв та визначено їхні раціональні параметри.

43. Яблонський П.М., Дворник В.А. Екстремуми в геометричних задачах: основні методи розв'язування екстремальних задач. *Матеріали V всеукраїнської науково-*



практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Прикладна геометрія, дизайн, об'єкти інтелектуальної власності та інноваційна діяльність». Київ: ДІА, 2016. С. 79–83. URL: [https://ng-kg.kpi.ua/files/Sbornik\\_2016.pdf](https://ng-kg.kpi.ua/files/Sbornik_2016.pdf) Особистий внесок здобувача: акцентовано важливість екстремальних задач для практики.

44. Яблонський П.М., Подкоритов А.М., Юрчук В.П. Використання теорії спряжених поверхонь при проектуванні робочих поверхонь ґрунтообробних знарядь. *Тези доповідей 19 міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні проблеми геометричного моделювання»*. Мелітополь: МДПУ, 2017. С. 40. URL: [https://geometry.kpi.ua/files/Тези\\_Мелітополь\\_19\\_конференція.pdf](https://geometry.kpi.ua/files/Тези_Мелітополь_19_конференція.pdf) Особистий внесок здобувача: обґрунтовано необхідність напрацювання нових методів геометричного моделювання робочих органів сільськогосподарських машин.

45. Яблонський П.М., Юрчук В.П. Визначення параметрів спряжених поверхонь при коченні без ковзання в системі «вилка-диск». *Матеріали XVIII міжнародної конференції з математичного моделювання*. Херсон: ХНТУ, 2017. С. 139–140. URL: [https://mkmm.org.ua/upload/МАТЕРІАЛИ\\_МКММ-2017.pdf](https://mkmm.org.ua/upload/МАТЕРІАЛИ_МКММ-2017.pdf) Особистий внесок здобувача: запропоновано застосування методу спряження поверхонь для геометричного моделювання робочих органів ґрунтообробних знарядь.

46. Яблонський П.М., Юрчук В.П., Шпаченко К.О. Геометричне моделювання процесу викопування коренеплодів – основа проектування коренезбиральних машин. *Тези доповідей VII всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Прикладна геометрія, дизайн, об'єкти інтелектуальної власності та інноваційна діяльність»*. Київ: НТУУ «КПІ», 2018. С. 130–133. URL: [https://ng-kg.kpi.ua/files/Збірник\\_2018\\_ел\\_вар..pdf](https://ng-kg.kpi.ua/files/Збірник_2018_ел_вар..pdf) Особистий внесок здобувача: розглянуто питання формалізації зв'язків агротехнологічних вимог з апаратом геометричного моделювання робочих поверхонь сільськогосподарських машин.

47. Яблонський П.М. Інтегроване комплексне геометричне моделювання технічних об'єктів. *Збірник тез доповідей XIV міжнародної науково-практичної конференції «Обухівські читання»*. Київ: НУБіП України, 2019. С. 52–54. URL: [https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u132/obuhovski\\_chitannya\\_2019\\_tezi\\_0.pdf](https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u132/obuhovski_chitannya_2019_tezi_0.pdf)

48. Yablonskyi P., Vanin V. Geometrical modelling of screw working tools of soil-processing tools and active area of their action. *Тези доповідей 21 міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні проблеми геометричного моделювання»*. Мелітополь: МДПУ, 2019. С. 30. URL: [https://geometry.kpi.ua/files/Тези\\_Мелітополь\\_21\\_конференція.pdf](https://geometry.kpi.ua/files/Тези_Мелітополь_21_конференція.pdf) Особистий внесок здобувача: запропоновано для математичного опису активної зони гвинтових робочих органів ґрунтообробних знарядь використовувати евольвентно-еволютні моделі.

49. Яблонський П.М., Ванін В.В., Вірченко Г.А. Комп'ютерне геометричне моделювання дискових робочих органів ґрунтообробних знарядь. *Збірник тез доповідей XV міжнародної науково-практичної конференції «Обухівські читання»*. Київ: НУБіП України, 2020. С. 50–53. URL: [https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u231/obuhovski\\_chitannya\\_2020\\_tezi.pdf](https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u231/obuhovski_chitannya_2020_tezi.pdf) Особистий внесок здобувача: запропоновано методіку автоматизованого геометричного моделювання групи технічних об'єктів на прикладі дискових ґрунтообробних знарядь.

50. Яблонський П.М., Ванін В.В., Вірченко Г.А. Сучасний стан, актуальні проблеми та напрямки розвитку наукової школи прикладної геометрії НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». *Збірник тез доповідей*

міжнародної науково-практичної конференції «Графічні технології моделювання об'єктів, процесів та явищ». Одеса: Військова академія, 2020. С. 7–9. URL: [http://eprints.library.odku.edu.ua/id/eprint/6987/1/VelykodniySS\\_Upravlinnja\\_vidkryt\\_ym\\_proektom\\_2020.pdf](http://eprints.library.odku.edu.ua/id/eprint/6987/1/VelykodniySS_Upravlinnja_vidkryt_ym_proektom_2020.pdf) Особистий внесок здобувача: проаналізовано сучасний стан, актуальні проблеми та напрямки розвитку наукової школи прикладної геометрії КПІ ім. Ігоря Сікорського.

51. Яблонський П.М., Ванін В.В., Вірченко Г.А. Деякі актуальні питання сучасного комп'ютерного геометричного моделювання технічних об'єктів. *Збірник тез доповідей міжнародної науково-практичної конференції «Графічні технології моделювання об'єктів, процесів та явищ»*. Одеса: Військова академія, 2020. С. 16. URL: [http://eprints.library.odku.edu.ua/id/eprint/6987/1/VelykodniySS\\_Upravlinnja\\_vidkryt\\_ym\\_proektom\\_2020.pdf](http://eprints.library.odku.edu.ua/id/eprint/6987/1/VelykodniySS_Upravlinnja_vidkryt_ym_proektom_2020.pdf) Особистий внесок здобувача: обґрунтовано, що для досягнення ефективних результатів комп'ютерного геометричного моделювання різноманітної промислової продукції необхідно здійснювати узагальнення засобів формоутворення та відповідних об'єктів проектування.

52. Yablonskyi P., Zalevska O., Sydorenko Yu., Naidysh A., Finogenov O., et al. Construction and Study of the Mathematical Model for the System Using Three-Dimensional Cellular Automata. *IEEE 16th international Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems*. Lviv, 2021. P. 49–52. (Індексується в наукометричній базі Scopus). URL: <http://doi.org/10.1109/CADSM52681.2021.9385235> Особистий внесок здобувача: акцентовано важливість забезпечення створюваними математичними моделями потрібного впливу на досліджувані динамічні процеси, їхньої належної комп'ютерної візуалізації.

53. Яблонський П.М., Ванін В.В., Воробйов О.М. До питання інтегрованого комплексного геометричного моделювання ґрунтообробних знарядь. *Збірник доповідей XI міжнародної науково-практичної конференції «Прикладна геометрія, інженерна графіка та об'єкти інтелектуальної власності»*. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. С. 4–7. URL: [https://ng-kg.kpi.ua/files/konferencii/2022/Zbirnik\\_2022.pdf](https://ng-kg.kpi.ua/files/konferencii/2022/Zbirnik_2022.pdf) Особистий внесок здобувача: на основі розроблених інтегрованих комплексних способів геометричного моделювання окреслено напрямки напрацювання нових методик і прийомів комп'ютерного структурно-параметричного формоутворення ґрунтообробних знарядь, удосконалення відповідного методичного, інформаційного та програмного забезпечення CAD/CAM/CAE систем.

54. Яблонський П.М., Воробйов О.М. Аналіз сучасного стану геометричного моделювання ґрунтообробних знарядь. *Тези доповідей 24 міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні проблеми геометричного моделювання»*. Мелітополь: МДПУ, 2022. С. 10. URL: <http://magazine.mdpu.org.ua/index.php/spm/issue/view/121/26> Особистий внесок здобувача: обґрунтовано можливість і доцільність поширення методології структурно-параметричного формоутворення на розв'язання типових задач проектування сільськогосподарської техніки.

55. Яблонський П.М., Вірченко Г.А., Волоха М.П., Воробйов О.М., Голова О.О., Лазарчук-Воробйова Ю.В. Комп'ютерне геометричне моделювання ґрунтообробних знарядь засобами структурно-параметричного формоутворення. *Збірник тез доповідей XVII міжнародної науково-практичної конференції «Обухівські читання»*. Київ: НУБіП України, 2023. С. 39–42. URL: [https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u231/obuhovski\\_chitannya\\_2023.pdf](https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u231/obuhovski_chitannya_2023.pdf) Особистий внесок здобувача: розроблено інтегровану структурно-параметричну варіантну комп'ютерну геометричну модель лапи-полиці для її комплексної оптимізації.

56. Яблонський П. М., Ванін В. В. Аналіз сучасних сошників для прямої сівби просапних культур. *Збірник тез доповідей XVII міжнародної науково-практичної конференції «Обухівські читання»*. Київ: НУБіП України, 2023. С. 65–69. URL: [https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u231/obuhovski\\_chitannya\\_2023.pdf](https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u231/obuhovski_chitannya_2023.pdf) Особистий внесок здобувача: виконано аналіз сошників для прямої сівби просапних культур.

57. Яблонський П. М., Фришев С. Г., Лукач В. С., Василюк В. І., Ікальчик М. І., Волоха М. П. Моделювання процесу транспортування коренеплодів цукрових буряків після викопування. *Матеріали XIII міжнародної науково-практичної конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем»*. Чернігів: НУ «Чернігівська політехніка», 2023. Том 1. С. 133–134. URL: <https://conference-chernihiv-polytechnik.com/wp-content/uploads/2023/06/Tezy-2023-Part-1.pdf> Особистий внесок здобувача: запропоновано варіантне моделювання транспортування коренеплодів цукрових буряків після викопування з метою проведення комплексної оптимізації зазначених технологічних процесів.

58. Яблонський П. М., Ванін В. В., Вірченко Г. А., Волоха М. П., Воробйов О. М., Лазарчук-Воробйова Ю. В. Удосконалення конструкції комбінованого лапового культиватора-сошника. *Збірник доповідей XII міжнародної науково-практичної конференції «Прикладна геометрія, інженерна графіка та об'єкти інтелектуальної власності»*. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. С. 4–7. URL: [https://ng-kg.kpi.ua/files/Збірник\\_2023\\_12\\_випуск.pdf](https://ng-kg.kpi.ua/files/Збірник_2023_12_випуск.pdf) Особистий внесок здобувача: удосконалено конструкцію лапового культиватора-сошника з метою зниження тягового опору та підвищення якості сівби.

59. Яблонський П. М., Вірченко Г. А., Волоха М. П., Воробйов О. М., Голова О. О., Лазарчук-Воробйова Ю. В. Геометричне моделювання стрілчастих лап засобами структурно-параметричного формоутворення. *Збірник тез доповідей XVIII міжнародної науково-практичної конференції «Обухівські читання»*. Київ: НУБіП України, 2024. С. 43–46. URL: [https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u231/obuhovski\\_chitannya\\_2024\\_tezi\\_3\\_4.pdf](https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u231/obuhovski_chitannya_2024_tezi_3_4.pdf) Особистий внесок здобувача: розроблено узагальнені геометричні моделі стрілчастих лап на основі поверхонь Кунса.

60. Яблонський П. М., Вірченко Г. А., Роговський І. Л., Волоха М. П., Воробйов О. М. Варіантні комп'ютерні геометричні моделі відвалів полицевого плуга. *Матеріали XIV міжнародної науково-практичної конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем»*. Чернігів: НУ «Чернігівська політехніка», 2024. Том 1. С. 76–78. URL: [https://drive.google.com/file/d/1s2IU7CHhsXHLKxCXEVMEM\\_AxquSi6b0q/view](https://drive.google.com/file/d/1s2IU7CHhsXHLKxCXEVMEM_AxquSi6b0q/view) Особистий внесок здобувача: визначено основи запропонованого комп'ютерного варіантного геометричного моделювання відвалів полицевих плугів.

61. Яблонський П. М., Вірченко Г. А., Волоха М. П. Інтегроване комплексне геометричне моделювання ґрунтообробних знарядь. *Тези доповідей 26 міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні проблеми геометричного моделювання»*. Запоріжжя: МДПУ, 2024. С. 18. URL: <http://magazine.mdpu.org.ua/index.php/spm/issue/view/130/42> Особистий внесок здобувача: виконано опис основних положень інтегрованого комплексного геометричного моделювання ґрунтообробних знарядь.

62. Яблонський П. М., Вірченко Г. А., Волоха М. П., Воробйов О. М., Лазарчук-Воробйова Ю. В. Комп'ютерне варіантне формоутворення стрілчастих лап. *Збірник доповідей XIII міжнародної науково-практичної конференції «Прикладна геометрія, інженерна графіка та об'єкти інтелектуальної власності»*. Київ: КПІ

ім. Ігоря Сікорського, 2024. С. 4–7. URL: [https://ng-kg.kpi.ua/files/Збірник\\_2024\\_Остат\\_var.pdf](https://ng-kg.kpi.ua/files/Збірник_2024_Остат_var.pdf)  
**Особистий внесок здобувача:** запропоновано інтегровану методику комп'ютерного геометричного моделювання, яка поєднує етап варіантного опрацювання робочих поверхонь і стадію автоматизованого конструювання стрілчастих лап.

### **Додаткові публікації**

63. Яблонський П.М., Ванін В.В., Вірченко Г.А., Гумен О.М., Юрчук В.П. Сучасний стан і перспективи подальшого розвитку наукової школи прикладної геометрії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». *Прикладні питання математичного моделювання*. Херсон: ХНТУ, 2018. Вип. 2. С. 17–23. URL: <https://doi.org/10.32782/2618-0340-2018-2-17-23>  
**Особистий внесок здобувача:** виконано аналіз сучасного стану, основних напрямків досліджень, отриманих здобутків та перспектив подальшого розвитку наукової школи прикладної геометрії КПІ ім. Ігоря Сікорського, визначено потреби формування інтегрованої комплексної методології геометричного моделювання технічних об'єктів, процесів їхнього виготовлення та експлуатації.

64. Яблонський П.М., Ванін В.В., Вірченко Г.А., Волоха М.П., Воробйов О.М. До питання комп'ютерного геометричного моделювання ґрунтообробних знарядь засобами структурно-параметричного формоутворення. *Прикладна геометрія та інженерна графіка*. Київ: КНУБА, 2022. Вип. 103. С. 16–22. URL: <http://ageg.knuba.edu.ua/article/view/273326>  
**Особистий внесок здобувача:** запропоновано методику комп'ютерного геометричного моделювання ґрунтообробних знарядь, проілюстровану на прикладі лап-полиць культиваторів.

### **АНОТАЦІЯ**

**Яблонський П.М. Інтегроване комплексне геометричне моделювання ґрунтообробних знарядь.** – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.01.01 «Прикладна геометрія, інженерна графіка». – Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна, 2025.

Дослідження присвячено розв'язанню важливої науково-прикладної проблеми підвищення ефективності автоматизованого формоутворення технічних об'єктів на прикладі ґрунтообробних сільськогосподарських знарядь. Шляхом розширення теоретичного ядра прикладної геометрії, узагальнення та подальшого розвитку напрацьовань наукової школи геометричного моделювання Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» створено новий науковий напрямок «інтегрованого комплексного геометричного моделювання технічних об'єктів» у прикладній геометрії та інженерній графіці. Розроблено спеціалізовану теорію, методологію та інструментарій у вигляді належних нових способів, прийомів, алгоритмів, методик та моделей для виконання відповідних комп'ютерних побудов. Упроваджено отримані наукові результати у практику. Визначено перспективні напрямки подальшого розвитку запропонованої методології, її поширення в інші, ніж сільське господарство, сфери життєдіяльності людей. Це стосується, зокрема, загального та галузевого машинобудування, енергетики, металургії, газової та нафтопереробної промисловості, медицини, освіти і т. д.

**Ключові слова:** автоматизоване проєктування, геометричне моделювання, ґрунтообробні знаряддя, інтегровані комплексні геометричні моделі, сільськогосподарське виробництво, структурно-параметричне формоутворення, технічні об'єкти.

## ANNOTATION

**Yablonskyi P.M. Integrated complex geometric modelling of tillage tools.** – Qualifying scientific work, the manuscript.

Thesis for the degree of a Doctor of Engineering Sciences in specialty 05.01.01 «Applied geometry, engineering graphics». – Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine, 2025.

The importance of the chosen topic of scientific research is determined by the need to expand the theoretical core of applied geometry by developing a special theory of integrated complex geometric modeling for a qualitatively new study of multi-parameter complex technical objects and processes on the example of tillage implements. There is also a need to generalize the theoretical provisions developed by the Scientific School of Geometric Modelling of Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute. Practical demands regarding highly efficient means of computer modelling of various technical objects, in particular agricultural tillage implements, as well as the processes of their manufacture and operation, are important. This is due to the fact that the creation of modern industrial products is characterized by the widespread use of CAD/CAM/CAE systems, which allow not only to improve the quality of processed objects, but also to significantly reduce various costs throughout their entire life cycle. In many cases, the basis of computer information technologies is constituted by the geometric models of developed industrial products. Therefore, the problem of further improvement of automated geometric modelling tools is quite relevant.

The dissertation was completed at the Department of Descriptive Geometry, Engineering and Computer Graphics of the National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» in accordance with the subject of research within the framework of the scientific and technical work «Automated variant geometric modelling of technical objects» with the state registration number 0114U002701.

The *object of the research* is automated geometric modelling of technical objects. The *subject of the research* is integrated complex geometric modelling of tillage tools.

The analysis of available literary sources on the dissertation topic was performed in this scientific work. The current state of geometric modelling of tillage implements is described, and the prospects for its further development are outlined. The objectives of the dissertation research were determined on this basis. The main goal is to develop a specialized theory and methodology for integrated complex shaping of various tillage tools, as well as to disseminate the proposed methods, techniques and algorithms of automated geometric modelling in other branches of the national economy.

The methods of analytical, differential and computational geometry, systems approach, theory of algorithms, informatics, computer graphics, sets and graphs, optimization, programming, computer-aided design of technical objects, engineering technology, agricultural production, etc. were used to solve the problems.

The dissertation presents the proposed integrated complex methodology of automated geometric modelling, sets out the appropriate basic theoretical provisions, and provides a general description of the developed approach. The new methods, techniques and algorithms are considered, in particular: the method of integrated classifications for the automated shaping of technical objects groups; the generalized contour method; the method of reducing the project solutions area. The corresponding modelling technique is presented; attention is focused on its invariant components and special modules, and the features of their practical use. The procedure for creating integrated complex geometric models of tillage implements is proposed.

A generalized systematization of automated geometric modelling tools, which includes multidimensional figures and methods of their formation, is developed. The proposed structural-parametric classification of tillage tools, which includes implements for *basic tillage* (shelf, disk, chisel), *surface cultivation* (harrows, cultivators, rollers, milling cutters, combined) and *special tillage* (plantation and garden plows, pit diggers), is presented. Appropriate integrated complex geometric models were built, their advantages were emphasized, and directions for possible improvement were outlined.

The issues of practical implementation of the proposed methodology to computer shaping in the field of agricultural production, application in the higher school educational process and implementation in other branches of the national economics have been worked out. The prospects for further development of integrated complex geometric modelling are outlined. In particular, a critical analysis of the obtained theoretical and practical results was performed. The main directions for improving of the developed methodology, expanding the scope of its effective application are determined.

The scientific novelty of the dissertation results is that for the *first time*:

- the special theory, methodology and toolkit of integrated complex geometric modelling have been developed for a qualitatively new study of multi-parametric complex technical objects and processes using the example of tillage implements;
- the new methods of computer integrated complex geometric modelling have been developed (the method of integrated classifications for automated shaping of groups of technical objects; the method of generalized contour; the method of reducing the area of design solutions);
- the new integrated complex geometric models of shelf, disc and chisel agricultural implements have been developed on the basis of the proposed methods;
- the generalized geometric model of the working surfaces of a wide range shelf and chisel implements has been developed for the purpose of comprehensive optimization;
- the dependencies of changes in the angles of loosening, rotation and shift of shelf working surfaces have been determined, which is especially important for ensuring high agro-technical performance of implements;
- the possibility of using the methodology of integrated complex geometric modelling in other spheres of life, except agriculture, is substantiated.

The basics of structural-parametric shaping were improved by the methodology of integrated complex geometric modelling.

The theoretical core of applied geometry has been further developed in terms of special integrated complex geometric modelling for a qualitatively new study of multi-parametric complex technical objects and automated design in the form of proposed integrated complex geometric models using the example of tillage implements.

Hence, the significance of this dissertation research for science lies in the further development of the theoretical foundations of automated variant computer shaping on the basis of new provisions, methods and techniques, and for practice – in the construction of new integrated complex geometric models of various tillage tools. These achievements improve the quality of agricultural machinery; reduce the cost of its design, manufacture and operation. The obtained scientific results of the completed dissertation research have been implemented into practice.

*Key words:* computer-aided design, geometric modelling, tillage tools, integrated complex geometric models, agricultural production, structural-parametric shaping, technical objects.