

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Міністерство освіти і науки України

Київський національний університет будівництва і архітектури
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ЯБЛОНСЬКИЙ ПЕТРО МИКОЛАЙОВИЧ

УДК 514.18


ДИСЕРТАЦІЯ

**ІНТЕГРОВАНЕ КОМПЛЕКСНЕ ГЕОМЕТРИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ
ГРУНТООБРОБНИХ ЗНАРЯДЬ**

Спеціальність 05.01.01 – Прикладна геометрія, інженерна графіка
Галузь знань – Технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело



П.М. Яблонський

Київ – 2024

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». – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна, 2025.

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, розвідки в 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.

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».

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*: *проаналізувати* стан розвитку прикладної геометрії в частині моделювання ґрунтообробних знарядь; *обґрунтувати необхідність та доцільність* інноваційного розвитку базових компонентів наукової підсистеми теоретичного ядра прикладної геометрії з позиції інтегрованого комплексного формоутворення; *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; *розробити* нові способи комп'ютерного інтегрованого комплексного геометричного моделювання (інтегрованих класифікацій для автоматизованого формоутворення груп технічних об'єктів; узагальненого контуру; зменшення області проектних розв'язків); *розробити* узагальнену геометричну модель робочих поверхонь широкої номенклатури полицевих і чизельних знарядь з метою здійснення їхньої комплексної оптимізації; *провести* аналіз змінювання кутів розпушення, обертання та зсуву ґрунту різноманітних полицевих робочих поверхонь, що особливо важливо для забезпечення високих агротехнічних показників сільськогосподарських знарядь; *створити* математичну модель профілю борозни для дискових

робочих органів у залежності від їхніх конструкційних та експлуатаційних параметрів; *розробити* спеціалізований геометрично-математичний інструментарій для вдосконалення конструкції пружинного запобіжника лапових культиваторів-сошників, який дозволяє ефективно враховувати наявні умови експлуатації; *упровадити* отримані наукові результати у практику сільськогосподарського виробництва; *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.

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; проєктування, 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 проєктних 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; у фермерському господарстві «Павільйон флори» Миргородського району Полтавської області під час проведення лабораторно-польових експериментальних досліджень дискових поверхонь, виконаних згідно з методикою здобувача; у навчальний процес КПІ ім. Ігоря Сікорського при викладанні дисципліни «Інженерна та комп'ютерна графіка» студентам машинобудівних спеціальностей і на факультеті інформатики та обчислювальної техніки під час формування комплексних комп'ютерних геометричних моделей технічних об'єктів; у Науково-виробничому підприємстві «Техногаз» м. Полтави застосуванням розробленого підходу та способів комп'ютерного моделювання, що сприяють покращенню інтеграції складових комплексної підготовки газу; у ТОВ «Інноваційні інженерні рішення» м. Києва використанням напрацьованої методології при створенні проєктів будівельно-монтажних робіт.

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.

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.

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». – National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine, 2025.

The creation of modern technical objects is characterized by the intensive use of integrated CAD/CAM/CAE/PLM (Computer-Aided Design/ Computer-Aided Manufacturing/ Computer-Aided Engineering/Product Life-cycle Management) systems, which allow to increase product quality and significantly reduce costs throughout the entire life cycle. The prospects of this approach indicate the possibility of its effective application in various sectors of the national economy. The methodology for the development of applied geometry allows for the necessary and effective scientific research. This ensures not only the expansion of the boundaries of the scientific system, but also the development of qualitatively new innovative methodologically sound theories to improve the competitiveness of production systems, which, in turn, will reduce costs while increasing the quality of industrial products. The theoretical core of the methodology evolution of applied geometry, developed by Doctor of Technical Sciences, Professor V.A Plosky, allows conducting research related to the development of a special theory of integrated complex geometric modelling. This is due to the fact that one of the basic components of the scientific subsystem for the development of the theoretical core of applied geometry from the perspective of integrated complex geometric modelling is the development of a special theory of computer-aided shaping. This theory implements the definition and creation of special tools that allow visualization of the geometry of processed objects and facilitates the implementation of complex multi-criteria optimization. Such a toolkit will allow the creation of a topologically higher-quality series of geometric models, which during

the iterative variant development of a large number of technical products for specialists of various profiles comprehensively perform a coordinating and generalizing role. This approach meets the requirements of ISO 9000 standards for ensuring the proper quality of industrial products.

The above-mentioned relevant scientific and applied problem determined the topic of this dissertation research. In the outlined aspect, further development of the theoretical core of the methodology of applied geometry is important, namely, *the development of the special theory of integrated complex geometric modelling.*

The development of such the special theory is determined by the need for systematization, qualitative renewal and development of existing scientific, scientific-practical and applied approaches of the Scientific School «Geometric modelling of objects, processes and phenomena» (headed by Doctor of Technical Sciences, Professor V.V. Vanin) of the Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute. It is in this understanding that the integration of the directions of structural-parametric shaping of technical objects, the development of agricultural machinery, and exploration in the field of multi-dimensional geometry is carried out. The urgent need for highly efficient means of computer-aided design of various industrial products, including the digitalization of the processes of manufacturing and operation of tillage tools, requires the latest high-quality and effective scientific and applied solutions. In the current difficult wartime conditions in Ukraine, industrial production is considered a necessity for the sustainable development of the national economy. Since Ukraine is an agrarian country, and agriculture plays an important role in the economy of our state, the improvement of the corresponding production is urgent and important from the point of view of the national security of our state.

Thus, the solution to the above-described problems lies in the need to expand not only the theoretical core of applied geometry, but also the tools of geometric modelling by *developing a special theory of integrated complex geometric shaping for a qualitative new study of multi-parametric complex technical objects and processes*, in particular for the development of the methodology of applied

geometry in the context of increasing the efficiency and quality of agricultural tillage tools.

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 purpose of the work is the need to expand the theoretical core of applied geometry by developing the special theory of integrated complex geometric modelling for a qualitatively new study of multi-parametric complex technical objects and processes using the example of tillage tools.

To achieve the specified goal, *the following tasks were set: to analyze* the state of development of applied geometry in terms of modelling tillage implements; *to substantiate* the necessity and expediency of innovative development of the basic components of the scientific subsystem of the theoretical core of applied geometry from the position of integrated complex shaping; *to develop* the special theory, methodology and tools of complex integrated geometric modelling for a qualitatively new study of multi-parametric complex technical objects and processes using tillage implements as an example; *to develop* new methods of computer integrated complex geometric modelling (integrated classifications for automated shaping of groups of technical objects; generalized contour; reduction of the area of design solutions); *to develop* the generalized geometric model of the working surfaces of a wide range of shelf and chisel tools for the purpose of their comprehensive optimization; *to analyze* changes in the angles of loosening, rotation and landslide of various shelf working surfaces, which is especially important for ensuring high agro-technical performance of agricultural implements; *to create* a mathematical model of the furrow profile for disc working bodies depending on their design and operational parameters; *to develop* the specialized geometrical

mathematical toolkit for improving the design of the spring fuse of paw cultivators-coulters, which allows to effectively take into account the existing operating conditions; *to implement* the obtained scientific results into the practice of agricultural production; *to determine* the directions for further development of the proposed methodology of integrated complex geometric modelling of technical objects.

The *object of the research* is automated geometric modelling of technical objects and processes.

The *subject of the research* is integrated complex geometric modelling of tillage tools.

To accomplish the set tasks, the following methods were used: analytical, differential, computational, descriptive geometry; approximation and interpolation; mathematical analysis; set and graph theory; computer graphics; theory of algorithms; programming; design, manufacture and operation of tillage tools; structural-parametric optimization.

The theoretical basis for the research carried out is the works of domestic and foreign scientists on the theory of curves and surfaces, computational geometry, modelling of objects, processes and phenomena, design, manufacture and operation of agricultural machinery.

Scientific novelty of the obtained results.

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*.

Improved:

- the basic principles of structural-parametric shaping using the methodology of integrated complex geometric modelling.

The following were further developed:

- the theoretical core of applied geometry in terms of developing the special theory of integrated complex geometric modelling for a qualitatively new study of multi-parametric complex technical objects and processes;
- the theory of automated design of technical objects in the form of proposed complex integrated geometric models using the example of tillage implements.

The validity and reliability of the results are ensured by the proper use of mathematical apparatus for the studied geometric figures and the processed technical objects, the conduct of computer experiments, the implementations in practice.

The practical significance of the obtained results lies in meeting current needs for new highly effective means of computer modelling of technical objects in order to improve their quality during design, manufacture and operation. The obtained achievements are illustrated by the example of the methodology of integrated complex automated shaping of soil tillage tools. The obtained results have been implemented: in the Ivanovska Research and Breeding Station of the

Institute of Bioenergy Crops and Sugar Beet of the National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine during soil cultivation before sowing agricultural crops with disc made according to the geometric models proposed in the dissertation; in the farm «Flora Pavilion» of the Myrhorod district of the Poltava region during laboratory and field experimental studies of disc surfaces performed according to the applicant's methodology; in the educational process of Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute when teaching the discipline «Engineering and Computer Graphics» to students of mechanical engineering specialties and at the Faculty of Informatics and Computer Engineering during the formation of complex computer geometric models of technical objects; in the Scientific and Production Enterprise «Technogaz» of Poltava by applying the developed approach and methods of computer modelling, which contribute to improving the integration of components of complex gas preparation; in the Limited Liability Company «Innovative Engineering Solutions» of Kyiv using the developed methodology when creating construction and installation projects.

On the topic of the dissertation research 64 works were published, including: 2 – monographs; 4 – publications indexed in the Scopus/WoS databases; 24 – scientific professional publications of Ukraine; 2 – scientific periodical publications of other countries; 5 – patents for utility model; 25 – conference proceedings; 2 – additional publications.

The work consists of annotations, an introduction, six chapters, general conclusions, a list of references from 369 titles and 3 appendices. The full volume of the dissertation (with annotations) – 424 pages, contains 153 figures, 16 tables. The main part – 277 pages, the list of references – 45 pages, appendices – 73 pages.

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

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА 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. 368 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 сільськогосподарського 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 агротехнологічного 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/ukr/content/download/82020/475556/file/ВІСНИК_№3\(62\)_Том_2.pdf](https://kntu.net.ua/ukr/content/download/82020/475556/file/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 ґрунтообробних 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 стрілкової 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 стрілкових 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 проектуванні 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: УкрНДІПВТ 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 Безьє 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 Безьє.

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-runtoobrobniij-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. <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., Кувишинов 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. <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. <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 землерийних 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 землерийних 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. 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 землерийної 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. https://geometry.kpi.ua/files/IIconference_geometry_FMF.pdf

Особистий внесок здобувача: запропоновано зміну геометричної форми робочих граней зуба землерийної машини.

42. Яблонський П.М., Гребелюк І.В., Святиня 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. 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. 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. 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. <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. 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. 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. 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.
https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u231/obuhovski_chitannya_2020_tezi.pdf

Особистий внесок здобувача: запропоновано методику 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.
http://eprints.library.odeku.edu.ua/id/eprint/6987/1/VelykodniySS_Upravlinnja_vidkrytym_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.
http://eprints.library.odeku.edu.ua/id/eprint/6987/1/VelykodniySS_Upravlinnja_vidkrytym_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). <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. https://ng-kg.kpi.ua/files/konferencii/2022/Збірник_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. <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 проєктування 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. 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. 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.

<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.

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.

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. 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. <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. https://ng-kg.kpi.ua/files/Збірник_2024_Остат_var.pdf
Особистий внесок здобувача: запропоновано інтегровану методикау 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.

ЗМІСТ

| | |
|--|-----------|
| ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ | 33 |
| ВСТУП | 34 |
| РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН ГЕОМЕТРИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ | |
| ГРУНТООБРОБНИХ ЗНАРЯДЬ | 46 |
| 1.1. Загальний аналіз літературних джерел | 46 |
| 1.1.1. Геометричне моделювання технічних об'єктів, процесів їхнього виготовлення та експлуатації | 49 |
| 1.1.2. Комп'ютерні засоби автоматизованого формоутворення | 51 |
| 1.1.3. Методологія структурно-параметричного геометричного моделювання | 52 |
| 1.1.4. Проблеми та напрямки розвитку систем землеробства | 53 |
| 1.1.5. Створення сільськогосподарської техніки, підвищення її якості, перспективи автоматизації землеробства | 55 |
| 1.1.6. Актуальні проблеми землеробської механіки | 58 |
| 1.1.7. Моделювання технологічних процесів обробітку ґрунту | 60 |
| 1.2. Формоутворення ґрунтообробних знарядь | 61 |
| 1.3. Інтегроване комплексне геометричне моделювання як ефективний засіб комп'ютерного опрацювання різноманітних технічних об'єктів | 68 |
| 1.4. Мета та завдання дисертаційного дослідження | 71 |
| Висновки до розділу 1 | 73 |
| РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ ІНТЕГРОВАНОГО КОМПЛЕКСНОГО | |
| ГЕОМЕТРИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ГРУНТООБРОБНИХ ЗНАРЯДЬ.... | 79 |
| 2.1. Запропонована методологія | 79 |
| 2.2. Розроблені способи, прийоми та алгоритми | 87 |
| 2.2.1. Спосіб інтегрованих класифікацій для автоматизованого формоутворення груп технічних об'єктів | 88 |
| 2.2.1.1. Узагальнена класифікація засобів комп'ютерного геометричного моделювання | 89 |
| 2.2.1.2. Структурно-параметрична класифікація ґрунтообробних знарядь | 91 |
| 2.2.1.3. Моделювання груп технічних об'єктів | 95 |

| | | |
|---|-----|------------|
| | 31 | |
| 2.2.2. Спосіб зменшення області проєктних розв'язків | 96 | |
| 2.2.3. Спосіб узагальненого контуру | 99 | |
| 2.2.3.1. Основні положення | 100 | |
| 2.2.3.2. Криві Безьє та їхня степенева параметризація | 105 | |
| 2.3. Загальна методика геометричного моделювання | 119 | |
| Висновки до розділу 2 | 124 | |
| РОЗДІЛ 3. ГЕОМЕТРИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОБОЧИХ ОРГАНІВ | | |
| ПОЛИЦЕВИХ ТА ЧИЗЕЛЬНИХ ЗНАРЯДЬ | | 131 |
| 3.1. Узагальнена модель формоутворення | 131 | |
| 3.2. Плуги | 139 | |
| 3.2.1. Розробляння теоретичних поверхонь | 140 | |
| 3.2.2. Аналіз поверхонь | 154 | |
| 3.2.3. Приклади конструкційних моделей | 181 | |
| 3.3. Стрілчасті лапи | 188 | |
| 3.3.1. Варіантне формоутворення робочих поверхонь | 189 | |
| 3.3.2. Конструкційні моделі | 197 | |
| 3.3.3. Удосконалення запобіжника лапового культиватора-сошника... .. | 202 | |
| Висновки до розділу 3 | 205 | |
| РОЗДІЛ 4. ІНТЕГРОВАНЕ КОМПЛЕКСНЕ ГЕОМЕТРИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ | | |
| ДИСКОВИХ РОБОЧИХ ОРГАНІВ | | 211 |
| 4.1. Раціональний вибір типу ґрунтообробних знарядь на прикладі ротаційних органів | 211 | |
| 4.2. Класифікація сільськогосподарських дисків | 217 | |
| 4.3. Геометричне моделювання дискових робочих органів | 219 | |
| 4.4. Відтворення технологічних операцій виготовлення дисків | 227 | |
| Висновки до розділу 4 | 233 | |
| РОЗДІЛ 5. МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ОБРОБІТКУ ҐРУНТУ | | 240 |
| 5.1. Траєкторії руху в технологічних процесах | 240 | |
| 5.2. Лемішно-полицеві плуги | 252 | |
| 5.3. Ґрунтообробні дискові знаряддя | 257 | |
| 5.3.1. Математична модель профілю борозни | 257 | |
| 5.3.2. Компонування конструкції | 267 | |

| | |
|--|------------|
| 5.3.3. Залежність показників обробітку ґрунту від конструкційних параметрів | 269 |
| 5.4. Культиватори..... | 274 |
| Висновки до розділу 5 | 277 |
| РОЗДІЛ 6. ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШОГО РОЗВИТКУ ІНТЕГРОВАНОГО КОМПЛЕКСНОГО ГЕОМЕТРИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ..... | 282 |
| 6.1. Аналіз отриманих наукових результатів | 282 |
| 6.1.1. Теоретичні здобутки..... | 282 |
| 6.1.2. Практичні досягнення | 286 |
| 6.2. Подальше вдосконалення методології інтегрованого комплексного геометричного моделювання | 290 |
| 6.3. Розширення сфери використання напрацьованого підходу..... | 292 |
| Висновки до розділу 6 | 296 |
| ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ..... | 303 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ..... | 307 |
| ДОДАТОК А. ПРИКЛАДИ ПРАКТИЧНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ РОЗРОБЛЕНОГО ПІДХОДУ | 353 |
| А.1. До аналізу формоутворення кривими Безьє | 353 |
| А.2. Полицеві та чизельні робочі органи | 367 |
| А.2.1. Плуги | 367 |
| А.2.2. Стрілчасті лапи..... | 376 |
| А.3. Ґрунтообробні диски | 380 |
| А.3.1. До питання раціонального вибору типу ґрунтообробних знарядь... 380 | |
| А.3.2. Деякі опрацьовані ґрунтообробні диски | 383 |
| А.3.3. Приклади креслеників | 385 |
| А.4. До моделювання процесів обробітку ґрунту | 386 |
| А.5. Отримані патенти на корисні моделі..... | 394 |
| ДОДАТОК Б. ДОКУМЕНТИ ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ | 398 |
| ДОДАТОК В. СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ..... | 408 |

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ІГМ – інтегрована геометрична модель;

ІКГМ – інтегрована комплексна геометрична модель;

КГМ – комплексна геометрична модель;

САПР – системи автоматизованого проєктування;

СПГМ – структурно-параметрична геометрична модель;

CAD (Computer-Aided Design) – системи комп'ютерного конструювання;

CAM (Computer-Aided Manufacturing) – системи комп'ютерного виробництва;

CAE (Computer-Aided Engineering) – системи комп'ютерних інженерних розрахунків;

NURBS (Non-Uniform Rational B-Splines) – неоднорідні раціональні B-сплайни;

PLM (Product Life-cycle Management) – управління життєвим циклом продукції.

ВСТУП

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*.

Розробляння 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, розробляння сільсько-господарських машин, розвідки в 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.

У нинішніх CAD/CAM/CAE системах популярні неоднорідні раціональні B-сплайни (Non-Uniform Rational B-Splines), що позначаються як NURBS. За допомогою вказаних складених ліній будуються різні параметричні поверхні та тіла, на основі яких розробляються необхідні технічні об'єкти, проводиться їхня оптимізація. Тому актуальні задачі підвищення ефективності практичного використання цих геометричних засобів. Доцільне дослідження подібних ліній із новими продуктивними можливостями комп'ютерних побудов. У зв'язку з великою номенклатурою промислових виробів, з одного боку, та наявною схожістю певних їхніх представників, з іншої сторони, важливим постає

питання продуктивного опрацювання груп зазначених об'єктів. Мається на увазі розроблення не індивідуальних геометричних моделей, а узагальнених. Це вимагає виконання належної класифікації як засобів геометричного моделювання, так і відповідної продукції. Акцентовані задачі становлять предмет даних наукових розвідок стосовно напрацювання методології інтегрованого комплексного геометричного моделювання технічних об'єктів, зокрема ґрунтообробних знарядь.

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».

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 проєктних 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; проєктування, виготовлення та експлуатації ґрунтообробних знарядь; структурно-параметричної оптимізації.

Методи *аналітичної геометрії* використовувалися для математичного опису форми, розмірів і положення елементів геометричних моделей, під час написання комп'ютерних програм, створення графічних ілюстрацій тощо. Застосування даних методів у багатьох розділах дисертації обумовлене тим, що доволі часто опрацьовувані фігури та їхні властивості визначаються необхідними аналітичними залежностями.

Методи *диференціальної геометрії* використано для опрацювання диференціальних характеристик досліджуваних ліній і поверхонь. За допомогою цих засобів забезпечувалось математичне обґрунтування потрібних властивостей геометричних фігур. Способи та прийоми диференціальної геометрії належним чином доповнюють методологію аналітичної геометрії. Поданий інтегрований підхід ужито для проведення аналізу характеристик запропонованої кривої Безьє другого порядку зі степеневою параметризацією.

Методи *обчислювальної геометрії* використовувалися для розрахунків таких метричних характеристик ліній, поверхонь і тіл, як відповідно їхні довжини, площі та об'єми. Це пов'язано з тим, що для довільних таких фігур

обчислити їхні вказані необхідні геометричні властивості у вигляді конкретних аналітичних виразів досить часто неможливо або доволі проблематично. Такими прикладами слугують застосовувані для опрацювання ґрунтообробних знарядь довжини синусоїд, площі поверхонь Кунса з обмежуючим контуром із дуг кривих другого порядку у векторній параметричній формі, об'єми тіл, сформованих на зазначених поверхнях і т. д.

Методи *нарисної геометрії* у вигляді ортогонального та аксонометричного проєкціювання використано для створення креслеників ґрунтообробних знарядь та їхніх ілюстративних зображень.

Методи *інтерполяції та апроксимації* застосовано для оброблення виконаних математичних і комп'ютерних експериментів. Зокрема, стосовно визначення аналітичних формул змінювання кутів теоретичних поверхонь відвалів плугів, траєкторій руху сільськогосподарських знарядь під час експлуатації, опрацювання технологічних показників ґрунтообробних дисків залежно від їхніх конструкційних параметрів.

Методи *математичного аналізу* у вигляді необхідних прийомів диференціального та інтегрального числення використовувалися як складові компоненти розроблюваних моделей диференціальної й обчислювальної геометрії для опрацювання проєктованих ґрунтообробних знарядь.

Методи *теорії множин і графів* ужито для створення комп'ютерних структурно-параметричних геометричних моделей (СПГМ), зокрема, плугів, сільськогосподарських дисків, лап-полиць, стрілочастих лап та ін. Зазначені співвідношення в поєднанні з математичними описами конструкції, процесів виготовлення та експлуатації ґрунтообробних знарядь дозволяють здійснювати для останніх належну комплексну структурно-параметричну оптимізацію. Операції різниці та об'єднання теорії множин застосовано для моделювання процесів виготовлення сільськогосподарських дисків.

Методи *комп'ютерної графіки* використано для побудови геометричних моделей таких ґрунтообробних знарядь, як плуги, лапи-полиці, диски,

стрілчасті лапи, інтегрованого комплексного оцінювання показників технічних об'єктів, графіків, діаграм тощо.

Методи *теорії алгоритмів і програмування* застосовано під час написання прикладних комп'ютерних програм для обчислення довжин ліній, площ поверхонь та об'ємів тіл, варіантного моделювання теоретичних поверхонь ґрунтообробних знарядь.

Методи *проектування, виготовлення та експлуатації ґрунтообробних знарядь* використовувались під час побудови інтегрованих комплексних геометричних моделей (ІКГМ) зазначених об'єктів та виконання за допомогою цих моделей належних наукових досліджень.

Взаємне доповнення можливостей проаналізованих вище математичних методів забезпечує достовірність одержаних у дисертації результатів та зроблених висновків і рекомендацій.

Науковою базою виконаних досліджень є праці [1–369] вітчизняних та закордонних учених, зокрема:

– з теорії кривих і поверхонь, обчислювальної геометрії: Н.М. Аушевої [18, 19], Ю.І. Бадаєва [20–25, 306], І.Г. Балюби [27], О.Ю. Браїлова [35], В.В. Ваніна [39, 46, 48–53], В.М. Верещаги [56], Г.А. Вірченка [42, 59], Н.П. Ісмаїлової [96, 100], Ю.М. Ковальова [109], В.Е. Михайленка [153], В.М. Найдиша [165, 166], В.М. Несвідоміна [172], О.Ю. Ніцина [173], А.В. Павлова [174], С.Ф. Пилипаки [188, 189], О.Л. Підгорного [191], В.О. Плоского [192, 193], Г.Я. Тулущенко [231], С.А. Устенка [232], О.В. Шоман [240] та інших [31, 33, 44, 57, 58, 63, 65–68, 79, 93, 152, 190, 209, 301, 302, 308, 348];

– з геометричного моделювання об'єктів, процесів та явищ, розробки САПР: С.О. Балана [26], В.Д. Борисенка [30], В.В. Ваніна [41, 43], Г.А. Вірченка [60–62], Г.Г. Власюк [70], В.В. Гнатушенка [81], О.М. Гумен [86], Ю.О. Дорошенка [92], Н.П. Ісмаїлової [97, 99], В.М. Комяк [203], Ю.М. Кузнецова [134], Л.М. Куценка [362, 363], В.Л. Мартинова [151], Б.О. Пальчевського [175], В.О. Плоского [194], С.І. Пустюльги [196], Н.С. Равської

[197], С.В. Росохи [202], О.М. Семківа [206], О.В. Сергейчука [207], Я.І. Ткачевського [230], С.А. Устенка [233], О.В. Чернікова [238], В.П. Шепеля [239], О.В. Шоман [241], В.П. Юрчука [242] та інших [32, 40, 47, 64, 69, 136, 235, 302, 314, 328, 335];

– з автоматизованого проектування технічних об'єктів та комп'ютерного математичного моделювання: [98, 305, 307, 310–312, 316, 317, 322, 325, 329–334, 336, 340, 341, 344, 350, 352, 354, 355, 358];

– з конструювання, виготовлення та експлуатації сільськогосподарської техніки: В.В. Адамчука [1, 6], О.І. Алфьорова [7–9], М.П. Артьомова [12–14], О.О. Беседи [28], В.О. Боженка [29], Д.Г.Войтюка [71–73], М.П. Волохи [77], Р.Б. Гевка [80], О.П. Гуцола [87], В.П. Ковбаси [87], О.Г. Караєва [102–104], А.С. Кобця [108], О.В. Козаченка [111–114, 120, 121], О.Б. Кошука [132], В.Т. Надикто [157–164], В.І. Пастухова [176–182], І.Л. Роговського [200], В.І. Скрипника [215], Г.В. Теслюка [222–228] та інших [2–5, 10, 11, 15–17, 34, 36–38, 54, 55, 74–76, 78, 82–85, 88–91, 94, 95, 101, 105–107, 110, 115–119, 122–131, 133, 135, 137–150, 154–156, 168–171, 183–187, 195, 199, 201, 204, 205, 208, 210–214, 216–221, 229, 234, 236, 237, 298, 299, 315, 319, 320, 342, 345].

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 проектування 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 потреб у нових високоефективних засобах комп'ютерного моделювання технічних об'єктів із метою підвищення якості промислової продукції під час її проектування, виготовлення та експлуатації. Отримані здобутки проілюстровано на прикладі 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 перед сівбою сільськогосподарських культур дисковими робочими органами, виготовленими за запропонованими в дисертаційній роботі геометричними моделями (Акт №11 від 20.06.2021 р.). Результати практичного застосування на різних полях загальною площею 150 га в порівнянні з серійними дисковими луцильниками ЛДГ-10 показали покращення показників якості кришення ґрунтів за умов різної твердості й вологості та зниження витрат пального;

– у фермерському господарстві «Павільйон флори» Миргородського району Полтавської області під час проведення лабораторно-польових експериментальних досліджень, виконаних за темою дисертаційної роботи (Акт №145 від 27.09.2021 р.). Дискова робоча поверхня ґрунтообробного знаряддя типу «ромашка» була виконана згідно з геометричною моделлю, розробленою здобувачем, випробувана у складі луцильника ЛДГ-10. Отримані результати не поступаються серійному культиватору УСМК-5,4Б за показниками агротехнічних вимог до проведення передпосівного обробітку ґрунту. У разі підвищеної твердості (3,5 ... 3,75 МПа) та низької вологості (16 ... 18,5 %) ґрунту переважають серійні робочі органи за показником кількості грудочок діаметром до 25 мм у розпушеному поверхневому шарі ґрунту. Це забезпечило покращення якості кришення ґрунту і, як наслідок, підвищення польової схожості насіння. Результати дисертаційного дослідження впроваджені у технології виробництва просапних технічних культур протягом 2019–2021 рр. на площі 450 га;

– у навчальний процес Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» на кафедрі нарисної геометрії, інженерної та комп'ютерної графіки (Акт №3 від 22.12.2022 р.) у вигляді запропонованих інваріантних узагальнених методик інтегрованого комплексного геометричного моделювання технічних об'єктів

під час викладання дисципліни «Інженерна та комп'ютерна графіка» студентам машинобудівних спеціальностей, створення ними деталей і складаних одиниць промислової продукції;

– у навчальний процес факультету інформатики та обчислювальної техніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Акт №69/1 від 26.12.2023 р.) у вигляді запропонованих методик формування комплексних комп'ютерних геометричних моделей технічних об'єктів під час викладання дисциплін «Комп'ютерна графіка та обробка зображень» і «Комп'ютерна графіка та мультимедіа». Зазначений підхід сприяє отриманню здобувачами вищої освіти практичних навичок опрацювання реальних промислових виробів у середовищі сучасних САПР;

– у Товаристві з обмеженою відповідальністю «Інноваційні інженерні рішення» (Акт №67/1 від 20.09.2023 р.) м. Києва у вигляді запропонованих способів і прийомів інтегрованого комплексного комп'ютерного моделювання при створенні проєктів будівельно-монтажних робіт, що дозволяє підвищити отримувані техніко-економічні показники за рахунок продуктивного автоматизованого варіантного опрацювання застосовуваного електромонтажного обладнання та устаткування;

– у Науково-виробничому підприємстві «Техногаз» (Акт №04/Т/10-22/2 від 04.10.2022 р.) м. Полтави у вигляді розробленого комплексного підходу та способів комп'ютерного моделювання, що сприяє покращенню інтеграції таких складових комплексної підготовки газу, як блок сепарації, установки очищення, осушення, охолодження газу та дотискні компресорні станції. За рахунок цього підвищується ефективність забезпечення дотримання належних параметрів технологічного процесу підготовки природного газу.

Особистий внесок здобувача. Усі положення, що виносяться на захист і складають наукову новизну отримано особисто автором даної дисертаційної роботи. 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.

РОЗДІЛ 1

СУЧАСНИЙ СТАН ГЕОМЕТРИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ГРУНТООБРОБНИХ ЗНАРЯДЬ

Дану частину дисертації присвячено огляду нинішнього стану розвитку прикладної геометрії, її теоретичного ядра, методології та інструментарію в частині моделювання ґрунтообробних знарядь. Важливими є питання опрацювання належних літературних джерел, їхньої систематизації за такими напрямками, як: геометричне моделювання технічних об'єктів, процесів їхнього виготовлення та експлуатації; комп'ютерне автоматизоване формоутворення; методологія структурно-параметричного геометричного моделювання; системи землеробства; створення сільськогосподарської техніки, підвищення її якості, перспективи автоматизації; актуальні задачі землеробської механіки; моделювання технологічних процесів обробітку ґрунту.

Актуальність обрання в якості об'єкта досліджень автоматизованого геометричного моделювання технічних об'єктів і процесів на прикладі продукції сільськогосподарського машинобудування обумовлена потребою у високоефективних засобах комп'ютерних побудов різноманітної промислової продукції. Це стосується також діджиталізації процесів виготовлення та експлуатації ґрунтообробних знарядь, що вимагає новітніх якісних ефективних науково-прикладних рішень.

1.1. Загальний аналіз літературних джерел

Виконане опрацювання наявної літератури з визначеної теми дисертаційного дослідження показало, що нині доволі важливий подальший розвиток методології прикладної геометрії, який дозволяє здійснювати необхідні та ефективні наукові дослідження. Це забезпечує не тільки розширення меж відповідної наукової системи, але й розроблення якісно нових інноваційних методологічно обґрунтованих теорій для покращення

конкурентоздатності виробництва, що дозволяє зменшувати витрати при покращенні якості продукції. Теоретичне ядро методології прикладної геометрії, запропоноване д.т.н., проф. Плоским В.О. [192–194], дозволяє проводити наукові дослідження, пов'язані з розроблянням 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 здійснювати візуалізацію геометрії опрацьовуваних об'єктів, сприяє комплексній багатокритеріальній оптимізації. Зазначений інструментарій дозволяє створювати топологічного більш якісний ряд геометричних моделей, які під час ітераційного варіантного опрацювання 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.

Розробляння спеціальної теорії інтегрованого комплексного геометричного моделювання визначається необхідністю належної систематизації, здійснення якісного оновлення та подальшого розвитку наявних наукових, науково-практичних та прикладних підходів, напрацьованих науковою школою «Геометричне моделювання об'єктів, процесів та явищ» [48, 256, 263 та ін.] (керівник д.т.н., проф. Ванін В.В.) КПІ ім. Ігоря Сікорського. Саме в такому розумінні здійснюється комплексна інтеграція напрямків структурно-параметричного формоутворення технічних об'єктів [4347, 5964, 69, 254, 258 та ін.], розробляння сільськогосподарських машин у частині моделювання ґрунтообробних знарядь [242, 247, 248, 251, 252, 259, 260, 267, 274, 289 та ін.], розвідок у галузі багатовимірної геометрії [53, 86 та ін.].

Таким чином, удосконалення існуючих та створення нових сільськогосподарських ґрунтообробних знарядь становить актуальну науково-прикладну проблему, один із шляхів успішного вирішення якої полягає в широкому використанні комп'ютерних інформаційних технологій. Необхідною умовою для цього є напрацювання належних теоретичних основ, методології та інструментарію прикладної геометрії, відповідного математичного апарату у вигляді певних способів, прийомів та алгоритмів автоматизованого геометричного моделювання, впровадження отриманих результатів у практику.

В окресленому аспекті актуальним постає розроблення інтегрованих комплексних засобів продуктивного комп'ютерного аналізу та синтезу структури й параметрів ґрунтообробних знарядь із метою здійснення ефективної їхньої оптимізації.

У дисертаційному дослідженні на засадах діючого ДСТУ 2226-93 «Автоматизовані системи. Терміни та визначення», де *комплексна система* реалізує відповідну автоматизацію, а *інтегрована система* являє собою сукупність кількох взаємопов'язаних систем, під *комплексним підходом* мається на увазі багатогранне врахування певних наявних факторів, а під *інтегрованим підходом* – поєднання в ціле деяких окремих об'єктів, процесів тощо.

У галузі проектування ґрунтообробних знарядь важливі питання взаємного впливу робочих поверхонь і ґрунтів, фізико-механічних та аграрних властивостей останніх, їхнього змінювання під час виконання технологічних процесів, якості отримуваних результатів, витрат різних ресурсів тощо. Зазначені особливості, з однієї сторони, значною мірою виходять за рамки теми цієї дисертації, а з іншої – тісно пов'язані з геометричними параметрами й характеристиками, тобто формою, розмірами, положенням застосовуваних ґрунтообробних знарядь. Таким чином, головна ціль даних наукових досліджень полягає розширенні теоретичного ядра прикладної геометрії, методології та інструментарію шляхом розроблення спеціальної теорії

інтегрованого комплексного геометричного моделювання, в забезпеченні гнучкої і продуктивної адаптації створюваних комп'ютерних геометричних моделей ґрунтообробних знарядь до різноманітних вимог таких сільськогосподарських наук, як агроґрунтознавство, агрофізика, агрохімія, агрономія, агроекологія та інших.

В опрацьованих літературних джерелах акцентується, що значна варіація умов практичного застосування ґрунтообробних знарядь не дозволяє отримувати стабільні якісні агротехнічні показники. Останнє обумовлено, зокрема, великим розмаїттям фізико-хімічних станів ґрунтів.

Проаналізовану в дисертації літературу *систематизовано* за наступними основними напрямками:

- геометричне моделювання технічних об'єктів, процесів їхнього виготовлення та експлуатації;
- комп'ютерні засоби автоматизованого формоутворення;
- методологія структурно-параметричного геометричного моделювання;
- проблеми та напрямки розвитку систем землеробства;
- створення сільськогосподарської техніки, підвищення її якості, перспективи автоматизації землеробства;
- актуальні задачі землеробської механіки;
- моделювання технологічних процесів обробітку ґрунту.

Зазначені вище напрямки розглядаються в наступних пунктах дисертаційного дослідження.

1.1.1. Геометричне моделювання технічних об'єктів, процесів їхнього виготовлення та експлуатації

У галузі сучасного геометричного моделювання технічних об'єктів, процесів їхнього виготовлення та експлуатації опрацьовано джерела [20–22, 24, 26, 30, 41, 42, 52, 60, 69, 96, 175, 196, 198, 206, 230, 233, 238, 239, 241, 242, 306, 360–363].

При цьому проаналізовано питання застосування NURBS 3-го та вищих порядків [20, 21], кривих Безьє [22, 24, 42, 52], загального використання сучасних комп'ютерних інформаційних технологій [26], автоматизованого проєктування конкретних технічних виробів [30], розглянуто задачі оптимального варіантного формоутворення [41], застосування комп'ютерних СПГМ для раціонального опрацювання технологічних процесів у машинобудуванні [60], динамічного формоутворення об'єктів [69], моделювання спряжених квазігвинтових поверхонь на основі параметричного кінематичного гвинта [96], подано математичні засоби проєктування та оптимізації технологічних систем [175], дискретного визначення геометричних об'єктів числовими послідовностями [196], розглянуто формоутворення поверхонь при механічному оброблянні [198], графічні комп'ютерні технології опрацювання маятникових систем [206], структурне моделювання складних геометричних об'єктів у літакобудуванні [230], теорію криволінійних форм лопаткових апаратів турбомашин з оптимізацією їхніх параметрів [233], засади комп'ютерного геометричного моделювання динаміки процесів зміни об'єктів під впливом заданих чинників на прикладі фільтрування [238], узагальнення синтезу конструкторсько-технологічних обводів методами аналізу їхніх інваріантних складових [239], розглянуто питання застосування паралельних множин у геометричному моделюванні явищ і процесів [241], спряжених поверхонь при формотворенні робочих органів коренезбиральних машин [242], використання NURBS поверхонь [306], досліджено можливості геометричного моделювання нехаотичних періодичних траєкторій руху вантажів хитної пружини та її резонансу [362, 363].

Отже, в галузі геометричного моделювання технічних об'єктів, процесів їхнього виготовлення та експлуатації нині, при наявності й інших засобів формоутворення, доволі розповсюджене використання створюваних на основі NURBS різноманітних ліній, поверхонь і тіл. В останньому випадку, зазвичай, застосовується В-гер (Bounded representation) граничне представлення. Способи

C-rep (Constructive representation) конструкційного та O-rep (Octant trees representation) октантними деревами подання менш поширені. Гнучкі продуктивні побудови та належне змінювання геометрії опрацьовуваних об'єктів і процесів для забезпечення їхньої оптимізації реалізуються параметричним конструюванням.

1.1.2. Комп'ютерні засоби автоматизованого формоутворення

У сфері комп'ютерних засобів автоматизованого формоутворення заслуговують на увагу видання [18, 19, 32, 98, 99, 172, 305, 307, 310–312, 316, 317, 330, 332, 334, 336, 340, 341, 358].

Так роботами [18, 19] розглядаються питання геометричного моделювання фігур дійсного простору на основі ізотропних характеристик, побудови кривих Безьє на основі уявних дотичних. Публікація [32] висвітлює формоутворення компонентів енергетичного обладнання із застосуванням функцій SolidWorks. Праці [98, 99] подають визначення спряжених поверхонь за допомогою відповідно методів кругового та гвинтового перетворення в системі Matlab. Дисертацію [172] присвячено комп'ютерним моделям синтетичної геометрії. Наступні видання висвітлюють роботу відповідно з такими автоматизованими системами, як [305, 329, 340, 341] – AutoCAD, [307, 330] – SolidWorks, [310–312] – Catia, [313, 332] – Maple, [316, 317] – Enovia, [334, 336] – Matlab, [358] – Inventor.

Отже, сучасні комп'ютерні засоби автоматизованого формоутворення технічних об'єктів зазвичай являють собою інтегровані CAD/CAM/CAE/PLM системи, наприклад, Inventor, SolidWorks, Catia та ін. Для здійснення різноманітних аналітичних розрахунків та побудови необхідних графіків, діаграм, схем тощо застосовуються математичні пакети, наприклад, Matlab, Maple, Mathcad та ін. Наведені два класи комп'ютерних програм можуть взаємно доповнювати один одного. Тому актуальні задачі інтеграції можливостей проаналізованих засобів автоматизованого формоутворення.

Певним чином ці актуальні питання вирішуються в даній дисертаційній роботі на прикладі комп'ютерного проєктування різноманітних ґрунтообробних знарядь.

1.1.3. Методологія структурно-параметричного геометричного моделювання

Запропоновану науковою школою прикладної геометрії КПІ ім. Ігоря Сікорського методологію структурно-параметричного геометричного моделювання подано в публікаціях [43–45, 47, 49, 51, 58–62, 64–68].

Визначення та основні положення структурно-параметричного формування технічних об'єктів наведено у праці [43]. Це стосується, зокрема, використання під час побудови геометричних моделей таких принципів, як системного підходу, варіантності, оптимальності, відкритості та розвитку, комплексного підходу; основних етапів розроблення й застосування СПГМ; їхньої реалізації за допомогою теорії графів та аналітичних описів кривих і поверхонь; виконання структурно-параметричної оптимізації об'єктів та процесів. Деякі належні обчислювальні алгоритми розглянуто в публікаціях [44, 59]. Застосування комп'ютерних СПГМ у літакобудуванні проаналізовано статтями [45, 62], конструювання нафтопереробного устаткування – виданням [47], проєктування технологічних процесів машинобудування – дослідженням [60], оптимізації хвилеводів і концентраторів ультразвукового обладнання – працею [64]. Узагальнення структурно-параметричного підходу до геометричного моделювання об'єктів машинобудування виконано в докторській дисертації [61]. Розвитку цієї теорії присвячено дослідження [49, 51, 58, 65–68].

Проаналізована вище відповідна література свідчить, що для популярного нині в середовищі багатьох CAD/CAM/CAE систем параметричного конструювання структурно-параметричне формування є певним теоретичним узагальненням. При цьому головна ідея полягає у збереженні

кращих властивостей першої зазначеної вище методології, збільшення її можливостей завдяки гармонійному поєднанню теорії кривих та поверхонь, множин і графів, оптимізації, методів обчислювальної геометрії, автоматизованого проєктування, комп'ютерної графіки. На поточному етапі структурно-параметричне формоутворення потребує подальшого покращення шляхом як удосконалення своїх базових теоретичних засад, так і розширення сфери практичного впровадження.

1.1.4. Проблеми та напрямки розвитку систем землеробства

Завдання та напрямки розвитку систем землеробства розглянуто у працях [5, 14, 38, 85, 90, 94, 150, 219, 221, 237].

У публікації [5] вказується, що нині основною метою агроінженерних досліджень є комплексне вирішення *економічних, екологічних та соціальних проблем* сільськогосподарського виробництва. Перші полягають у потребі підвищенні продуктивності праці, зменшення витрат матеріально-технічних, енергетичних та інших ресурсів, покращення якості продукції. Другі зводяться до необхідності зниження негативного впливу на довкілля, раціонального використання земельних і водних ресурсів, збереження родючості ґрунтів. Треті стосуються поліпшення умов праці, широкого впровадження механізації та автоматизації виробничих процесів. Актуальне питання підвищення урожайності сільськогосподарських культур зі зменшенням при цьому різноманітних витрат та без нанесення шкоди навколишньому середовищу. Перспективним вважається подальший розвиток технічної бази сільського господарства за рахунок створення нової високопродуктивної техніки з великими можливостями її адаптації до наявних природно-виробничих умов функціонування аграрних підприємств.

Видання [14] присвячено сучасним проблемам та напрямкам розвитку систем землеробства в Україні. Аналізуються необхідність застосування різних типів технологій для покращення стану ґрунтів. Зазначається, що впроваджені

системи землеробства повинні забезпечувати високу врожайність, якість продукції, бути енергоощадними, екологічними та ґрунтозахисними. Теорія і практика обробітку ґрунту в сучасних умовах розглядається у праці [38]. На засадах критичного огляду існуючих систем обробітку визначено основні критерії ефективності їхнього застосування. Акцентовано, що головним фактором доцільності певного способу обробітку ґрунту є положення агрономічної науки про закономірності змінювання родючості останнього та про те, що найсприятливішими умовами для агрофізичних, агрохімічних і біологічних процесів є оптимальна будова оброблюваного шару ґрунту. На підставі цього встановлено, що найвища продуктивність ріллі, протибур'янова та економічна ефективність реалізується комбінованою полицево-безполцевою системою основного обробітку ґрунту, побудованою за принципом чергування один раз на 4–5 років глибокої оранки з безполцевими різноглибинними обробітками.

Публікацію [85] присвячено важливим завданням екологізації землеробства і проблемі її належного технічного забезпечення. Цим дослідженням визначено деякі шляхи вдосконалення виробництва продукції рослинництва та напрями розвитку відповідної матеріально-технічної бази аграрних підприємств. Запропонований підхід спирається на раціональне застосування систем обробітку ґрунту, удобрення, захисту рослин та інших агротехнічних заходів, що забезпечують мінімальне антропогенне навантаження на довкілля.

У праці [90] розглядаються питання ефективності застосування різних технологій вирощування сільськогосподарських культур. Головна мета при цьому полягає в підвищенні продуктивності вирощування продукції рослинництва завдяки зниженню витрат унаслідок раціонального вибору технологій її вирощування. Дослідження [94] присвячено аналізу стану та перспективам механізації виробництва продукції рослинництва, визначенню основних передових тенденцій створення нових поколінь вітчизняної

сільськогосподарської техніки. У публікаціях [150, 219] подано зміст сучасних систем землеробства та їхню класифікацію. Статтею [221] розглянуто відтворення родючості ґрунтів при різних системах землеробства. У виданні [237] виконано оцінювання ресурсо- та енергозбереження в сучасних системах землеробства.

Таким чином, прогресивні напрямки розвитку сучасного землеробства повинні забезпечувати високу врожайність та якість сільськогосподарської продукції, зберігати родючість ґрунтів, гармонійно поєднуватися з екосистемою, бути ресурсозберігаючими.

1.1.5. Створення сільськогосподарської техніки, підвищення її якості, перспективи автоматизації землеробства

Питання створення сільськогосподарської техніки, підвищення її якості, перспективи автоматизації подаються у виданнях [1–4, 13, 15–17, 28, 29, 34, 36, 37, 54, 71–73, 76, 80, 83, 84, 88, 89, 95, 103, 104, 108, 114–117, 132, 154, 159, 180, 195, 215, 218].

У працях [1, 83] зазначається, що технічною основою агропромислового комплексу є сільськогосподарські машини. Тому завдання підвищення їхньої якості, а також механізації та автоматизації відповідних виробничих процесів доволі актуальні. Акцентується, що створення сільськогосподарської техніки – це складний багатоетапний ітераційний процес, який поєднує поміж собою такі стадії, як наукові дослідження, проектування, виготовлення, експлуатація машин.

Усі стадії взаємопов'язані, тобто інтегровані поміж собою, кожна потребує цілеспрямованих комплексних дій. При цьому перша полягає в пошуку технічно можливих, економічно доцільних варіантів. Виконується науковцями, які мають глибокі теоретичні знання, володіють сучасними методами здійснення експериментальних досліджень і вміють формулювати належні узагальнені висновки та практичні рекомендації. Проектування сільськогосподарської техніки зводиться до проведення розрахунків, створення

робочих креслеників машин, опрацювання технології їхнього виготовлення й експлуатації. Під час останньої уточнюються попередньо прийняті наукові та інженерні рішення. Стосовно ґрунтообробних знарядь зазначається важливість різноманітної форми їхнього конструкційного виконання, що забезпечує успішну реалізацію зональних технологій вирощування сільськогосподарських культур із застосуванням нульового, смугового та суцільного обробітку ґрунту.

Загальні питання проектування ґрунтообробних машин і знарядь та їхньої експлуатації розглядаються у виданнях [28, 29, 71–73, 80, 108, 132, 215]. Це стосується агротехнічних вимог, фізико-механічних властивостей ґрунту, способів його обробітку, класифікації відповідних машин, їхньої конструкції, практичного застосування тощо. Найпоширенішими в Україні є *полицевий, дисковий та чизельний* спосіб обробітку. Полицевий полягає в підрізанні скиби, її підніманні, розпушенні, обертанні, укладанні на дно попередньої борозни, здійснюється плугами. Дисковий спосіб характеризується підрізанням, розпушенням, частковим обертанням, укладанням скиби в борозну з її зміщенням у поперечно-поздовжньому напрямі порівняно з початковим положенням. Чизельний обробіток ґрунту виконують культиваторами, розпушувачами або комбінованими машинами. Цей спосіб полягає в підрізанні скиби, її розпушенні без обертання, укладанні у свою закриту борозну. Отже, дисковий обробіток ґрунту є проміжним між полицевим і чизельним. Він доволі популярний у нашій країні завдяки своїй високій продуктивності.

Більш локальним задачам присвячено наступні дослідження. Зокрема, публікацію [2] – опрацюванню керованості руху машинно-тракторного агрегату модульного типу; [3] – боронувальним секціям для обробітку парів; [4] – оранці, як особливому прийому обробітку ґрунту; [13] – визначенню тягових та енергетичних показників мобільних сільськогосподарських агрегатів при динамічних випробуваннях; [15–17] – тяговій динаміці сільськогосподарських ґрунтообробних агрегатів; [34] – удосконаленню технологічних

властивостей сільськогосподарських агрегатів; [36, 27] – стійкості руху машинно-тракторних агрегатів; [54] – обґрунтуванню раціональних параметрів зміцнення робочих органів ґрунтообробних машин; [76] – прогнозуванню на проєктній стадії якісних показників експлуатації ґрунтообробних знарядь; [84] – аналізу автоколивань ґрунтообробних органів на пружній підвісці; [88, 89] – підвищенню довговічності ґрунтообробних знарядь; [95] – методикам проєктування сільськогосподарської техніки; [103] – поверхням робочих органів машин, які взаємодіють з ґрунтом; [104] – геометричному моделюванню прийняття рішень щодо вибору машин із множини альтернатив; [114] – зовнішнім навантаженням, як чинникам впливу на надійність сільськогосподарських машин; [115] – методикам випробування та прогнозування технічного стану сільськогосподарської техніки; [116] – визначенню ефективності ґрунтообробних знарядь; [117] – раціональній геометричній формі леза лапи культиватора; [154] – проєктуванню конструктивної схеми стрілчастої лапи на основі біологічного прототипу; [159] – науковим основам агрегування сільськогосподарських машин; [180] – конструкції підвісок сошників; [195] – підвищенню якісних показників поверхневого обробітку ґрунту культиватором за рахунок удосконалення конструкції стрілчастих лап; [218] – обґрунтуванню конструктивно-технологічних параметрів просапного культиватора у складі машино-тракторного агрегату.

Отже, у сфері створення сільськогосподарської техніки, покращення її якості, перспектив автоматизації розглянуто такі ґрунтообробні знаряддя, як плуги, луцильники, борони, культиватори та ін. Акцентовано важливість підвищення продуктивності цих машин, визначення оптимальних параметрів і характеристик їхнього виготовлення та експлуатації. Зокрема, це стосується зниження собівартості виробництва, підвищення надійності, економічності, довговічності, ремонтпридатності і т. д. Обґрунтовано також доцільність комп'ютерної інформатизації сільськогосподарської техніки, оптимального керування нею, роботизації виробничих процесів.

1.1.6. Актуальні проблеми землеробської механіки

Важливі сучасні завдання землеробської механіки аналізуються у виданнях [6, 160]. Зауважимо, що відносно мале число наведених публікацій обумовлено тим, що автор дисертації не є фахівцем із вказаної дисципліни. Тому з'ясовувати існуючі в ній проблеми краще відповідним фахівцям, що й виконано в зазначених працях. Поточні міркування введено через те, щоб нерозв'язані задачі землеробської механіки не перекладалися на спеціалістів інших галузей, зокрема з прикладної геометрії та інженерної графіки. Останні здійснюють свої актуальні теоретичні дослідження, які на практиці сприяють вирішенню проблемних питань інших дисциплін, у даному разі землеробської механіки.

У виданні [6] стверджується, що землеробська механіка є технічною наукою, яка базується на вимогах сільськогосподарського виробництва, вивчає належні середовища та матеріали, застосовувані технологічні процеси й машини, формує необхідні методи інженерних розрахунків. Таким чином, ця дисципліна становить основу для створення багатьох різновидів сільськогосподарської техніки, напрацьовує, зокрема, математичні способи проектування ґрунтообробних знарядь.

Теоретичні дослідження взаємодії робочих органів із різними середовищами та описи відповідних складних динамічних систем спрямовані на отримання методик для визначення конструкційно-технологічних параметрів сільськогосподарських машин, зменшення витрат на проведення фізичних експериментів. Ідеологічним базисом землеробської механіки є три наступні компоненти: *опрацьовуваний об'єкт, робочий орган та застосовуваний енергетичний засіб*. У даній дисертації основну увагу приділено центральному елементу, який поєднує між собою два останні. У публікації [6] вказується, що розробляння якісної сільськогосподарської техніки нині можливе тільки на засадах широкого використання автоматизованого конструювання, комп'ютерних розрахунків, добротного виготовлення, забезпечення високої експлуатаційної надійності машин шляхом реалізації належного сервісу та ремонту. *Отже, і*

для землеробської механіки актуальними постають задачі інтеграції всього життєвого циклу створеної техніки. В опрацьованому виданні акцентується, що під час проектування сільськогосподарських знарядь вітчизняні інженери не шукають у бібліотеках наукові праці з дефініціями оптимальних параметрів відповідних конструкцій. У переважній більшості випадків вони покладаються тільки на власний досвід та інтуїцію. Неприпустимим для них є вихід із ладу деталей при перших же натурних випробуваннях. Тому, як правило, закладається зайве використання конструкційних матеріалів. Також не аналізуються необхідним чином експлуатаційні енерговитрати. Як вихід, автором дисертації для інженерів пропонується застосування належних комп'ютерних ІКГМ, зокрема, для автоматизованого формоутворення ґрунтообробних знарядь.

Дослідження [6] вказує, що до актуальних проблем землеробської механіки нині відносяться й завдання підвищення якості здійснюваних теоретичних досліджень. Критикуються чисельні кандидатські та докторські дисертації в яких, наприклад, утворювані плугами або дисками скиби ґрунту моделюються рухом окремих матеріальних точок. Як наслідок, складаються загальновідомі диференціальні рівняння, наводиться величезне число відповідних формул. Але, на превеликий жаль, останні не достатньо адекватно описують реальні сільськогосподарські технологічні процеси. В окресленому плані зауважимо, що дані наукові розвідки ніяк не претендують на розв'язання теоретичних проблем землеробської механіки, оскільки відносяться до галузі прикладної геометрії та інженерної графіки. Головною задачею є забезпечення гнучкості формоутворення, проведення продуктивного комп'ютерного аналізу великого числа різноманітних ґрунтообробних знарядь, побудова ІКГМ, які потрібним чином беруть до уваги наявні математичні залежності інших суміжних дисциплін, зокрема, землеробської механіки. Наведені особливості спрямовані на пришвидшення досягнення конкретних практичних результатів у сільському господарстві, зменшення кількості здійснюваних фізичних експериментів та різноманітних витрат на їхнє проведення.

Крім поданих вище, так би мовити, «глобальних» проблем землеробської механіки, існують і більш дрібні, тобто «локальні». Прикладом яких може слугувати публікація [160]. Предметом останньої є дискусія стосовно правильної дефініції поняття «агрегативання», як належного розділу землеробської механіки, та подальшого визначення відповідних застосовуваних науково-технічних термінів, використовуваних методів і т. д.

Таким чином, у сфері землеробської механіки актуальні задачі формування вдосконалених теоретичних засад відтворення технологічних процесів обробляння ґрунтів, забезпечення широкого застосування прогресивних методів конструювання, розрахунків на міцність, моделювання процесів експлуатації, використання передових досягнень інших наук, зокрема, прикладної геометрії та інженерної графіки.

1.1.7. Моделювання технологічних процесів обробітку ґрунту

Моделювання технологічних процесів обробітку ґрунту наведено в роботах [7–9, 12, 78, 101, 105–107, 113, 118, 120–122, 124, 125, 143, 146, 157, 163, 169, 176, 204, 222, 225, 234].

Праці [7, 8] присвячено дослідженню динаміки руху та надійності робочих органів ґрунтообробних агрегатів на пружній підвісці, публікацію [9] – динамічним характеристикам робочих органів культиватора при інтенсифікованому процесі обробітку ґрунту; видання [10] – моделюванню технологічних процесів основного обробітку ґрунту; статтю [12] – аналізу впливу вертикальних прискорень машинно-тракторних агрегатів на ущільнення ґрунту при виконанні агротехнічних операцій; [78] – уточненням процесу різання ґрунту сферичними дисковими робочими органами; [101] – математичному моделюванню руху скиби ґрунту по площині косоного клина; [105] – адаптивній системі основного обробітку ґрунту; [106] – умовам стабільності руху заглибленого фронтального плуга; [107] – стійкості руху орного агрегату у горизонтальній площині; [113] – аналізу руху сільськогосподарських агрегатів та напрямкам зменшення енерговитрат при виконанні технологічних процесів;

[118] – дослідженню зношування леза лапи культиватора; [120] – математичній моделі взаємодії диска з ґрунтом; [121, 122, 124, 125] – взаємодії леза лапи культиватора з ґрунтовим середовищем; [143] – впливу конструкційних параметрів чизельної лапи глибокорозпушувача на деформацію ґрунту; [146] – прямій сівбі та обґрунтуванню параметрів сошника; [157] – механіко-технологічним аспектам оранки; [163] – теоретичним та експериментальним дослідженням показників роботи орних агрегатів; [169] – підвищенню якості обробітку ґрунту дисковими знаряддями; [176] – дослідженню переміщення подрібненого ґрунту у вертикальній площині під дією ротаційних ґрунто-обробних машин; [204] – процесам чизелювання ґрунтів із застосуванням різних комбінацій робочих органів; [222] – впливу конструкційних і кінематичних параметрів дискового плуга на величину тягового опору та якість розпушення ґрунту; [225] – удосконаленню технологічних процесів і технічних засобів обробітку ґрунту в системі органічного землеробства; [234] – аналізу технологічних властивостей робочих органів культиватора передпосівного поверхневого обробітку ґрунту та удосконаленню стрілчастих лап.

Отже, моделювання технологічних процесів обробітку ґрунту включає належні математичні описи, використовувані машини та механізми, їхні робочі органи, розрахунки техніко-економічних показників, методики раціонального вибору конструкцій відповідно до умов господарювання тощо.

1.2. Формоутворення ґрунтообробних знарядь

Інтегроване комплексне геометричне моделювання ґрунтообробних знарядь комп'ютерними засобами становить головну мету виконаних автором даної дисертації наукових розвідок. Для правильного розуміння, висвітлення та акцентування особливостей запропонованого нового підходу в порівнянні з існуючими методиками формоутворення в цьому підрозділі основні відмінності проілюстровано на конкретних прикладах праці [211], яку присвячено проєктуванню поверхонь плугів.

Спочатку розглянемо кілька базових положень теорії клина, викладеної в монографії [108] для лемішно-полицевих плугів. Її основу становить гіпотеза про те, що відповідні робочі органи є системою необхідним чином орієнтованих у просторі елементарних клинів. У залежності від числа застосовуваних в обробітку ґрунту поверхонь вирізняють одно-, дво- та тригранні клини. На рис. 1.1 показано два перших із них.

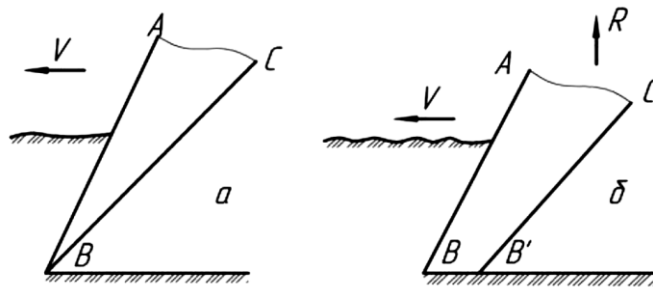


Рис. 1.1. Одно- та двогранний клин [108]

Одногранний клин, переміщуючись у напрямі стрілки V , взаємодіє з оброблюваним середовищем тільки однією гранню, відтвореною відрізком AB . Беручи до уваги, що з теоретичної точки зору при цьому взаємодії з дном борозни немає, то й реакція з його боку буде відсутня. З практичних позицій завжди має місце нижня грань, яку подає відрізок BB' . За таких умов отримуємо двогранний клин, що зумовлює реакцію R .

Концепцію переходу від трьох двограних клинів до одного тригранного ілюструє рис. 1.2.

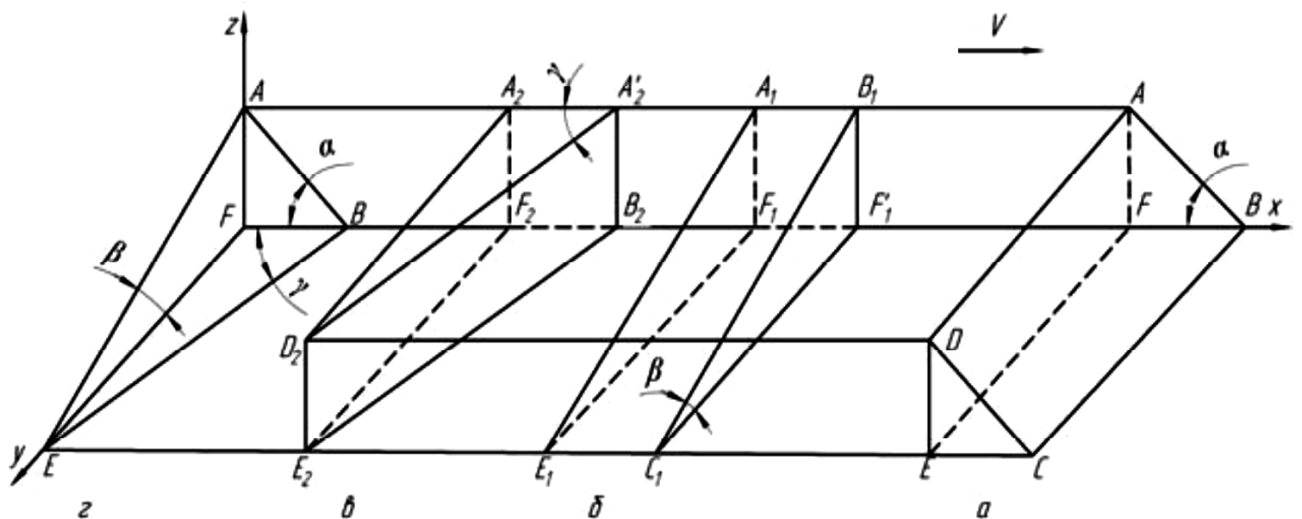


Рис. 1.2. Схема синтезу тригранного клину [108]

На рис. 1.2, а робочою є грань $ABCD$, а опорною – $EFBC$. Розташування першої відносно напрямку руху V визначається кутом атаки α . Шар ґрунту підрізується перпендикулярним до напрямку руху лезом BC , після чого піднімається, перегинається та розпушується. Інтенсивність останнього залежить від кута нахилу α робочої грані до дна борозни. Тому α називається *кутом розпушення*.

Для випадку рис. 1.2, б робоча грань $A_1B_1C_1E_1$, опорна – $E_1F_1F_1'C_1$. Перша нахиляє шар ґрунту та обертає його навколо осі x . Цей процес пропорційний величині кута β нахилу робочої грані до дна борозни. Тому останній отримав назву *кута обертання*.

На рис. 1.2, в робочою є грань $E_2D_2A_2'B_2$, а опорною – $E_2F_2B_2$. Перша зміщує ґрунт убік від напрямку руху V , згинає шар у горизонтальній площині та теж його розпушує. Наведений кут γ отримав назву *кута зсуву*.

Зображений на рис. 1.2, г тригранний клин поєднує властивості трьох проаналізованих двогранних стосовно їхнього підрізання, обертання, зсуву та розпушування шару ґрунту. Він має робочу грань ABE і дві опорні – FBE . У залежності від співвідношення кутів α , β та γ тригранний клин буде інтенсивніше виконувати одну із зазначених технологічних операцій, тобто підрізання, розпушення, обертання чи зсув. Зокрема, див. рис. 1.3, для покращення розпушення й обертання потрібно поступово збільшувати кути α та β .

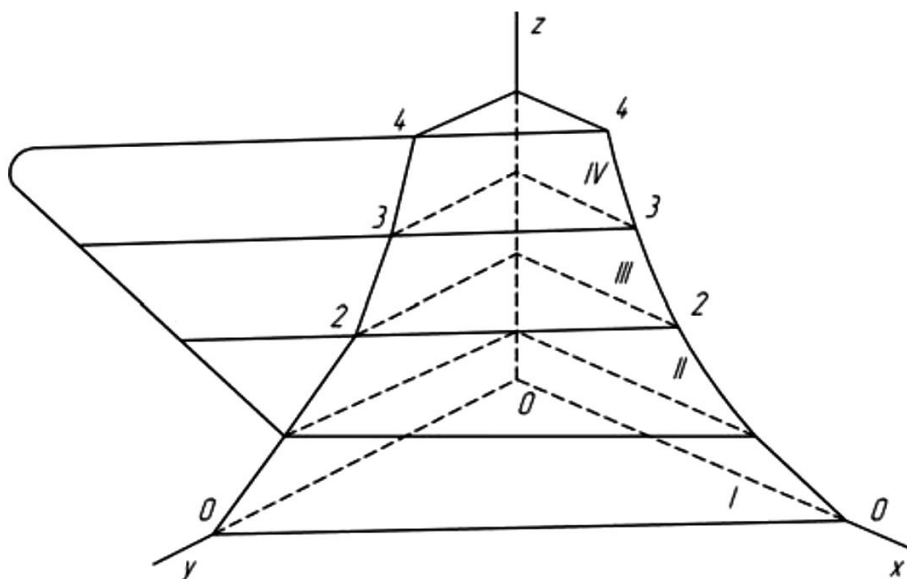


Рис. 1.3. Перетворення тригранних клинів у криволінійну поверхню [108]

Тепер, після дефініції основних технологічних вимог щодо виконання полицевого обробітку ґрунту, розглянемо подане у виданні [211] геометричне моделювання лемішно-полицевих поверхонь плугів.

На початку акцентуються такі моменти. Плоский дво- або тригранний клин деформує скибу тільки під час підрізування та її підніманні на його робочу поверхню. Надалі здійснюється переміщення ґрунту без деформацій. Її збільшення можна досягти, див. рис. 1.4, *а*, коли наступна по вертикалі робоча поверхня розміщується під більшим кутом α до горизонту. Унаслідок цього формується належна багатогранна поверхня.

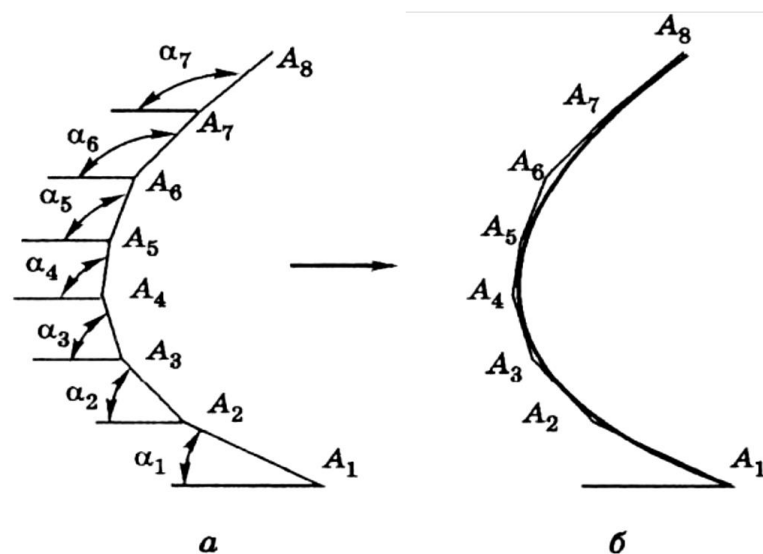


Рис. 1.4. Розвиток плоского клина у криволінійну поверхню [211]

Якщо ламану рис. 1.4, *а* замінити відповідною плавною лінією, див. рис. 1.4, *б*, то отримаємо клин із криволінійною робочою поверхнею. З рис. 1.2, *г* бачимо, що для проаналізованих кутів α , β , γ за наявних величин двох із них можна обчислити третій. На рис. 1.5 показано перетворення певної сукупності впорядкованих елементарних робочих поверхонь тригранних клинів у циліндроїдальну поверхню. Рис. 1.5, *а* демонструє гранчасту поверхню, утворену поступовим дискретним збільшенням догори кутів α та β , а рис. 1.5, *б* – побудовану на основі поданих прийомів формоутворення циліндроїдальну поверхню лемішно-полицевого плуга. Зауважимо, що для лемешів робочі поверхні плоскі. Для полиць відрізки *СВ* можуть бути криволінійними.

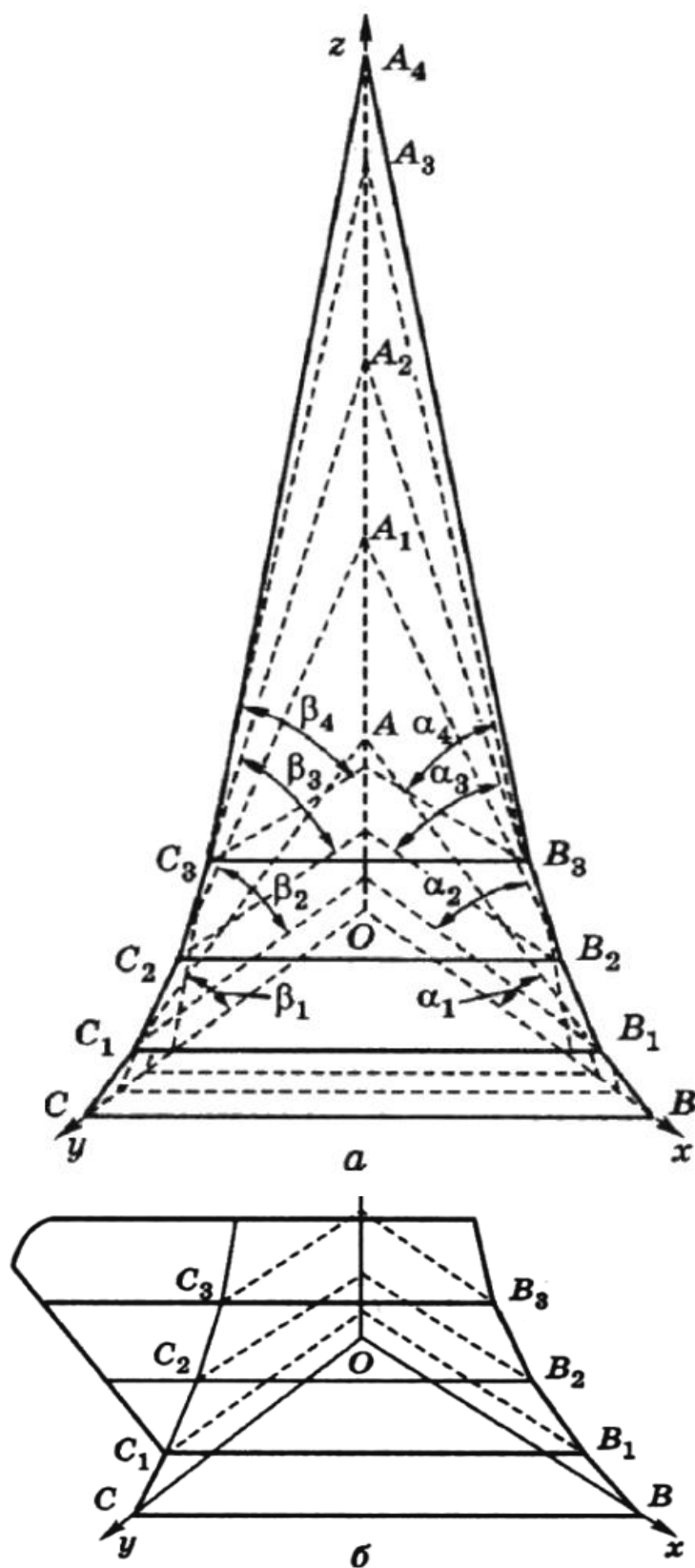


Рис. 1.5. Заміна множини тригранних клинів циліндроїдальною поверхнею [211]

У праці [211] вказується, що для плугів загального призначення найчастіше використовуються *циліндроїдальні поверхні*, а для інших – *коноїдальні, гіперболічного параболоїда або гелікоїдальні поверхні*, див. рис. 1.6.

Зазначається, що згідно з дослідженнями академіка Горячкіна В.П. найпоширенішими є перші, окрім випадку циліндричних поверхонь.

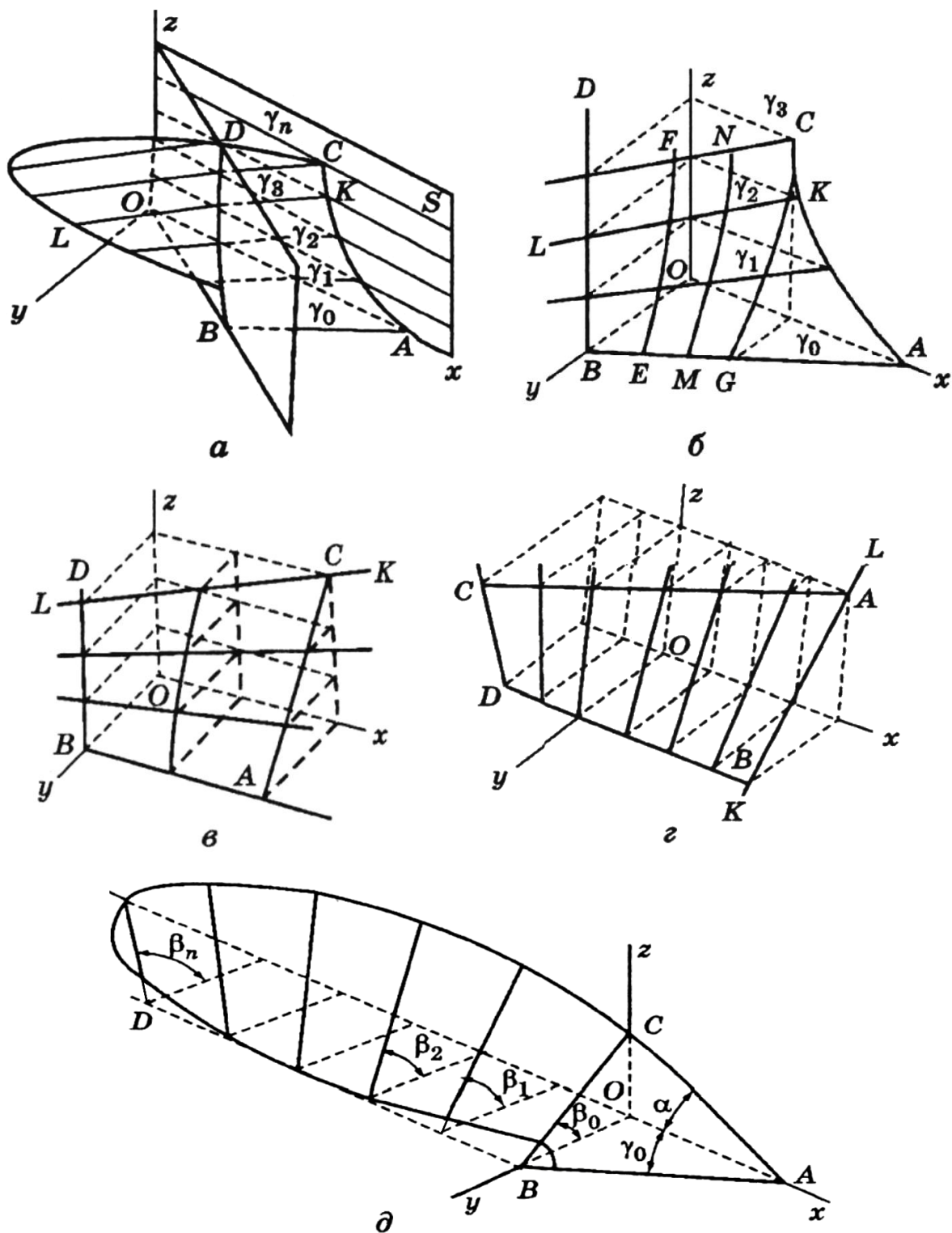


Рис. 1.6. Схеми утворення робочих поверхонь різного типу [211]

Циліндроїдальна поверхня (рис. 1.6, а) будується переміщенням прямолінійної твірної LK по напрямній AC , залишаючись паралельною площині Oxy . Якщо кут γ при цьому незмінний, то маємо циліндричну поверхню.

Конодоїдальна поверхня (рис. 1.6, б) є різновидом гвинтової поверхні, формується переміщенням прямолінійної твірної LK по кривій напрямній AC , розташованій у площині Oxz , та вертикальній прямій BD площини Oyz .

Гіперболічний параболоїд із горизонтальними та вертикальними твірними показано відповідно на рис. 1.6, в та рис. 1.6, г.

Гелікоїдальна поверхня (рис. 1.6, д) відрізняється від останнього проаналізованого гіперболічного параболоїда тим, що одна з напрямних може бути гвинтовою лінією.

Таким чином, виконаний аналіз рекомендованих поверхонь для лемішно-полицевих плугів показав, зокрема, наступне.

1. *Запропоновані методика стосуються побудов суто графічними методами. Іншими словами, вони не орієнтовані на широке використання сучасної комп'ютерної техніки.*

2. *Наведені прийоми геометричного моделювання не націлені на ефективне опрацювання великого числа варіантів проєктованих поверхонь робочих органів із метою пошуку найкращого з них згідно з наявними умовами.*

3. *Незвичне застосування лівих, а не правих, декартових систем координат. У нинішніх CAD/CAM/CAE системах, зазвичай, використовуються останні. Початок координат, на нашу думку, краще розміщувати в передній нижній точці плуга.*

4. *У поданих моделях не вказані засоби для гнучкого, продуктивного і прогнозованого змінювання форми та розмірів проєктованих плугів.*

5. *Представлені на рис. 1.6 схеми, крім випадку 1.6, д, не мають подібних до показаних на рис. 1.4, рис. 1.5 та описаних у відповідних коментарях рекомендацій стосовно впливу належних геометричних параметрів, у даному випадку кутів α та β , на отримання таких потрібних технологічних властивостей обробленого ґрунту, як його розпушення й обертання.*

Отже, в аспекті тематики цієї дисертаційної роботи проаналізовані засоби формоутворення ґрунтообробних знарядь не мають інтегрованого комплексного характеру щодо геометричного моделювання. Також указані

засоби не спрямовані на ефективне використання CAD/CAM/CAE систем. Про це, зокрема, свідчить відсутність можливостей точної реалізації поданих побудов у зазначених програмних пакетах. За наведених обставин і доцільності практичного застосування, актуальним постає завдання реалізації розглянутих схем у середовищі певних комп'ютерних програм. У приведений спосіб здійснюється взаємне вдосконалення ґрунтообробної механіки та CAD/CAM/CAE систем сільськогосподарського машинобудування.

На підставі описаних критичних зауважень до наявних у літературі геометричних моделей ґрунтообробних знарядь далі в цьому розділі дисертації висвітлюються базові напрямки вирішення визначених проблемних питань формоутворення.

1.3. Інтегроване комплексне геометричне моделювання як ефективний засіб комп'ютерного опрацювання різноманітних технічних об'єктів

Здійснений у двох попередніх підрозділах відповідно аналіз літературних джерел та наявного формоутворення ґрунтообробних знарядь засвідчив, що актуальну проблему становлять питання:

- належної інтеграції та забезпечення комплексного підходу, тобто поєднання процесів геометричного моделювання з математичними описами інших суміжних дисциплін, зокрема, ґрунтообробної механіки, конструювання сільськогосподарських машин, розрахунків їх на міцність, визначення відповідних економічних показників тощо;

- пристосованості засобів формоутворення до їхньої ефективної реалізації в середовищі сучасних CAD/CAM/CAE систем, а також необхідності адаптації останніх до потреб ґрунтообробної механіки;

- доцільності створення нової методології комп'ютерного геометричного моделювання, яке забезпечує ефективне опрацювання значного числа великих груп технічних виробів із метою проведення їхньої комплексної оптимізації;

- доречності впровадження в сільськогосподарське машинобудування прогресивних засобів автоматизованого варіантного формоутворення з інших

галузей народного господарства, наприклад, авіаційної, приладобудівної, нафтопереробної, з належним їхнім пристосуванням до існуючих вимог.

Таким чином, ще раз підкреслено важливість обраної теми дисертації як у теоретичному, так і практичному плані, визначеного об'єкта та предмета даних наукових досліджень.

Для забезпечення правильного сприйняття подальшої інформації дамо дефініцію певних застосовуваних термінів.

Означення 1.1. Технічний об'єкт – це будь-який виріб, наприклад, деталь, складанна одиниця, комплекс тощо.

Означення 1.2. Грунтообробні знаряддя – це пристосування, які використовуються для обробітку ґрунту.

Видно, що ґрунтообробні знаряддя є окремим різновидом технічних об'єктів. Тобто для них характерні як загальні властивості останніх, так і специфічні власні.

Означення 1.3. Моделювання – це науковий метод дослідження об'єктів, процесів та явищ шляхом їхньої заміни моделями, що належним чином відтворюють певні властивості оригіналів.

Означення 1.4. Геометричне моделювання – це сукупність методів, способів, прийомів, алгоритмів і т. д., які опрацьовують властивості форми, розмірів, положення досліджуваних об'єктів, процесів та явищ за допомогою геометричних моделей.

Означення 1.5. Геометрична модель – це певна множина таких математичних фігур, як точки, лінії, поверхні, тіла, багатовимірні об'єкти.

Означення 1.6. Інтегрована геометрична модель (ІГМ) – це кілька взаємопов'язаних геометричних моделей.

Означення 1.7. Комплексна геометрична модель (КГМ) – це кілька взаємопов'язаних математичних моделей різного виду, серед яких головною є геометрична модель.

Означення 1.8. Інтегрована комплексна геометрична модель (ІКГМ) – кілька взаємопов'язаних геометричних моделей, серед яких є комплексні геометричні моделі.

Означення 1.9. Структурно-параметрична геометрична модель (СПГМ) – це математичний опис досліджуваного об'єкта, процесу або явища з параметричним аналітичним визначенням складових фігур (точок, ліній, поверхонь, тіл тощо) та варіантними структурними зв'язками між ними, що забезпечує можливість оптимального структурно-параметричного керування формоутворенням.

Означення 1.10. Структурно-параметричне геометричне моделювання – це сукупність методів, способів, прийомів, алгоритмів і т. д. для побудови й використання СПГМ із метою дослідження певних об'єктів, процесів та явищ.

У наш час ефективна практична реалізація інтегрованого комплексного геометричного моделювання різноманітних технічних об'єктів узагалі, та ґрунтообробних знарядь зокрема, можлива завдяки застосуванню автоматизованого формоутворення комп'ютерними засобами.

Але, необхідною умовою для цього є розроблення належної методології у вигляді теоретичних положень, концепцій, способів, прийомів, алгоритмів і т. д. Певним чином перераховані питання вирішуються даними науковими розвідками. Загальний опис отриманих здобутків наведено в цій частині дисертації, а більш докладний – в інших розділах. Це стосується запропонованої концепції геометричного моделювання, доволі інваріантної для багатьох технічних об'єктів, процесів їхнього виготовлення та експлуатації. Напрацьовані положення проілюстровано на прикладі ґрунтообробних знарядь. Зауважимо, що впровадження в решту галузей промисловості одержаних результатів потребує відповідного адаптування.

Безпосередньо розроблено спосіб інтегрованих класифікацій для ефективного автоматизованого формоутворення груп технічних об'єктів, спосіб зменшення області проектних розв'язків та спосіб узагальненого контуру. Ці засоби, разом із напрацьованими на їхній основі прийомами, алгоритмами та моделями, а також запропонованою загальною концепцією інтегрованого комплексного геометричного моделювання, становлять основу другого розділу дисертації. У ньому також подано деякі подальші вдосконалення СПГМ, наприклад, використанням циклічних операцій формоутворення.

Третій та четвертий розділ даного дослідження присвячено відповідно геометричному моделюванню робочих органів полицевих і чизельних та дискових знарядь. У п'ятому розглянуто відтворення технологічних процесів обробітку ґрунту на засадах запропонованого підходу. Побудовані моделі підтвердили на практиці достовірність напрацьованої концепції, способів, прийомів та алгоритмів інтегрованого комплексного формоутворення. Деякі перспективи його подальшого розвитку окреслено в заключному шостому розділі роботи.

1.4. Мета та завдання дисертаційного дослідження

На підставі виконаного вище аналізу сучасного стану геометричного моделювання ґрунтообробних знарядь визначено мету даного наукового дослідження, яка 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. Важливим є забезпечення гнучкої і продуктивної адаптації створюваних комп'ютерних геометричних моделей ґрунтообробних знарядь до різноманітних вимог таких сільськогосподарських наук, як агроґрунтознавство, агрофізика, агрохімія, агрономія, агроекологія та інших.

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.

Наведені вище завдання обумовили зміст і порядок виконання даних наукових розвідок. Це знайшло своє належне відображення у структурі дисертації.

Отже, це наукове дослідження націлене на вирішення важливих й актуальних теоретичних і практичних проблем. Перші пов'язані з необхідністю

узагальнення та подальшого розвитку існуючих наукових положень, теорій і методологій прикладної геометрії та інженерної графіки. Зокрема, стосується напрацьованих підходів школою геометричного моделювання КПІ ім. Ігоря Сікорського стосовно автоматизованого структурно-параметричного формоутворення технічних об'єктів, розроблення сільськогосподарських знарядь, багатовимірної геометрії і т. д. Другі зумовлені нагальними потребами практики у високоефективних засобах комп'ютерного формоутворення різноманітної промислової продукції, в тому числі ґрунтообробних знарядь, їхнього виготовлення та експлуатації. У нинішній складний воєнний час сільське господарство України відіграє провідну роль в економіці нашої держави. Тому вдосконалення відповідних засобів виробництва становить важливу прикладну наукову проблему. Це дисертаційне дослідження спрямоване на інтегроване комплексне вирішення акцентованих вище питань.

Висновки до розділу 1

Даний розділ дисертації присвячено аналізу сучасного геометричного моделювання ґрунтообробних знарядь. Опрацьовані літературні джерела систематизовано за такими основними напрямками:

- геометричне моделювання технічних об'єктів, процесів їхнього виготовлення та експлуатації;
- комп'ютерні засоби автоматизованого формоутворення;
- методологія структурно-параметричного геометричного моделювання;
- проблеми та напрямки розвитку систем землеробства;
- створення сільськогосподарської техніки, підвищення її якості, перспективи автоматизації;
- актуальні задачі землеробської механіки;
- моделювання технологічних процесів обробки ґрунту.

Було зроблено наступні висновки.

1. Для сучасного автоматизованого проєктування 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, Catia та ін. Для здійснення різноманітних аналітичних розрахунків та побудови графіків, діаграм, схем тощо застосовуються математичні пакети, наприклад, Matlab, Maple та ін. Наведені два класи комп'ютерних програм взаємно доповнюють один одного. Тому актуальні задачі поєднання можливостей розглянутих засобів автоматизованого формоутворення.

3. Для доволі популярного нині в середовищі багатьох CAD/CAM/CAE систем параметричного конструювання структурно-параметричне формоутворення є певним 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 сільсько-господарських 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 ефективне 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 обробітку ґрунту включає належні математичні описи використовуваних машин і механізмів, їхніх робочих органів, методики раціонального вибору конструкцій відповідно до умов господарювання тощо. Успішне виконання окреслених завдань значною мірою спирається на якісні геометричні моделі, що визначає необхідність відповідного вдосконалення останніх.

Публікації автора з розглянутих питань: [243, 246, 256–259, 263, 266, 268, 271, 274, 278, 365].

Список публікацій здобувача за матеріалами розділу 1

1. 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.

2. Яблонський П.М. Інтегроване комплексне геометричне моделювання технічних об'єктів. *Збірник тез доповідей XIV міжнародної науково-практичної конференції «Обухівські читання»*. Київ: НУБіП України, 2019 р. С. 52–54.

3. 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. Особистий внесок здобувача: проаналізовано сучасний стан, актуальні проблеми та напрямки розвитку наукової школи прикладної геометрії КПІ ім. Ігоря Сікорського.

4. 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. 15. Особистий внесок здобувача: обґрунтовано, що для досягнення ефективних результатів комп'ютерного геометричного моделювання різноманітної промислової продукції необхідно здійснювати не тільки узагальнення засобів формоутворення, а й відповідних об'єктів проєктування.

5. 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. Особистий внесок здобувача: опрацьовано питання використання поданих методів, способів, прийомів та алгоритмів геометричного моделювання в інших, ніж машинобудування, галузях промисловості, зокрема для автоматизованого проєктування ґрунтообробних знарядь.

6. 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. Особистий внесок здобувача: запропоновано методикау комп'ютерного геометричного моделювання ґрунтообробних знарядь, яку проілюстровано на прикладі лап-полиць культиваторів.

7. 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.. Особистий внесок здобувача: виконано аналіз сучасного стану, основних напрямків досліджень, отриманих здобутків та перспектив подальшого розвитку наукової школи прикладної геометрії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», визначено потреби формування інтегрованої комплексної методології геометричного моделювання різноманітних технічних об'єктів, процесів їхнього виготовлення та експлуатації.

8. 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. Особистий внесок здобувача: визначено перспективний підхід до комп'ютерного формоутворення різноманітної промислової продукції, зроблено прогноз необхідних методів, способів, прийомів, алгоритмів і методик автоматизованого геометричного моделювання технічних об'єктів.

9. 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. Особистий внесок здобувача: на засадах 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 систем автоматизованого проєктування.

10. 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. Особистий внесок здобувача: розроблено інтегровану структурно-параметричну варіантну комп'ютерну геометричну модель лапи-полиці з метою проведення її комплексної оптимізації.

11. 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. Особистий внесок здобувача: запропоновано спосіб інтегрованих класифікацій для автоматизованого формоутворення груп технічних об'єктів.

12. 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. Особистий внесок здобувача: обґрунтовано можливість і доцільність поширення методології структурно-параметричного формоутворення на розв'язання типових задач проектування сільсько-господарської техніки.

13. 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. Особистий внесок здобувача: розроблено математичний апарат комп'ютерного варіантного геометричного моделювання відвалів плугів.

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ ІНТЕГРОВАНОГО КОМПЛЕКСНОГО ГЕОМЕТРИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ГРУНТООБРОБНИХ ЗНАРЯДЬ

У цій частині дисертаційного дослідження подано запропоновану методологію та інструментарій інтегрованого комплексного геометричного моделювання технічних об'єктів, яку проілюстровано на прикладі формоутворення ґрунтообробних знарядь. Наведені матеріали становлять теоретичні засади виконаного у третьому, четвертому та п'ятому розділі дисертації варіантного геометричного моделювання робочих органів полицевих, чизельних і дискових знарядь, відтворення технологічних процесів обробітку ґрунту.

2.1. Запропонована методологія

Відомо, що методологія являє собою сукупність споріднених теоретичних підходів, методів, способів, прийомів, моделей, алгоритмів тощо, які спрямовані на вирішення певних проблем, розв'язання актуальних задач, виконання важливих завдань і т. д. Нова методологія визначає відповідну якісно нову інноваційну систему поглядів на належне розуміння досліджуваних об'єктів, процесів та явищ.

У першому розділі дисертації виконано аналіз сучасного стану розвитку прикладної геометрії, основних напрямків розвідок, отриманих здобутків та перспектив наукової школи геометричного моделювання КПІ ім. Ігоря Сікорського. Головною актуальною метою є потреба формування інтегрованої комплексної методології геометричного моделювання різноманітних технічних об'єктів, зокрема ґрунтообробних знарядь, процесів їхнього виготовлення та експлуатації. Визначено ряд завдань щодо поєднання в цілісний науковий підхід таких існуючих напрямків досліджень, як структурно-параметричне формоутворення, сільськогосподарське машинобудування та багатовимірна геометрія.

Це дозволяє на базі наявних і нових теоретичних положень, методів, способів, прийомів, алгоритмів та методик отримати більш якісні геометричні моделі технічних об'єктів і процесів. Як наслідок, покращити математичне, програмне, інформаційне та методичне забезпечення сучасних CAD/CAM/CAE/PLM пакетів для успішного відтворення складних багатопараметричних систем.

У наведеному аспекті важливі задачі:

- узагальнення використання існуючих методів, способів, прийомів, алгоритмів формоутворення для моделювання різноманітних технічних об'єктів;

- розроблення теоретичних основ інтегрованої комплексної методології геометричного моделювання, що включає певні нові принципи, положення, математичний апарат, методики, практичні рекомендації тощо;

- створення для CAD/CAM/CAE/PLM систем належного інформаційного та програмного забезпечення, яке зручно доповнюється різними описами модельованих об'єктів і процесів;

- проведення експериментів для перевірки напрацьованої методології;

- впровадження одержаних наукових результатів у практику.

Під терміном «комплексна методологія» мається на увазі максимальне врахування багатьох вимог (конструкції, міцності, технології виготовлення, експлуатації, економіки, екології і т. д.) на певній стадії життєвого циклу технічного об'єкта, тобто його проєктування, виробництва, експлуатації. Під «інтегрована» – забезпечення ефективного поєднання зазначених стадій із метою оптимізації параметрів і характеристик життєвого циклу даного об'єкта. Зауважимо, що під останніми розуміємо відповідно незалежні та залежні величини.

Надалі структурно-параметричне геометричне моделювання та засоби багатовимірної геометрії застосовуються як математичний апарат для комп'ютерного формоутворення складних багатопараметричних технічних систем, що подається на прикладі опрацювання ґрунтообробних знарядь.

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

$$O = f(p_1, \dots, p_i, \hat{p}_1, \dots, \hat{p}_j, \tilde{p}_1, \dots, \tilde{p}_k), \quad (2.1)$$

де p_i та \hat{p}_j – неперервні та дискретні геометричні параметри;

\tilde{p}_k – параметри інших дисциплін.

Зауважимо, що наведені у формулі (2.1) величини можуть бути пов'язані математичними залежностями, а параметри інших дисциплін також поділятися на неперервні та дискретні.

У поданому вище виразі динамічним вважається об'єкт O при змінюванні 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.

Отже, узагальнена базова параметрична дефініція радіус-вектора \mathbf{r} точок опрацьовуваного геометричного об'єкта O в динамічному аспекті має вигляд

$$\mathbf{r} = f(p_1(t), \dots, p_i(t), \hat{p}_1(t), \dots, \hat{p}_j(t), \tilde{p}_1(t), \dots, \tilde{p}_k(t)), \quad (2.2)$$

де t – це довільна множина з параметрів виразу (2.1).

Отже, незалежними залишаються параметри t , а решта стають залежними, тобто характеристиками опрацьовуваного об'єкта O .

Зауважимо, що, як правило, завдяки параметрам інших дисциплін наведені вище формули для технічних виробів мають справу з вимірністю простору, більшою за три. В описаний спосіб здійснюється інтеграція геометричних моделей реальних фізичних тіл з ідеалізованим проєктним простором. Зазначені теоретичні абстракції, як буде показано далі, суттєвим чином сприяють успішному вирішенню багатьох практичних питань стосовно опрацювання різноманітної промислової продукції, зокрема, процесів проєктування, виготовлення та експлуатації ґрунтообробних знарядь.

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

$$N_{p_o} = N_p + N_{\hat{p}} + N_{\tilde{p}}, \quad (2.3)$$

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

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

При цьому

$$N_p = 0 \dots i, \quad N_{\hat{p}} = 0 \dots j, \quad N_{\tilde{p}} = 0 \dots k. \quad (2.4)$$

де i, j, k – відповідають множині (2.1).

Як видно з приведених формул (2.1) ... (2.4), можливим є неперервне, дискретне або неперервно-дискретне подання геометричного об'єкта O . Це стосується також і його описів іншими дисциплінами. Конкретні приклади формоутворення розглядаються в наступних трьох розділах даної дисертаційної роботи.

Відповідно до структурно-параметричної методології [43] склад модельованого геометричного об'єкта O подається як певна упорядкована множина

$$O = (o_i)_{i=1}^N, \quad (2.5)$$

де o_i – частини, компоненти тощо об'єкта O ,

N – їхня кількість.

Можливі різновиди o_i відтворюються кортежем

$$o_i = (o_{ij})_{j=1}^{N_i}, \quad (2.6)$$

та належними векторами параметрів

$$P_{ij} = (p_{ijk})_{k=1}^{N_{pij}}, \quad (2.7)$$

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

При цьому для виразів (2.5) ... (2.7) виконуються залежності

$$i \in (1 \dots N), \quad j \in (1 \dots N_i). \quad (2.8)$$

Нехай n -на та m -на частини проєктованого об'єкта O мають множини варіантів

$$o_n = (o_{n_i})_{i=1}^{N_n}, \quad o_m = (o_{m_j})_{j=1}^{N_m}. \quad (2.9)$$

Структурний зв'язок між різновидами (2.9) відображають матриці суміжності

$$C_{n,m} = [c_{n_r, m_s}] \quad (2.10)$$

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.

При цьому в матриці (2.10)

$$n \neq m, \quad r \in (1 \dots N_n), \quad s \in (1 \dots N_m). \quad (2.11)$$

Після здійснення декомпозиції об'єкта O , дефініції взаємозв'язків його елементів, їхніх відповідних аналітичних параметричних залежностей, виконання необхідного порядку комбінаторного синтезу опрацьовуваної системи з окремих її частин, як результат отримуємо множину різновидів проєктованого об'єкта

$$O = (O_n)_{n=1}^{N_o}. \quad (2.12)$$

Графічною ілюстрацією співвідношень (2.5) ... (2.12) слугують подані на рис. 2.1 зображення. Перше з них стосується типового прикладу варіантної структурної взаємодії двох довільних частин модельованого об'єкта O . Друге – унаочнює склад його можливих компонентів, а третє – кортеж одержаних проєктних варіантів.

Деякі належні обчислювальні алгоритми структурного моделювання геометричних об'єктів із використанням наведених вище множин і матриць суміжності подано, зокрема, у праці [44].

Згідно з виданням [43] базовими для структурно-параметричного формоутворення є принципи: *системного підходу* (розгляд досліджуваного об'єкта як множини взаємопов'язаних параметричних елементів та структурного

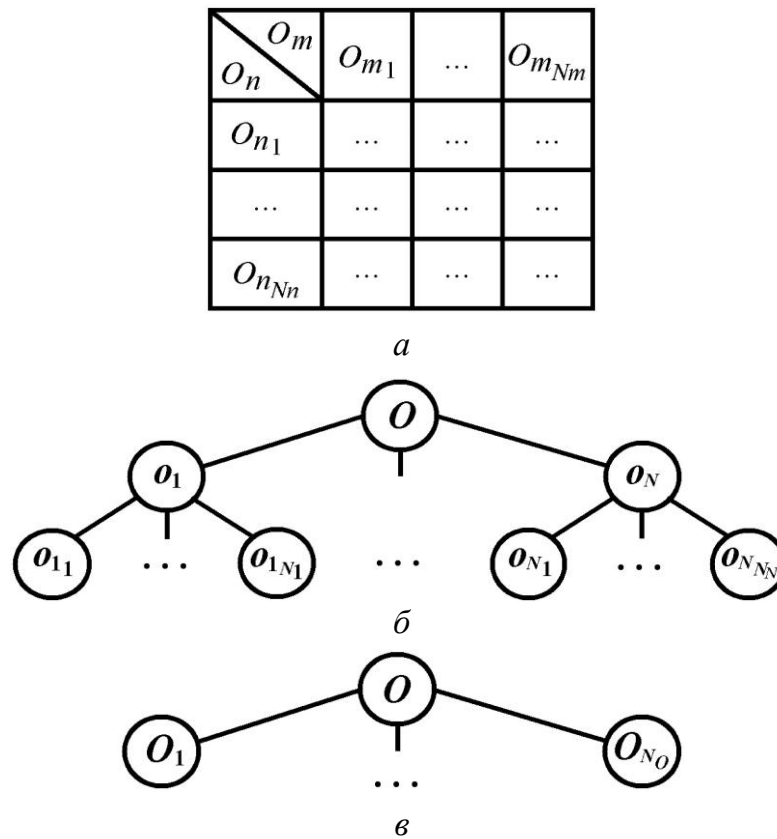


Рис. 2.1. Компоненти структурної моделі об'єкта O [43]:

a – матриця суміжності варіантів складових o_n та o_m ; b – граф структури;

v – граф проєктних варіантів

компонента системи вищого рівня), *варіантності* (забезпечення геометричною моделлю ефективних структурно-параметричних різновидів опрацьовуваного об'єкта або процесу); *оптимальності* (наявність засобів для визначення раціональних величин параметрів і характеристик опрацьовуваних об'єктів, процесів та явищ); *відкритості та розвитку* (забезпечення можливості вдосконалення складових компонентів СПГМ); *комплексного підходу* (приспосованість до урахування вимог інших дисциплін).

Публікацією [244] автора дисертації запропоновано доповнити методологію структурно-параметричного формоутворення *принципом інтеграції*, який полягає не тільки в поєднанні етапів життєвого циклу технічних об'єктів, а й відповідних засобів геометричного моделювання у вигляді належного математичного апарату. Це дозволяє ефективно здійснювати комплексне оптимальне формоутворення різноманітних технічних об'єктів під час їхнього проєктування, виготовлення та експлуатації. Так отримуємо

потрібні КГМ, ІГМ та ІКГМ. Конкретною реалізацією застосування зазначеного принципу слугують спосіб інтегрованих класифікацій для автоматизованого формоутворення груп технічних об'єктів (пункт 2.2.1), спосіб зменшення області проєктних розв'язків (пункт 2.2.2) та спосіб узагальненого контуру (пункт 2.2.3).

У статті [254] автором дисертації запропоновано узагальнення СПГМ шляхом використання для їхніх елементів циклічних, тобто повторюваних, операцій формоутворення. За таких умов кортеж (2.5) розглядається як мультимножина, до складу якої можуть входити повторювальні елементи o_i . Це дозволяє узагальнити застосовуваний математичний апарат структурно-параметричного геометричного моделювання, підвищити ефективність його практичного використання.

Тоді кортеж (2.5) переписується у вигляді

$$O = (o_{k_i})_{i=1}^N, \quad (2.13)$$

де компоненти

$$o_{k_i} = (o_i)_{i=1}^{k_i} = k_i o_i, \quad (2.14)$$

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

Останній запис у формулі (2.14) відповідає прийнятому для мультимножин.

Таким чином, замість поданого в докторській дисертації [61] графу структурно-параметричного синтезу об'єкта O (рис. 2.2, а) маємо його узагальнений варіант (рис. 2.2, б) з циклічними операціями формоутворення. Останній випадок є аналогом застосування в комп'ютерному програмуванні замість лінійних алгоритмів циклічних, а для технічних об'єктів – стандартних та уніфікованих деталей і складаних одиниць, типових та групових технологічних операцій і процесів замість одиничних. Беззаперечним є суттєве підвищення ефективності в наведених прикладах. Це цілком стосується й автоматизованого формоутворення з використанням удосконалених СПГМ.

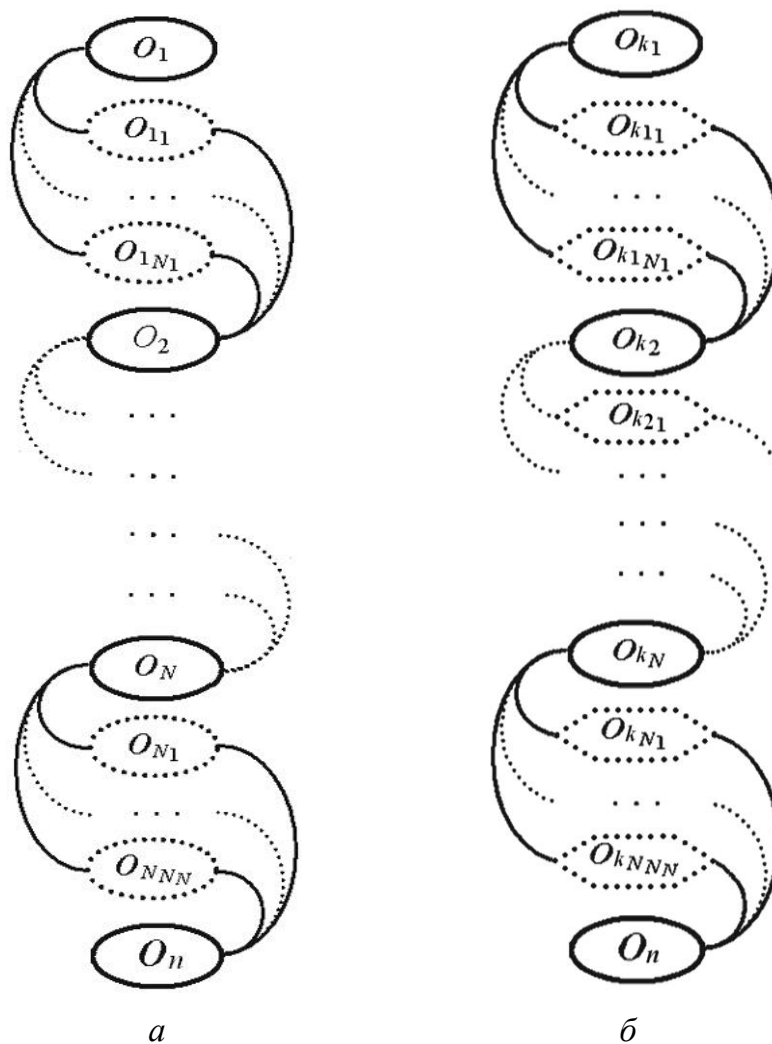


Рис. 2.2. Граф структурно-параметричного синтезу об'єкта O :
 a – згідно з роботою [61]; b – узагальнений із циклічними
операціями формоутворення

Зауважимо, що кожна складова (2.12), див. рис. 2.2, являє собою простий елементарний ланцюг у зображеному графі з початком у вершині O_1 і кінцем у вершині O_n . При цьому на рис. 2.2, b шестикутниками позначено циклічні процеси, число повторів у яких визначається величинами nc , zc , kc , тобто відповідно початку, закінчення та кроку циклу.

Конкретні приклади застосування описаного підходу з циклічним формоутворенням подано в четвертому розділі дисертації під час виконання інтегрованого комплексного автоматизованого структурно-параметричного геометричного моделювання дискових робочих органів ґрунтообробних знарядь.

Викладені вище загальні положення послуговували основою для розроблення трьох конкретних способів для комп'ютерного інтегрованого комплексного геометричного моделювання промислових виробів, процесів їхнього виготовлення та експлуатації. Зазначені засоби взаємно доповнюють один одного. Це спосіб інтегрованих класифікацій для автоматизованого формоутворення груп технічних об'єктів, спосіб зменшення області проєктних розв'язків та спосіб узагальненого контуру. Їм присвячено наступний підрозділ дисертації.

2.2. Розроблені способи, прийоми та алгоритми

На поточний момент обґрунтовано актуальність інтегрованого комплексного геометричного моделювання для різноманітних виробів, їхнього виготовлення та експлуатації, наведено загальний опис належної запропонованої методології. У цій частині дослідження подано три способи відповідного формоутворення. Перший із них, інтегрованих класифікацій для автоматизованого геометричного моделювання груп технічних об'єктів, забезпечує поєднання засобів формоутворення та певних опрацьовуваних виробів. Його проілюстровано в пункті 2.2.1 дисертації на прикладі ґрунтообробних знарядь. Другий спосіб, зменшення області проєктних розв'язків (пункт 2.2.2), призначений для дефініції раціональних величин параметрів і характеристик інших, ніж геометрія, прикладних дисциплін. У даному випадку, зазвичай, маємо багатовимірний абстрактний простір. Окресленим чином створюються КГМ, тобто комплексні геометричні моделі, на засадах використання залежностей вигляду (2.1) і (2.2). Надалі формоутворення виконується для фізичного простору конкретних виробів. При цьому актуальним постає питання узагальнення, з метою підвищення ефективності, застосовуваних засобів геометричного моделювання. Таким прикладом слугує напрацьований автором дисертації спосіб узагальненого контуру, див. пункт 2.2.3.

2.2.1. Спосіб інтегрованих класифікацій для автоматизованого формоутворення 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, тобто багатоаспектної, 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, важливою є задача ефективного формоутворення належних груп технічних об'єктів. Тобто мається на увазі розробляння не індивідуальних геометричних моделей, а узагальнених. Це потребує проведення відповідної класифікації як засобів формоутворення, так й опрацьовуваної промислової продукції. Окреслені завдання розглядаються в цьому пункті дисертації.

Ефективне використання засобів комп'ютерного геометричного моделювання для груп технічних об'єктів можливе лише при здійсненні взаємної адаптації перших і других. Це сприяє якісним результатам автоматизованого проєктування. За потреби існуюча методологія формоутворення доповнюється новими способами, прийомами, алгоритмами, моделями тощо, а опрацювання промислової продукції отримує доступ до передових методик геометричного моделювання. Так реалізується обопільне вдосконалення в теоретичному і практичному плані автоматизованого формоутворення та розробляння конкретних технічних об'єктів.

У підпункті 2.2.1.1 викладено узагальнену класифікацію засобів автоматизованого геометричного моделювання, яка є інваріантною по відношенню до різноманітної промислової продукції. Наступний підпункт 2.2.1.2 присвячено структурно-параметричній класифікації ґрунтообробних знарядь, що має як певні загальні риси, так і специфічні особливості. У випадку інших технічних об'єктів необхідно здійснювати належну систематизацію за аналогією з розглянутим прикладом. При цьому головна ідея запропонованого способу інтегрованих класифікацій для автоматизованого формоутворення груп технічних об'єктів залишається незмінною.

2.2.1.1. Узагальнена класифікація засобів комп'ютерного геометричного моделювання

В основу запропонованої класифікації засобів автоматизованого формоутворення покладемо систематизацію фігур за вимірністю та геометричними способами їхнього моделювання.

Таким чином, геометричні фігури $G\Phi$ визначаються множиною

$$G\Phi = (G\Phi_i)_{i=0}^{N_{G\Phi}} = (G\Phi_i)_{i=0}^5, \quad (2.15)$$

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

Реальними фізичними фігурами є тільки тіла, що мають об'єм. Решта елементів (2.15) становлять математичні абстракції. Однак, доволі корисні для автоматизованого формоутворення та моделювання.

Точкам, тобто геометричним об'єктам нульової вимірності, притаманні тільки параметри *положення*, які характерні і всім іншим фігурам. Останні мають також певні параметри *розмірів* та *форми*. Особливість ліній, одновимірних об'єктів, полягає в наявності довжини. Для поверхонь, двовимірних фігур, властиві площі, а для тривимірних тіл – об'єми. Прикладами комбінованих геометричних об'єктів слугують, зокрема, поєднання тіл із лініями та поверхнями, які не належать зазначеним тілам. У даному дисертаційному дослідженні багатовимірний простір застосовується для виконання аналізу математичних залежностей, що описують проєктовані ґрунтообробні знаряддя з точки зору інших, ніж геометрія, спеціалізованих дисциплін. Це дозволяє визначати оптимальні або раціональні параметри формоутворення опрацьовуваної технічної продукції.

Геометричні способи GC моделювання фігур (2.15) пропонується визначати кортежем

$$GC = (GC_i)_{i=1}^{N_{GC}} = (GC_i)_{i=1}^2, \quad (2.16)$$

де $GC_1 = ГСС$ – геометричні способи створення, $GC_2 = ГСМ$ – геометричні способи модифікації.

Більш докладно елементи (2.16) подамо у вигляді

$$GC_1 = (GC_{1_j})_{j=1}^{N_{GC_1}} = (GC_{1_j})_{j=1}^2, \quad (2.17)$$

де GC_{1_1} = кінематичні, GC_{1_2} = аналітичні;

$$GC_2 = (GC_{2_j})_{j=1}^{N_{GC_2}} = (GC_{2_j})_{j=1}^3, \quad (2.18)$$

де GC_{2_1} = рух і симетрія, GC_{2_2} = деформація, GC_{2_3} = булеві операції.

Компоненти множин (2.17) та (2.18) визначимо наступним чином

$$GC_{1_1} = (GC_{1_{1_k}})_{k=0}^{N_{GC_{1_1}}} = (GC_{1_{1_k}})_{k=0}^5, \quad (2.19)$$

де для $GC_{1_{1_k}}$ індексу k відповідають твірні фігури формули (2.15);

$$GC_{1_2} = (GC_{1_{2_k}})_{k=1}^{N_{GC_{1_2}}} = (GC_{1_{2_k}})_{k=1}^2, \quad (2.20)$$

де $GC_{1_{2_1}}$ = алгебраїчні, $GC_{1_{2_2}}$ = трансцендентні;

$$GC_{2_1} = (GC_{2_{1_k}})_{k=1}^{N_{GC_{2_1}}} = (GC_{2_{1_k}})_{k=1}^4, \quad (2.21)$$

де $GC_{2_{1_1}}$ = прямолінійний, $GC_{2_{1_2}}$ = обертальний, $GC_{2_{1_3}}$ = складний, $GC_{2_{1_4}}$ = симетрія;

$$GC_{2_2} = (GC_{2_{2_k}})_{k=1}^{N_{GC_{2_2}}} = (GC_{2_{2_k}})_{k=1}^2, \quad (2.22)$$

де $GC_{2_{2_1}}$ = зміна розмірів, $GC_{2_{2_2}}$ = зміна форми;

$$GC_{2_3} = (GC_{2_{3_k}})_{k=1}^{N_{GC_{2_3}}} = (GC_{2_{3_k}})_{k=1}^3, \quad (2.23)$$

де $GC_{2_{3_1}}$ = віднімання, $GC_{2_{3_2}}$ = об'єднання, $GC_{2_{3_3}}$ = перетин.

Для конкретних умов геометричного моделювання множини (2.19) ... (2.23) визначаються більш докладно, наприклад, кінематичні способи створення GC_{1_1} – в залежності від застосовуваних напрямних і твірних ліній, аналітичні способи створення GC_{1_2} – згідно з використовуваними видами

алгебраїчних і трансцендентних виразів; геометричні способи модифікації $ГС_2$ – відповідно до особливостей прямолінійного, обертального, складного руху та симетрії, змінювання розмірів і форми тощо.

2.2.1.2. Структурно-параметрична класифікація ґрунтообробних знарядь

У праці [274] автора даної дисертації запропоновано спосіб інтегрованих класифікацій для автоматизованого формоутворення груп технічних об'єктів.

Згідно з літературними джерелами [28, 73, 80, 132] розрізняють *основний, поверхневий і спеціальний обробіток ґрунту*. Перший є найглибшим за весь період вирощування деякої сільськогосподарської культури. Другий передбачає такі операції як *боронування, культивуація, коткування* та ін., а третій включає *ярусну оранку, глибоке розпушення, фрезерування ґрунту* і т. д.

На підставі наведеного вище структурно-параметричного підходу формуємо множину опрацьовуваних ґрунтообробних знарядь $ГЗ$

$$ГЗ = (ГЗ_i)_{i=1}^{N_{ГЗ}} = (ГЗ_i)_{i=1}^3, \quad (2.24)$$

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

За глибиною обробіток ґрунту $ОГ$ визначається кортежем

$$ОГ = (ОГ_i)_{i=0}^{N_{ОГ}} = (ОГ_i)_{i=0}^5, \quad (2.25)$$

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 подамо множиною

$$ГЗО = (ГЗО_i)_{i=1}^{N_{ГЗО}} = (ГЗО_i)_{i=1}^3, \quad (2.26)$$

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

Нехай

$$ПГЗ = (ПГЗ_i)_{i=1}^{N_{ПГЗ}} = (ПГЗ_i)_{i=1}^3, \quad (2.27)$$

де $ПГЗ_1 = ПЛЛ$ – плуги-луцильники, $ПГЗ_2 = ПЛЗ$ – плуги загального призначення, $ПГЗ_3 = ПЛЯ$ – плуги ярусні;

$$ДГЗ = (ДГЗ_i)_{i=1}^{N_{ДГЗ}} = (ДГЗ_i)_{i=1}^4, \quad (2.28)$$

де $ДГЗ_1 = ДЛЩ$ – дискові луцильники, $ДГЗ_2 = ДБР$ – дискові борони, $ДГЗ_3 = ДБРВ$ – дискові борони важкі, $ДГЗ_4 = ДПЛ$ – дискові плуги;

$$ЧГЗ = (ЧГЗ_i)_{i=1}^{N_{ЧГЗ}} = (ЧГЗ_i)_{i=1}^4, \quad (2.29)$$

де $ЧГЗ_1 = КЛЛ$ – культиватори легкі, $ЧГЗ_2 = КЛВ$ – культиватори важкі, $ЧГЗ_3 = КЛЧ$ – культиватори чизельні, $ЧГЗ_4 = ЧПЛ$ – чизельні плуги.

Знаряддя (2.26) ... (2.29) для основного обробітку в залежності від опрацьовуваної глибини ґрунту (2.25) формують кортежі

$$ОГ_1 = (ОГ_{1i})_{i=1}^{N_{ОГ1}} = (ОГ_{1i})_{i=1}^2, \quad (2.30)$$

де $ОГ_{11} = ДЛЩ$, $ОГ_{12} = КЛЛ$;

$$ОГ_2 = (ОГ_{2i})_{i=1}^{N_{ОГ2}} = (ОГ_{2i})_{i=1}^3, \quad (2.31)$$

де $ОГ_{21} = ПЛЛ$, $ОГ_{22} = ДБР$, $ОГ_{23} = КЛВ$;

$$ОГ_3 = (ОГ_{3i})_{i=1}^{N_{ОГ3}} = (ОГ_{3i})_{i=1}^3, \quad (2.32)$$

де $ОГ_{31} = ПЛЗ$, $ОГ_{32} = ДБРВ$, $ОГ_{33} = КЛЧ$;

$$ОГ_4 = (ОГ_{4i})_{i=1}^{N_{ОГ4}} = (ОГ_{4i})_{i=1}^3, \quad (2.33)$$

де $ОГ_{41} = ПЛЯ$, $ОГ_{42} = ДПЛ$, $ОГ_{43} = ЧПЛ$.

Ґрунтообробні знаряддя для поверхневого та спеціального обробітку, тобто $ГЗП$ і $ГЗС$, див. відповідно другий та третій елемент множини (2.24), можуть визначатися кортежами

$$ГЗП = (ГЗП_i)_{i=1}^{N_{ГЗП}} = (ГЗП_i)_{i=1}^5, \quad (2.34)$$

де $ГЗП_1 = БР$ – борони, $ГЗП_2 = КЛ$ – культиватори, $ГЗП_3 = КТ$ – котки; $ГЗП_4 = ФР$ – фрези; $ГЗП_5 = КМ$ – комбіновані;

$$ГЗС = (ГЗС_i)_{i=1}^{N_{ГЗС}} = (ГЗС_i)_{i=1}^3, \quad (2.35)$$

де $ГЗС_1 = ПЛП$ – плуги плантажні, $ГЗС_2 = ПЛС$ – плуги садові, $ГЗС_3 = ЯКЧ$ – ямокопачі.

Опрацювання елементів (2.34) та (2.35) реалізується схожим чином до проаналізованих множин (2.25) ... (2.33).

Уявлення про геометричні моделі конкретних ґрунтообробних знарядь (2.24) надають наведені у виданнях [73, 132] зображення, декотрі з яких показано на рис. 2.3 ... 2.5.

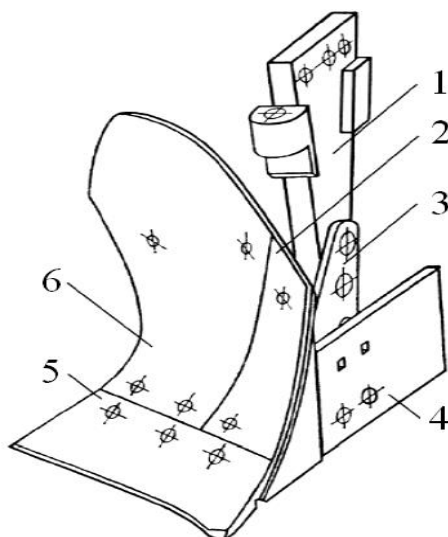


Рис. 2.3. Корпус плуга [73]:

1 – стовба; 2 – груди полиці; 3 – башмак; 4 – польова дошка;
5 – леміш; 6 – крило полиці

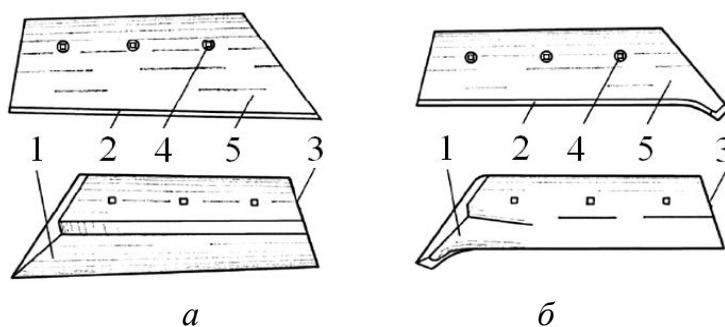


Рис. 2.4. Типи лемешів [73]:

а – трапецієподібний; б – долотоподібний;

1 – магазин; 2 – лезо; 3 – крило; 4 – отвір з потаєм; 5 – носок

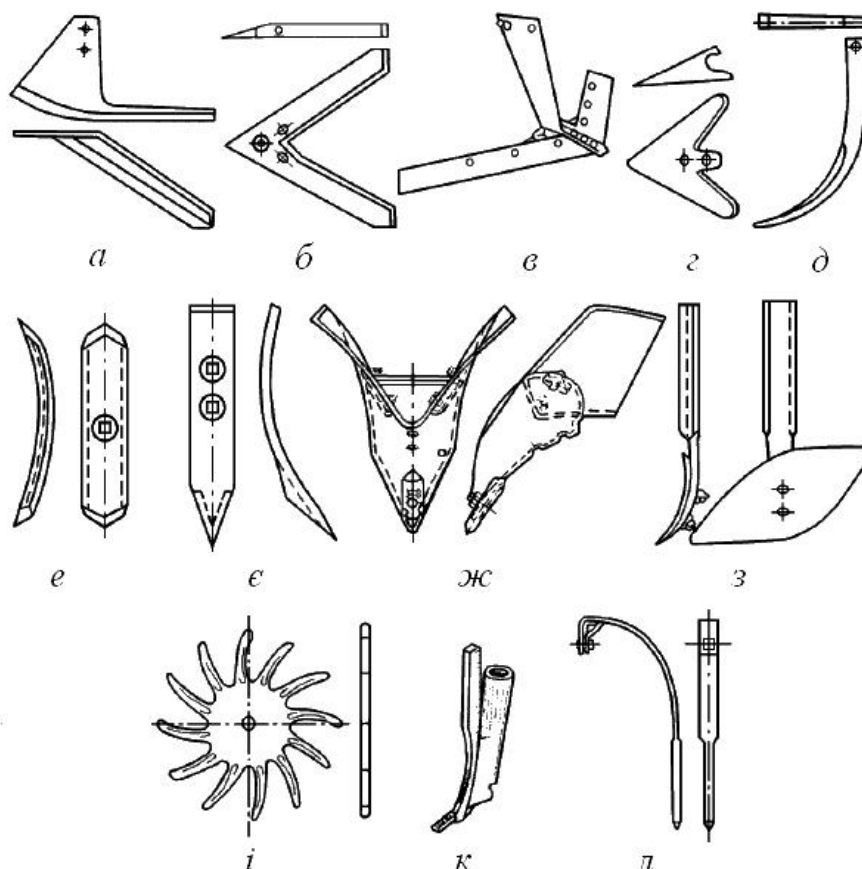


Рис. 2.5. Робочі органи культиваторів [132]:

a – однобічна лапа; *б* – стрілочаста лапа без хвостовика; *в* – плоскорізальна лапа;
г – стрілочаста універсальна лапа; *д* – долотоподібна лапа; *е* – розпушувальна
 обертальна лапа; *е* – списоподібна лапа; *ж* – підгортач; *з* – лапа-полиця;
к – голчастий диск; *к* – підживлювальний ніж; *л* – полотьний зуб

Подана вище систематизація ґрунтообробних знарядь засвідчує їхнє велике розмаїття в геометричному та функціональному плані. Це стосується також матеріалів виконаної раніш загальної класифікації сучасних засобів геометричного моделювання. Тому з метою підвищення ефективності комп'ютерного проектування й конструювання продукції сільсько-господарського машинобудування та інших промислових виробів на засадах запропонованого принципу інтеграції напрацьовано спосіб інтегрованих класифікацій для автоматизованого формоутворення груп технічних об'єктів. Загальну методика його застосування подано в наступному пункті 2.2.1.3, а конкретне практичне використання для геометричного моделювання ґрунтообробних дисків – у четвертому розділі дисертації.

2.2.1.3. Моделювання груп технічних об'єктів

У даному підпункті дисертації приведено рекомендовану загальну методику у вигляді певного порядку, тобто алгоритму необхідних дій, для здійснення автоматизованого варіантного формоутворення груп технічних об'єктів на засадах запропонованого способу інтегрованих класифікацій.

Доречною буде така послідовність.

1. Визначити в систематизованому вигляді потенціал формоутворення наявних CAD/CAM/CAE систем. Для належного зіставлення, зокрема, можна застосувати розглянуту в підпункті 2.2.1.1 класифікацію засобів геометричного моделювання.

2. На основі подібного до викладеного в підпункті 2.2.1.2 підходу провести класифікацію опрацьовуваної номенклатури технічної продукції.

3. Порівняти наявні та потрібні можливості комп'ютерного формоутворення. Здійснити узгодження ймовірних протиріч. Це доцільно реалізовувати взаємною адаптацією геометричних засобів і проєктованих об'єктів. Зрозуміло, що без зменшення якості останніх. У першому випадку розробляється необхідний математичний апарат та додаткове комп'ютерне програмне забезпечення. Окреслений шлях нині доволі розповсюджений на практиці завдяки відкритій архітектурі сучасних CAD/CAM/CAE/PLM систем.

4. Виконати автоматизоване формоутворення груп технічних об'єктів на засадах методології варіантного структурно-параметричного геометричного моделювання.

Таким чином, спосіб інтегрованих класифікацій для комп'ютерного формоутворення певних груп технічних виробів дозволяє, шляхом поєднання належних упорядкованих геометричних засобів і виконаної систематизації зазначеної продукції, продуктивно автоматизовано генерувати велику кількість варіантів опрацьовуваних об'єктів. Це дозволяє підвищувати продуктивність проєктування завдяки аналізу більшої кількості різновидів та визначенню кращих із них.

Зауважимо, що для досягнення ще більш ефективного результату поряд із висвітленим способом інтегрованих класифікацій груп технічних об'єктів бажано використовувати ще ряд способів, прийомів та алгоритмів. Наприклад, це стосується запропонованих автором способу зменшення області проектних розв'язків та способу узагальненого контуру, які аналізуються в дисертації далі. Зазначеним чином формується належна інтегрована комплексна методологія геометричного моделювання промислової продукції. Зазначимо також, що конкретні випадки автоматизованого конструювання можуть вимагати вдосконалення існуючих або навіть напрацювання нових способів, прийомів та алгоритмів для виконання належних побудов. Тому це потребує проведення подальших відповідних наукових досліджень.

2.2.2. Спосіб зменшення області проектних розв'язків

У підрозділі 2.1 було викладено загальну методологію даних наукових розвідок. Одним із ключових її моментів є *інтеграція*, зокрема: засобів та об'єктів геометричного моделювання, проаналізованих у попередньому пункті дисертації; геометричних параметрів і характеристик формоутворення та належних пов'язаних розрахункових інших величин, див. вираз (2.1). Запропонованому способу опрацювання останніх присвячено цю частину дослідження.

Зазначений спосіб зменшення області проектних розв'язків також становить одну з інваріантних складових запропонованої *інтегрованої комплексної методології автоматизованого геометричного моделювання* технічних об'єктів. Його головна ідея 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 (2.1) ... (2.4).

Рекомендований порядок дій зводиться до послідовного зменшення для проєктованого об'єкта (2.1) вихідної багатовимірної області допустимих розв'язків, що визначена в деякому вигляді, наприклад проміжками:

$$p_i \in [p_{i \min}, p_{i \max}], \hat{p}_j \in [\hat{p}_{j \min}, \hat{p}_{j \max}], \tilde{p}_k \in [\tilde{p}_{k \min}, \tilde{p}_{k \max}]. \quad (2.36)$$

При цьому в конкретних випадках застосовуються такі операції, як перетин ліній, поверхонь, тіл тощо. Зауважимо, що наявний простір є інтегрованим та комплексним, 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, як правило, багатовимірний геометричний об'єкт (2.1) відтворюється необхідною сукупністю ліній та поверхонь

$$F = ((f_i(u_i))_{i=1}^{N_{f_i}}, (f_n(u_{j_n}, v_{k_n}))_{n=1}^{N_{f_n}}), \quad (2.37)$$

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

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

Описаний спосіб дозволяє реалізовувати комплексне раціональне формоутворення технічних об'єктів під час проєктування, виготовлення та експлуатації. Його практичне використання для опрацювання ґрунтообробних знарядь подається в дисертації далі.

Тут проілюструємо тільки головну ідею запропонованого способу зменшення області проєктних розв'язків на прикладі доволі розповсюдженого в різноманітних технічних конструкціях виробу, як звичайна шестигранна гайка (рис. 2.6).

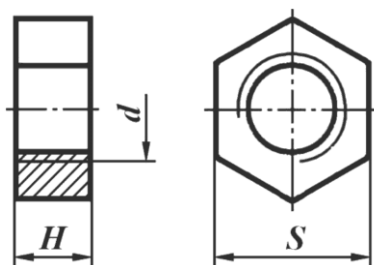


Рис. 2.6. Гайка шестигранна:

d – номінальний діаметр нарізі; p – крок нарізі;

S – розмір «під ключ»; H – висота гайки

На підставі загального кортежу (2.1) даний об'єкт $ГК$ визначають такі основні геометричні параметри, як номінальний діаметр d нарізі та її крок p , розмір «під ключ» S і висота H гайки, тобто

$$ГК = (d, p, S, H). \quad (2.38)$$

Початкова область проектних розв'язків згідно з проміжками (2.36) може мати вигляд

$$d \in [d_{\min}, d_{\max}], p \in [p_{\min}, p_{\max}], S \in [S_{\min}, S_{\max}], H \in [H_{\min}, H_{\max}]. \quad (2.39)$$

Як бачимо з виразів (2.38) і (2.39), гайка $ГК$, що розглядається, у процесі свого визначення з геометричної точки зору проходить шлях від багатовимірної початкової області можливих розв'язків (2.39) до певної точки (2.38) у цьому просторі. Відповідно до структурно-параметричного підходу досліджуватимемо цю багатовимірну область як деяку множину підпросторів меншої вимірності. У даному випадку в якості останніх для залежностей (2.37) застосуємо тривимірний простір як найбільш наочний.

Зауважимо, що далі не будемо акцентувати увагу на обґрунтуванні певного вибору з неперервних проміжків (2.39) конкретних дискретних величин. Нехай для кроку нарізі прийнятні два варіанти p_{\min} та p_{\max} (малий і великий крок). Тоді, за описаною вище методикою, для гайки (2.38) маємо два показані на рис. 2.7 тривимірні підпростори.

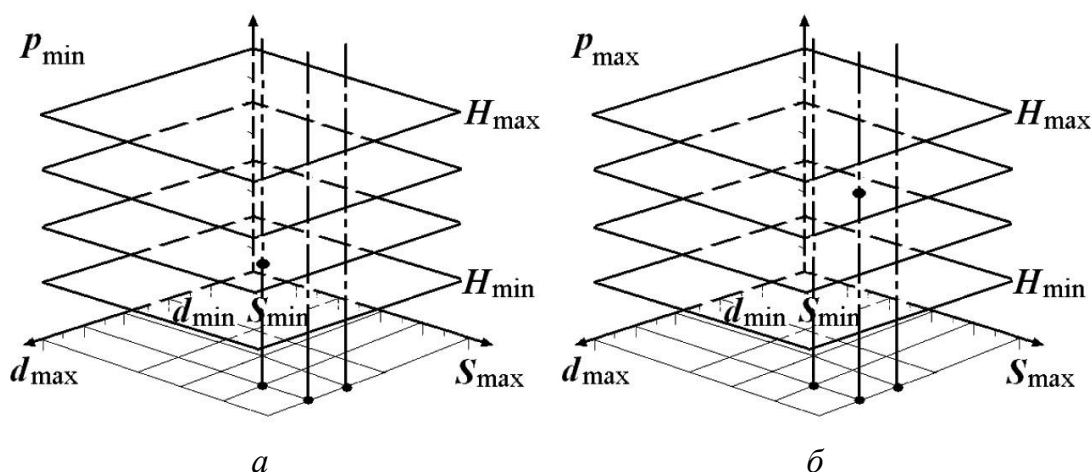


Рис. 2.7. Области проектних розв'язків гайки $ГК$:

a – для малого кроку нарізі; $б$ – для великого кроку нарізі

Поступове зменшення наведених областей проєктних розв'язків може полягати в тому, що, наприклад, спочатку визначаються дискретні величини діаметрів d нарізі та розмірів S «під ключ», тобто здійснюється дефініція належних множин. З геометричних позицій їм відповідають такі двовимірні фігури, як площини.

Нехай потрібні комбінації останніх утворюють, із використанням операцій перетинання, необхідні кортежі ліній, які на рис. 2.7 для наочності помічені трьома точками у площині нульової висоти H . Отже, на поточний момент початкова чотиривимірна область проєктних розв'язків (2.39) зменшилася до сукупності двох множин із трьома вказаними прямими.

Далі шляхом перетину цих трьох прямих із чотирма площинами висот H (гайки низькі, нормальні, високі, особливо високі) і врахування наявних обмежень визначаються потрібні точки з координатами (d, S, H) . На рис. 2.7 зображено по одній такій для p_{\min} та p_{\max} . Завершальна операція полягає в дефініції кращої з них із конкретними величинами (d, p, S, H) за існуючими критеріями.

Зауважимо, що, як видно з проаналізованого прикладу, порядок опрацювання параметрів модельованого об'єкта стосовно зменшення області його проєктних розв'язків у загальному випадку не є однозначним. У разі складних функціональних залежностей це може бути доволі важливим для успішного досягнення бажаних результатів.

2.2.3. Спосіб узагальненого контуру

З представленої в підрозділі 2.1 методології інтегрованого комплексного автоматизованого геометричного моделювання видно, що в даному дисертаційному дослідженні головний акцент робиться на створення відповідного узагальненого підходу. Відомо, що при комп'ютерному формоутворенні доволі важливим для багатьох деталей є етап побудови різноманітних їхніх контурів, які надалі використовуються для визначення потрібних поверхонь і тіл.

2.2.3.1. Основні положення

Запропонований спосіб узагальненого контуру є однією з конкретних подальших реалізацій інтегрованих класифікацій, доволі універсальний, може бути застосований для проектування груп технічних об'єктів. Його головна перевага полягає в забезпеченні продуктивного комп'ютерного аналізу чисельних різновидів опрацьовуваних виробів.

Деякий необхідний узагальнений контур $УК$ формується на засадах використання певних ліній

$$УК = (УК_i)_{i=1}^{N_{УК}}. \quad (2.40)$$

На основі кортежу (2.40) створюється множина $КД$ контурів конкретних деталей

$$КД = (КД_j)_{j=1}^{N_{КД}}, \quad (2.41)$$

де

$$КД_j = (КД_{jk})_{k=1}^{N_{КДj}}, \quad КД_{jk} \in УК. \quad (2.42)$$

При цьому, завдяки структурно-параметричному підходу до множин (2.40) ... (2.42), реалізується компроміс між кількістю $N_{КД}$ елементів $КД_j$ та їхньою складністю щодо охоплення геометрії певної групи виробів.

У якості компонентів $УК_i$ можуть застосовуватися всілякі лінії, наприклад, алгебраїчні та трансцендентні. Практичне використання даного підходу для варіантного автоматизованого конструювання робочих органів полицевих і чизельних знарядь наведено у третьому розділі дисертації.

Тут, із метою демонстрації інваріантного характеру запропонованого способу узагальненого контуру, проілюструємо його на прикладі формоутворення технологічних моделей різального інструменту. Це також важливо з позицій інтеграції стадій конструювання та виготовлення промислової продукції, оскільки, зокрема, різноманітний різальний інструмент широко застосовується під час виготовлення багатьох ґрунтообробних знарядь.

Для комп'ютерного моделювання процесів свердління і фрезерування використовуються спрощені геометричної моделі належних різальних інструментів, що охоплюють простір, який вони займають при своєму обертанні. Наданням додаткового потрібного руху цим інструментам та булевими операціями віднімання від об'єму заготовки частини простору, який у часі займає спрощена геометрична модель різального інструмента, отримуємо комп'ютерне динамічне відтворення процесу свердління і фрезерування.

Розглянемо засади способу узагальненого контуру на прикладі геометричного моделювання групи різальних інструментів (рис. 2.8), наведених у праці [198]. Їхні динамічні області обертання є тілами, векторні параметричні рівняння яких у декартовій системі координат $Oxyz$ мають вигляд

$$\mathbf{r}(u, v, w) = (x, y, z) = (w r_x(u) \cos v, r_y(u), w r_x(u) \sin v), \quad (2.43)$$

де $\mathbf{r}(u, v, w)$ – радіус-вектор точок фігури;

$u \in [0, 1]$, $v \in [0, 2\pi]$, $w \in [0, 1]$ – параметри;

$r_x(u)$, $r_y(u)$ – абсциса та ордината твірної лінії $\mathbf{r}(u)$.

З точки зору структурно-параметричного формоутворення показані на рис. 2.8 та визначені залежностями (2.43) інструменти подаються геометричними моделями на основі множини

$$I = (I_i)_{i=1}^6. \quad (2.44)$$

У розглянутому випадку недоліком є те, що для схожих технічних об'єктів застосовуються шість різних комп'ютерних твердотільних моделей. Покажемо як цього можна уникати шляхом використання запропонованого способу узагальненого контуру.

З наведеного видно, що в якості твірної для формування різальних інструментів (2.44) вжито симетричну відносно осі обертання Oy половину обводу, який визначає ці фігури. Виконаємо деякий аналіз цих ліній у структурно-параметричному аспекті.

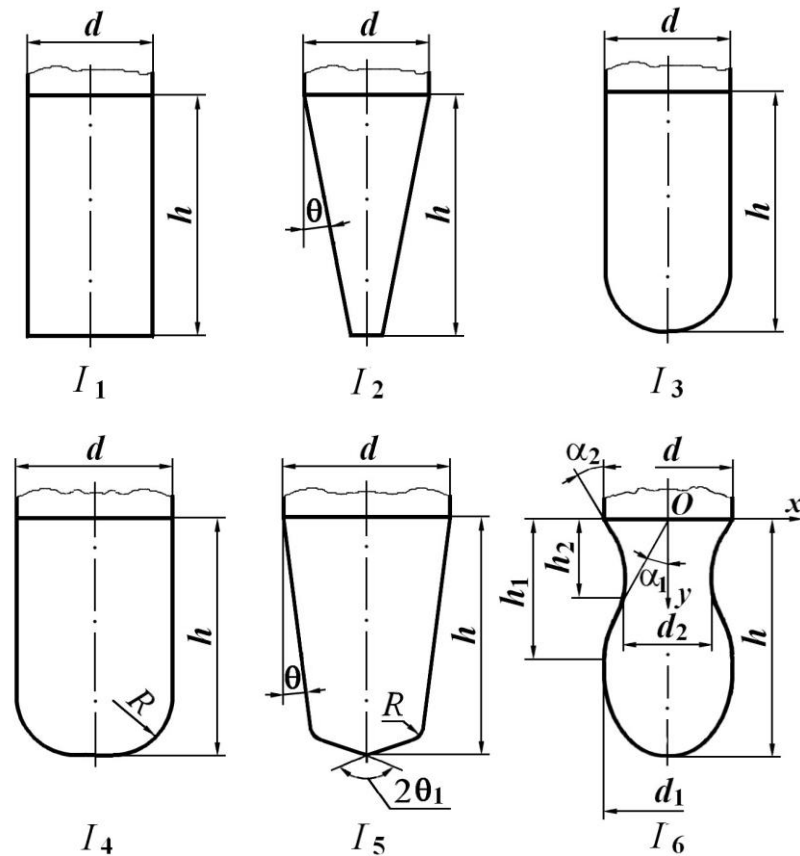


Рис. 2.8. Різальний інструмент для оброблення складних поверхнь деталей на багатокоординатних станках із числовим програмним керуванням:

I_1 – циліндричний; I_2 – конічний; I_3 – зі сферичною головкою;
 I_4 – з тороїдальною робочою частиною; I_5 – АРТ; I_6 – фасонний

Для інструмента I_1 твірна складається з двох розташованих під прямим кутом прямолінійних відрізків. Об'єкт I_2 – це вже більш загальний випадок, оскільки вводиться додатковий параметр θ , що визначає кут між зазначеними відрізками. Поширити ж розглянуту модель на наступний інструмент не вдається, бо до твірної останнього входить дуга кола. Фігура I_4 може бути узагальненням для тіла I_3 , але при цьому треба забезпечити виродження в пусту множину або точку горизонтального прямолінійного відрізка її твірної. Інструмент I_4 є окремим випадком об'єкта I_5 . Фігуру I_6 неможливо подати за допомогою попередньо розглянутих моделей.

Отже, один із прийомів способу узагальненого контуру полягає у введенні додаткових параметрів. У поданих прикладах це дозволяє зменшити число геометричних моделей (2.44) з шести до чотирьох. Для подальшого

узагальнення потрібно забезпечити параметричним моделям певні властивості структурних, тобто здатність виродження деяких своїх елементів, перетворення їх в інші (в даному випадку дуг кіл у прямолінійні відрізки) тощо.

Покажемо це на прикладі кривих другого порядку у векторній параметричній формі

$$\mathbf{r}(u) = \frac{(1-u)^2 \mathbf{r}_0 + w_1 2u(1-u) \mathbf{r}_1 + u^2 \mathbf{r}_2}{(1-u)^2 + w_1 2u(1-u) + u^2}, \quad (2.45)$$

де $\mathbf{r}(u)$ – радіус-вектор точок кривої;

$\mathbf{r}_0, \mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2$ – радіус-вектори в декартовій системі координат Oxy вершин характеристичного трикутника;

$w_1 \geq 0$ – ваговий коефіцієнт;

$u \in [0, 1]$ – параметр.

Зауважимо, що крива (2.45) є відрізком прямої лінії для $w_1=0$, дугою кола з кутовою величиною $0 < \beta < \pi$ при $w_1 = \cos(\beta/2)$ та вироджується в точку за умови $\mathbf{r}_0 = \mathbf{r}_2$. Отже, відповідає розглянутим вище вимогам узагальнення твірної проаналізованого різального інструменту.

За допомогою складеного обводу з трьох таких кривих

$$L = (L_i)_{i=1}^3 \quad (2.46)$$

можна побудувати також твірну інструмента I_6 .

При цьому маємо для

$$L_1: \mathbf{r}_0 = (0, h), \mathbf{r}_1 = (d_1/2, h), \mathbf{r}_2 = (d_1/2, h_1);$$

$$L_2: \mathbf{r}_0 = (d_1/2, h_1), \mathbf{r}_1 = (d_1/2, h_2 + (d_1 - d_2)/2 \operatorname{ctg} \alpha_1), \mathbf{r}_2 = (d_2/2, h_2);$$

$$L_3: \mathbf{r}_0 = (d_2/2, h_2), \mathbf{r}_1 = (c, (d/2 - c) \operatorname{ctg} \alpha_2), \mathbf{r}_2 = (d/2, 0), \quad (2.47)$$

де $c = (0,5d_2 \operatorname{ctg} \alpha_1 + 0,5d \operatorname{ctg} \alpha_2 - h_2) / (\operatorname{ctg} \alpha_1 + \operatorname{ctg} \alpha_2)$.

Використання співвідношень (2.45) ... (2.47) забезпечує гладкість першого порядку узагальненого контуру фігури I_6 . Наведені залежності дозволяють гнучко керувати такими геометричними параметрами, як розташування вузлів стику обводу, дотичними в них, формою складових кривих тощо.

З практичної точки зору та у відповідності до викладеного матеріалу для комп'ютерного формоутворення користувачам замість множини (2.44) можна залишити кортеж

$$I = (I_i)_{i=5}^6. \quad (2.48)$$

Перевагою виразу (2.48) є те, що, по-перше, останній поєднує в моделі I_5 компактність потрібних параметрів та широке охоплення при цьому номенклатури застосовуваного інструменту, а, по-друге, за допомогою моделі I_6 дозволяє конструювати більш складні криволінійні обводи.

Зазначимо, що внутрішню приховану від користувача системи CAD/CAM/CAE організацію моделей (2.48) доречно реалізовувати за допомогою загальних формул (2.45) та (2.46) із визначенням у випадку інструмента I_5 належних параметрів подібно до залежностей (2.47). Це забезпечує універсальний характер створюваного комп'ютерного програмного забезпечення. За описаним підходом здійснюється використання кривих вищого, ніж другий, порядку, зокрема, неоднорідних раціональних B-сплайнів (NURBS) тощо.

Таким чином, розглянутими вище відомостями на прикладі групи різальних інструментів подано методику застосування запропонованого способу узагальненого контуру, описано деякі практичні прийоми, зокрема, *введення додаткових параметрів, гнучкого формоутворення елементів узагальненого контуру, компактності геометричних параметрів, широкого охоплення номенклатури опрацьовуваних виробів, універсального характеру використовуваного математичного апарату*. Це дозволило забезпечити відповідне удосконалення методології структурно-параметричного геометричного моделювання технічних об'єктів.

Важливий момент із точки зору узагальнення застосовуваних різноманітних контурів для формоутворення промислової продукції полягає також в удосконаленні існуючих та розробці нових ліній, алгоритмів їхнього опрацювання порівняно з уже відомими. Зазначене питання певним чином висвітлюється в наступному підпункті дисертації стосовно кривих Безьє.

2.2.3.2. Криві Безьє та їхня степенева параметризація

Завдяки своїй простоті та передбачуваності формоутворення криві Безьє залишаються доволі популярними для комп'ютерного геометричного моделювання багатьох промислових виробів. При цьому використовуються вказані лінії різних степенів, серед яких найбільш розповсюджені кубічні і квадратичні. Це пов'язано з їх достатньою гнучкістю, прогнозованим характером формоутворення та ефективністю комп'ютерної реалізації. Однак у певних випадках виникає необхідність застосування кривих Безьє й вищих степенів. Наведені факти обумовлюють потребу подальшого покращення відповідного математичного апарату.

Проаналізуємо спочатку запропоноване автором дисертації вдосконалення автоматизованого обчислення площ криволінійних трапецій, обмежених лініями Безьє, тобто поліпшення належних математичних і комп'ютерних програмних засобів. Такі задачі постійно виникають, зокрема, під час варіантних ітераційних оптимізаційних інженерних розрахунків різноманітних технічних конструкцій на міцність у зв'язку з параметричними змінюваннями площ поперечних перерізів силових елементів тощо. Далі розглянуто відповідний напрацьований математичний апарат, акцентовано його переваги порівняно з існуючими способами, подано належні приклади.

Радіус-вектор $\mathbf{r}(u)$ кривої Безьє n -го степеня має вигляд

$$\mathbf{r}(u) = \sum_{k=0}^n \frac{n!}{k!(n-k)!} u^k (1-u)^{n-k} \mathbf{r}_k, \quad (2.49)$$

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

$u \in [0, 1]$ – параметр; $n \in \mathbb{N}$.

Вирази

$$\frac{n!}{k!(n-k)!} u^k (1-u)^{n-k} = B_{k,n} \quad (2.50)$$

є поліномами Бернштейна.

Площа S криволінійної трапеції, що обмежена плоскою параметричною кривою $\mathbf{r}(u)$, яка визначена в декартовій системі координат Oxy , обчислюється за відомою формулою

$$S = \int_{u_1}^{u_2} r_y(u) r'_x(u) du, \quad (2.51)$$

де $r_x(u)$, $r_y(u)$ – це $x(u)$ та $y(u)$ координати радіус-вектора $\mathbf{r}(u)$;

u_1, u_2 – проміжок змінювання параметра.

На підставі залежності (2.49) кубічна крива Безьє, див. рис. 2.9, має рівняння

$$\mathbf{r}(u) = (1-u)^3 \mathbf{r}_0 + 3u(1-u)^2 \mathbf{r}_1 + 3u^2(1-u) \mathbf{r}_2 + u^3 \mathbf{r}_3, \quad (2.52)$$

де $\mathbf{r}_0(x_0, y_0)$, $\mathbf{r}_1(x_1, y_1)$, $\mathbf{r}_2(x_2, y_2)$, $\mathbf{r}_3(x_3, y_3)$ – радіус-вектори вершин характеристичної ламаної, яка в даному випадку опукла та однозначна, що забезпечує потрібну властивість лінії (2.52).

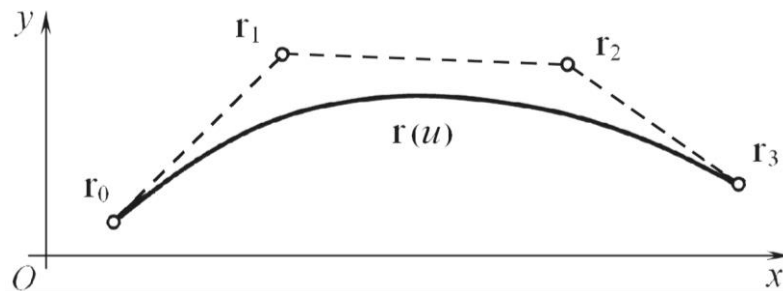


Рис. 2.9. Плоска крива Безьє третього степеня

Для співвідношення (2.52) маємо

$$r_y(u) = (1-u)^3 y_0 + 3u(1-u)^2 y_1 + 3u^2(1-u) y_2 + u^3 y_3, \quad (2.53)$$

$$r'_x(u) = -3(1-u)^2 x_0 + (3-12u+9u^2) x_1 + (6u-9u^2) x_2 + 3u^2 x_3, \quad (2.54)$$

$$u_1 = 0, u_2 = 1. \quad (2.55)$$

Підставляємо до формули (2.51) значення виразів (2.53) ... (2.55) та за допомогою інтегрування отримуємо

$$S = K \cdot X \cdot Y, \quad (2.56)$$

$$\text{де } K = (K_1, K_2, K_3, K_4, K_6), \quad K_1 = \int_0^1 (1-u)^5 du = 1/6, \quad K_2 = \int_0^1 u(1-u)^4 du = 1/30,$$

$$K_3 = \int_0^1 u^2(1-u)^3 du = 1/60, \quad K_4 = \int_0^1 u^3(1-u)^2 du = 1/60, \quad K_5 = \int_0^1 u^4(1-u) du = 1/30,$$

$$K_6 = \int_0^1 u^5 du = 1/6; \quad X_1=3(x_1-x_0), \quad X_2=6(x_2-x_1), \quad X_3=3(x_3-x_2),$$

$$X = \begin{pmatrix} X_1 & 0 & 0 & 0 \\ X_2 & 3X_1 & 0 & 0 \\ X_3 & 3X_2 & 3X_1 & 0 \\ 0 & 3X_3 & 3X_2 & X_1 \\ 0 & 0 & 3X_3 & X_2 \\ 0 & 0 & 0 & X_3 \end{pmatrix}; \quad Y = \begin{pmatrix} y_0 \\ y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{pmatrix}.$$

Отже, нами замінено обчислення інтеграла (2.51) для розрахунку площі криволінійної трапеції, обмеженої кубічною кривою Безьє, добутком (2.56) трьох матриць, перша K з яких містить сталі числові коефіцієнти, друга X та третя Y визначаються відповідно абсцисами й ординатами вершин характеристичної ламаної.

Проаналізуємо приклад практичного використання запропонованого підходу. На рис. 2.10 показано поперечний переріз деякої деталі. Між вертикальними прямолінійними лівим та правим контурами верхній і нижній обводи визначені кривими Безьє третього степеня $r_g(u)$ та $r_n(u)$ вигляду (2.52), де координати в міліметрах:

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_{0g} &= (x_{0g}, y_{0g}) = (30, 80), \quad \mathbf{r}_{1g} = (x_{1g}, y_{1g}) = (120, 89), \\ \mathbf{r}_{2g} &= (x_{2g}, y_{2g}) = (220, 89), \quad \mathbf{r}_{3g} = (x_{3g}, y_{3g}) = (330, 70); \\ \mathbf{r}_{0n} &= (x_{0n}, y_{0n}) = (30, 40), \quad \mathbf{r}_{1n} = (x_{1n}, y_{1n}) = (120, 31), \\ \mathbf{r}_{2n} &= (x_{2n}, y_{2n}) = (220, 31), \quad \mathbf{r}_{3n} = (x_{3n}, y_{3n}) = (330, 40). \end{aligned} \quad (2.57)$$

З рис. 2.10 видно, що потрібна площа S розраховується як різниця між площею S_g верхньої та S_n нижньої криволінійних трапецій

$$S = S_g - S_n. \quad (2.58)$$

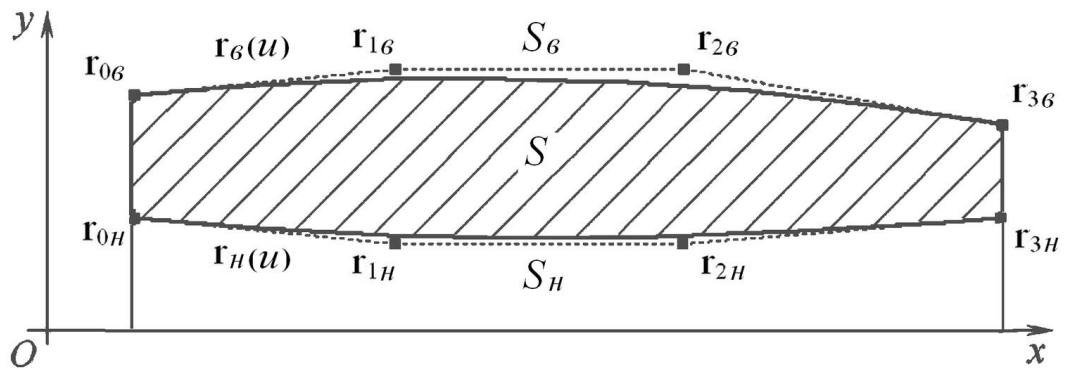


Рис. 2.10. Поперечний переріз проєктованої деталі

На основі залежностей (2.56) ... (2.58) маємо

$$S = S_6 - S_H = 24555 \text{ мм}^2 - 10650 \text{ мм}^2 = 13905 \text{ мм}^2.$$

Розв'язати розглянуту задачу можна й іншими способами, наприклад, чисельним інтегруванням методом прямокутників або трапецій. Перевагами ж запропонованого підходу є суттєве зменшення кількості математичних обчислень і точний результат.

При застосуванні методу трапецій, див. приклад А.1 додатку А.1, для визначення площі S_6 із кроком параметра $u=0,1$, якому відповідає відстань уздовж осі абсцис приблизно 30 мм, тобто розбиття довжини деталі на 10 ділянок, одержуємо величину $S_6 \approx 24534,3 \text{ мм}^2$. Похибка становить приблизно 21 мм^2 або 0,084 %. Якщо взяти $u=0,01$, іншими словами 100 елементарних трапецій із сторонами вздовж осі x приблизно 3 мм, то матимемо $S_6 \approx 24554,8 \text{ мм}^2$. Практично точне значення $S_6 \approx 24554,998 \text{ мм}^2$ забезпечує крок $u=0,001$ за якого $S_6 \approx 24554,998 \text{ мм}^2$. Але це досягається завдяки 1000 елементарних трапецій (кроку по осі абсцис приблизно 0,3 мм) та належної кількості обчислень, див. зазначений вище приклад А.1.

Точна величина площі опрацьовуваної трапеції за суттєво менше число розрахункових операцій забезпечується запропонованим вище підходом, див. приклад А.2 додатків А.1.

Отже, підвищення точності та продуктивності обчислень доволі важливе нині при оптимізаційних варіантних ітераційних розрахунках складних технічних виробів, де подібних до поданих прикладів виконується сотні тисяч.

Коротко зупинимось на подальшому покращенні ефективності викладеного математичного апарату. Можна виключити з аналізу нульові елементи матриці X формули (2.56) заміною добутку $K \cdot X$ циклом

$$M(i) = m(i)(K(i)X_1 + K(i+1)X_2 + K(i+2)X_3), \quad m = (1, 3, 3, 1), \quad i = 1 \dots 4, \quad (2.59)$$

на основі якого створюється матриця-рядок M , що множиться на матрицю Y для визначення потрібної площі S . Відповідний приклад А.3 міститься в додатках А.1 дисертації.

Розглянемо далі запропонований спосіб розрахунків площ криволінійних трапецій, обмежених лініями Безьє інших, ніж третій, порядків. Для цього подамо похідну виразу (2.49) за параметром u

$$\mathbf{r}'(u) = n \sum_{k=0}^{n-1} \frac{(n-1)!}{k!(n-1-k)!} u^k (1-u)^{n-1-k} (\mathbf{r}_{k+1} - \mathbf{r}_k). \quad (2.60)$$

На підставі співвідношень (2.51), (2.49) та (2.60) для квадратичної кривої Безьє ($n=2$)

$$\mathbf{r}(u) = (1-u)^2 \mathbf{r}_0 + 2u(1-u) \mathbf{r}_1 + u^2 \mathbf{r}_2, \quad (2.61)$$

отримуємо

$$S = K \cdot X \cdot Y, \quad (2.62)$$

де $K = (k_i)_{i=1}^4 = \left(\frac{1}{2}, \frac{1}{6}, \frac{1}{6}, \frac{1}{2}\right)$; $X_1=(x_1 - x_0)$, $X_2=(x_2 - x_1)$;

$$X = \begin{pmatrix} X_1 & 0 & 0 \\ X_2 & 2X_1 & 0 \\ 0 & 2X_2 & X_1 \\ 0 & 0 & X_2 \end{pmatrix}; \quad Y = \begin{pmatrix} y_0 \\ y_1 \\ y_2 \end{pmatrix}.$$

Для лінії Безьє першого степеня ($n=1$) маємо

$$\mathbf{r}(u) = (1-u) \mathbf{r}_0 + u \mathbf{r}_1 \quad (2.63)$$

та

$$S = K \cdot X \cdot Y, \quad (2.64)$$

де $K = (k_i)_{i=1}^2 = \left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right)$; $X_1=(x_1-x_0)$; $X = \begin{pmatrix} X_1 & 0 \\ 0 & X_1 \end{pmatrix}$; $Y = \begin{pmatrix} y_0 \\ y_1 \end{pmatrix}$.

Вирази (2.63) та (2.64) є відомою формулою для розрахунку площі трапеції. Використання залежностей (2.61) і (2.62) для обчислення площі поперечного перерізу крила літака викладено у прикладі А.4 додатків А.1.

Проаналізовані вище залежності (2.64), (2.62), (2.56) можна подати також як

$$S = X \cdot K \cdot Y, \quad (2.65)$$

де $X = (x_i)_{i=0}^n$ та $Y^T = (y_i)_{i=0}^n$ – матриці абсцис та ординат вершин характеристичної ламаної кривої Безьє n -го порядку, $n \in (1, 2, 3)$; K – матриця коефіцієнтів, що для першого, другого і третього степеня має відповідний вигляд:

$$n = 1, K = \begin{pmatrix} k_0 & k_1 \\ -k_1 & -k_0 \end{pmatrix}, k_0 = -\frac{1}{2}, k_1 = -\frac{1}{2};$$

$$n = 2, K = \begin{pmatrix} k_0 & k_1 & k_2 \\ -k_1 & 0 & k_1 \\ -k_2 & -k_1 & -k_0 \end{pmatrix}, k_0 = -\frac{1}{2}, k_1 = -\frac{1}{3}, k_2 = -\frac{1}{6};$$

$$n = 3, K = \begin{pmatrix} k_0 & k_1 & k_2 & k_3 \\ -k_1 & 0 & k_2 & k_2 \\ -k_2 & -k_2 & 0 & k_1 \\ -k_3 & -k_2 & -k_1 & -k_0 \end{pmatrix}, k_0 = -\frac{1}{2}, k_1 = -\frac{3}{10}, k_2 = -\frac{3}{20}, k_3 = -\frac{1}{20}.$$

На початку даного підpunkту дисертації вказувалось, що у практиці комп'ютерного геометричного моделювання застосовуються лінії Безьє й вищого, ніж третій, порядку. У цьому випадку викладений вище підхід для визначення площ криволінійних трапецій використовується за аналогією. Так, зокрема, для четвертого та п'ятого степеня маємо

$$n = 4, K = \begin{pmatrix} k_0 & k_1 & k_2 & k_4 & k_5 \\ -k_1 & 0 & k_3 & k_3 & k_4 \\ -k_2 & -k_3 & 0 & k_3 & k_2 \\ -k_4 & -k_3 & -k_3 & 0 & k_1 \\ -k_5 & -k_4 & -k_2 & -k_1 & -k_0 \end{pmatrix},$$

$$n = 5, K = \begin{pmatrix} k_0 & k_1 & k_2 & k_5 & k_6 & k_7 \\ -k_1 & 0 & k_3 & k_3 & k_5 & k_6 \\ -k_2 & -k_3 & 0 & k_4 & k_3 & k_5 \\ -k_5 & -k_3 & -k_4 & 0 & k_3 & k_2 \\ -k_6 & -k_5 & -k_3 & -k_3 & 0 & k_1 \\ -k_7 & -k_6 & -k_5 & -k_2 & -k_1 & -k_0 \end{pmatrix},$$

$$k_0 = -\frac{1}{2}, k_1 = -\frac{5}{18}, k_2 = -\frac{5}{36}, k_3 = -\frac{25}{252},$$

$$k_4 = -\frac{5}{63}, k_5 = -\frac{5}{84}, k_6 = -\frac{5}{252}, k_7 = -\frac{1}{252}. \quad (2.66)$$

З точки зору структурно-параметричного геометричного моделювання матриці коефіцієнтів K у формулах (2.56), (2.62), (2.64) ... (2.66) є сталими структурними складовими для кожного степеня кривої Безьє (*інваріантами* до координат останньої), а матриці X та Y – змінними параметричними компонентами (*координатами*) конкретної лінії.

Зауважимо, що для кривих Безьє вищих степенів характерним є подальше ускладнення використовованого математичного апарату. зниження комп'ютерної продуктивності їхнього опрацювання. Також дані лінії схильні до появи небажаних осциляцій і певним чином втрачають передбачуваність свого формоутворення. Однак, поряд з окресленими недоліками, вони, після належного наукового дослідження. мають гарні перспективи успішного застосування в сучасних автоматизованих інженерних системах.

Таким чином, у *першій частині поточного підпункту* дисертаційного дослідження проаналізовано деякі питання вдосконалення обчислення площ криволінійних трапецій, обмежених кривими Безьє різних степенів. Було розроблено належний математичний апарат, подано відповідні практичні приклади. Напрацьовані вище матеріали можуть успішно використовуватися в різноманітних графічних середовищах сучасних комп'ютерних інформаційних технологій.

Другу частину даного підпункту дисертації присвячено запропонованому узагальненню кривих Безьє на основі їхньої степеневій параметризації.

Геометричну інтерпретацію виразів (2.49) і (2.50) становить алгоритм де Кастельє. Послідовність зазначених 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

$$u : (1 - u) \quad (2.67)$$

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

Таким чином, загальна кількість ланок-відрізків становить

$$N_L = \sum_{k=1}^n k. \quad (2.68)$$

У цьому науковому дослідженні пропонується узагальнення лінійної параметризації вигляду (2.67) степеневою

$$u^{m_k} : (1 - u^{m_k}), \quad (2.69)$$

де індекс k відповідає залежності (2.68).

При $m_k=1, k \in (1 \dots N_L)$ співвідношення (2.69) відтворює вираз (2.67).

Проаналізуємо криві Безьє другого степеня, тобто коли $n=2$.

Згідно з формулами (2.49), (2.50), (2.67) ... (2.69)) для лінійної параметризації маємо

$$\mathbf{r}(u) = (1 - u)^2 \mathbf{r}_0 + 2u(1 - u)\mathbf{r}_1 + u^2 \mathbf{r}_2, \quad u \in [0, 1], \quad (2.70)$$

а для степеневій

$$\mathbf{r}(u) = ((1 - u^{m_1})\mathbf{r}_0 + u^{m_1}\mathbf{r}_1)(1 - u^{m_3}) + u^{m_3}((1 - u^{m_2})\mathbf{r}_1 + u^{m_2}\mathbf{r}_2), \quad u \in [0, 1]. \quad (2.71)$$

Як видно, залежність (2.70) одержуємо з виразу (2.71) за умови

$$m_1 = m_2 = m_3 = 1. \quad (2.72)$$

Іншими словами кажучи, в цьому випадку маємо звичайну криву Безьє. Опрацюємо співвідношення (2.71) із наступними конкретними величинами

$$\mathbf{r}_0 = (x_0, y_0) = (0, 0); \mathbf{r}_1 = (x_1, y_1) = (2, 2); \mathbf{r}_2 = (x_2, y_2) = (4, 1); m_3 = 1. \quad (2.73)$$

де $\mathbf{r}_0=(x_0, y_0)$, $\mathbf{r}_1=(x_1, y_1)$, $\mathbf{r}_2=(x_2, y_2)$ – радіус-вектори в декартовій системі координат Oxy вершин характеристичної ламаної.

На рис. 2.11 показано більш товстою кривою Безьє з лінійною параметризацією, а тоншими – зі степеневою. Штрихові лінії відтворюють дотичні в початковій та кінцевій точках. Рівняння (2.70) свідчить, що форма звичайної кривої Безьє є сталою. У випадку (2.71) варіювання параметрів m_k реалізує певні зміни. Так, зокрема, найвищій лінії відповідають значення $m_1=2,5$ та $m_2=8$, трохи нижчій – $m_1=2,5$ і $m_2=3,5$. Далі йде звичайна крива Безьє, потім із величинами $m_1=5$, $m_2=2$ та $m_1=20$, $m_2=2$. Отже, бачимо, що степенева параметризація забезпечує додаткову гнучкість порівняно зі звичайною кривою Безьє для геометричного моделювання під час автоматизованого проєктування технічних об'єктів.

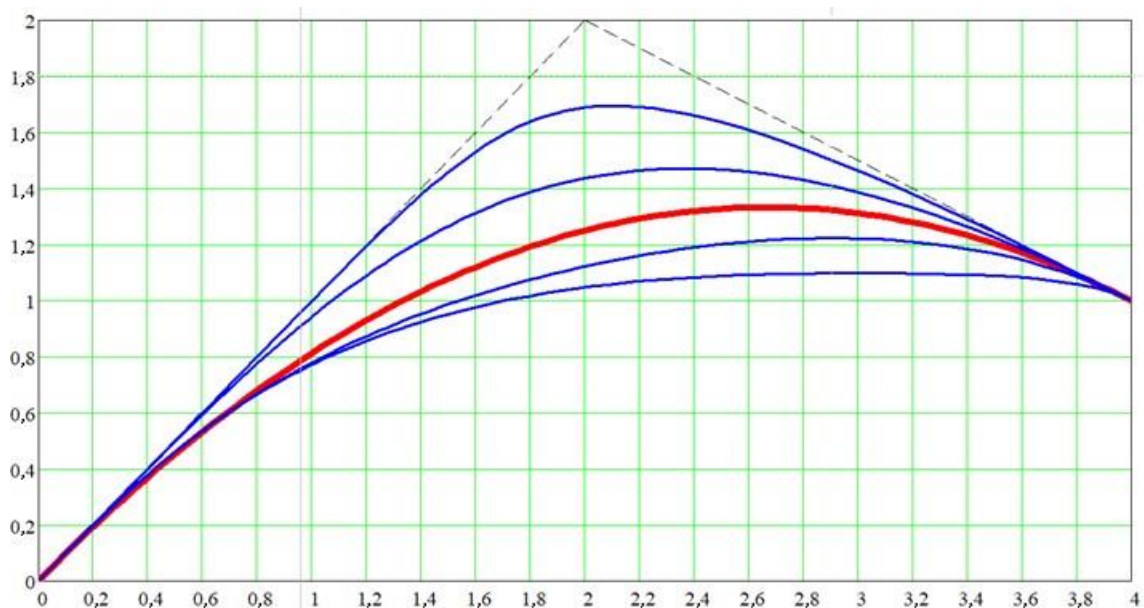


Рис. 2.11. Варіанти ліній Безьє другого степеня

Обґрунтуємо деякі властивості досліджуваної кривої вигляду

$$\mathbf{r}(u) = ((1-u^{m_1})\mathbf{r}_0 + u^{m_1}\mathbf{r}_1)(1-u) + u((1-u^{m_2})\mathbf{r}_1 + u^{m_2}\mathbf{r}_2), \quad u \in [0,1]. \quad (2.74)$$

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 (2.74) величин $u=0$ та $u=1$ засвідчує, що

$$\mathbf{r}(0) = \mathbf{r}_0 \text{ і } \mathbf{r}(1) = \mathbf{r}_2, \quad (2.75)$$

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

Покажемо, що опрацьовувана дуга на кінцях має дотичні, які за своїм напрямом збігаються з належними ланками характеристичного трикутника. Дотична лінії (2.74) у системі координат Oxy обчислюється за формулою

$$\frac{dy}{dx} = \frac{dy}{dx}(u) = \frac{dy(u)}{dx(u)} = \frac{dy(u)/du}{dx(u)/du} = \frac{d\mathbf{r}_y(u)}{d\mathbf{r}_x(u)}, \quad (2.76)$$

де

$$\begin{aligned} d\mathbf{r}_y(u) = & (u^{m_1} - 1)y_0 - (u^{m_2} - 1)y_1 + m_1 u^{m_1-1}(u-1)(y_0 - y_1) - \\ & - m_2 u^{m_2} (y_1 - y_2) - u^{m_1} y_1 + u^{m_2} y_2, \end{aligned} \quad (2.77)$$

$$\begin{aligned} d\mathbf{r}_x(u) = & (u^{m_1} - 1)x_0 - (u^{m_2} - 1)x_1 + m_1 u^{m_1-1}(u-1)(x_0 - x_1) - \\ & - m_2 u^{m_2} (x_1 - x_2) - u^{m_1} x_1 + u^{m_2} x_2. \end{aligned} \quad (2.78)$$

На підставі виразів (2.76) ... (2.78) для $m_1 > 1$ та $m_2 > 0$ отримуємо

$$\frac{dy}{dx}(0) = \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0}, \quad \frac{dy}{dx}(1) = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}. \quad (2.79)$$

Співвідношення (2.79) підтверджують збереження дотичних на кінцях кривої Безьє зі степеневою параметризацією.

Для промислової продукції доволі актуальне змінювання кривини проєктованих обводів. Для плоских ліній, що аналізуються, ця величина визначається залежністю

$$k(u) = \frac{\left| \frac{dx(u)}{du} \cdot \frac{dy^2(u)}{du^2} - \frac{dx^2(u)}{du^2} \cdot \frac{dy(u)}{du} \right|}{\left(\left(\frac{dx(u)}{du} \right)^2 + \left(\frac{dy(u)}{du} \right)^2 \right)^{3/2}}. \quad (2.80)$$

Для звичайної кривої Безьє другого степеня

$$\frac{dx(u)}{du} = 2 \cdot U \cdot X, \quad \frac{dx^2(u)}{du^2} = C \cdot X, \quad \frac{dy(u)}{du} = 2 \cdot U \cdot Y, \quad \frac{dy^2(u)}{du^2} = C \cdot Y, \quad (2.81)$$

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

$$\frac{dx(u)}{du} = U_1 \cdot X, \quad \frac{dy(u)}{du} = U_1 \cdot Y, \quad (2.82)$$

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

$$\frac{dx^2(u)}{du^2} = U_2 \cdot X, \quad \frac{dy^2(u)}{du^2} = U_2 \cdot Y, \quad (2.83)$$

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

Співвідношення (2.80) ... (2.83) дозволяють обчислювати кривину ліній Безьє, що розглядаються.

Акцентуємо увагу на деяких моментах. Аналіз формул (2.82) і (2.83) показує, що m_1 та m_2 повинні задовольняти умові

$$m_1 \geq 2, \quad m_2 \geq 1. \quad (2.84)$$

Це пов'язано з проміжком змінювання параметра u .

Підстановка до залежностей (2.83) значення $u=0$, а потім отриманих величин до виразу (2.80) свідчить, що для

$$m_1 > 2, m_2 > 1 \quad (2.85)$$

кривина k у цій точці дорівнює нулю.

Деякі приклади формоутворення проаналізованих ліній Безьє зі степеневою параметризацією на засадах викладеного математичного апарату (2.49), (2.50), (2.67) ... (2.85) ілюструють наступні зображення.

На рис. 2.12, *a* показано випадок із параметрами $m_1=2,5$ та $m_2=1,8$. У даному разі крива Безьє зі степеневою параметризацією практично збігається з варіантом лінійної параметризації. Це стосується і змінювання кривини, яке відтворюють штрих-пунктирні лінії. Головна відмінність полягає у кривині в початковій точці, що для першого випадку дорівнює нулю. Даний інваріант для значень (2.84) забезпечує зручне додавання до складених обводів відрізків прямих, доволі поширених при геометричному моделюванні різноманітних 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 їхнє розташування модифікується довільним чином, зберігаючи гладкість другого порядку в точці \mathbf{r}_0 . Описане виконується й далі, наприклад, коли до прямолінійного відрізка додається ще одна крива Безьє зі степеневою параметризацією. Можливе їхнє гладке поєднання й без такого проміжного відрізка.

Ненульову кривину в точці \mathbf{r}_0 ілюструє рис. 2.12, *б*, а рис. 2.12, *в* – ще один випадок відносно близької лінії зі степеневою параметризацією до звичайної кривої Безьє. Наступні зображення рис. 2.13 відтворюють більш відмінні варіанти. Як бачимо, існують механізми прогнозованого керування формою та розмірами модельованої лінії, її дотичними на кінцях і характером змінювання кривини.

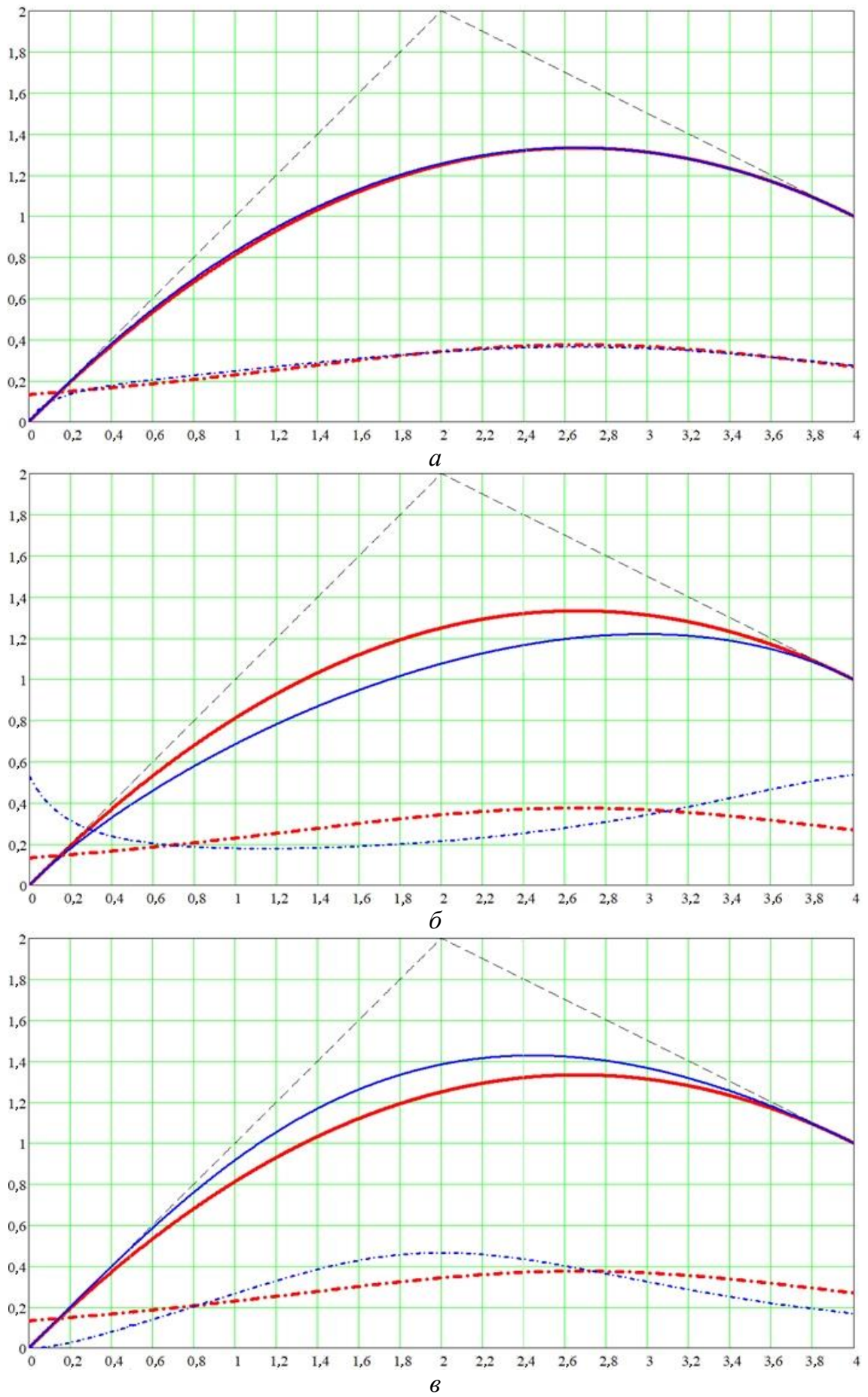


Рис. 2.12. Змінювання кривини ліній Безьє другого степеня:

a – $m_1=2$ і $m_2=1,8$; *б* – $m_1=2$ та $m_2=1$; *в* – $m_1=2,5$ і $m_2=3$

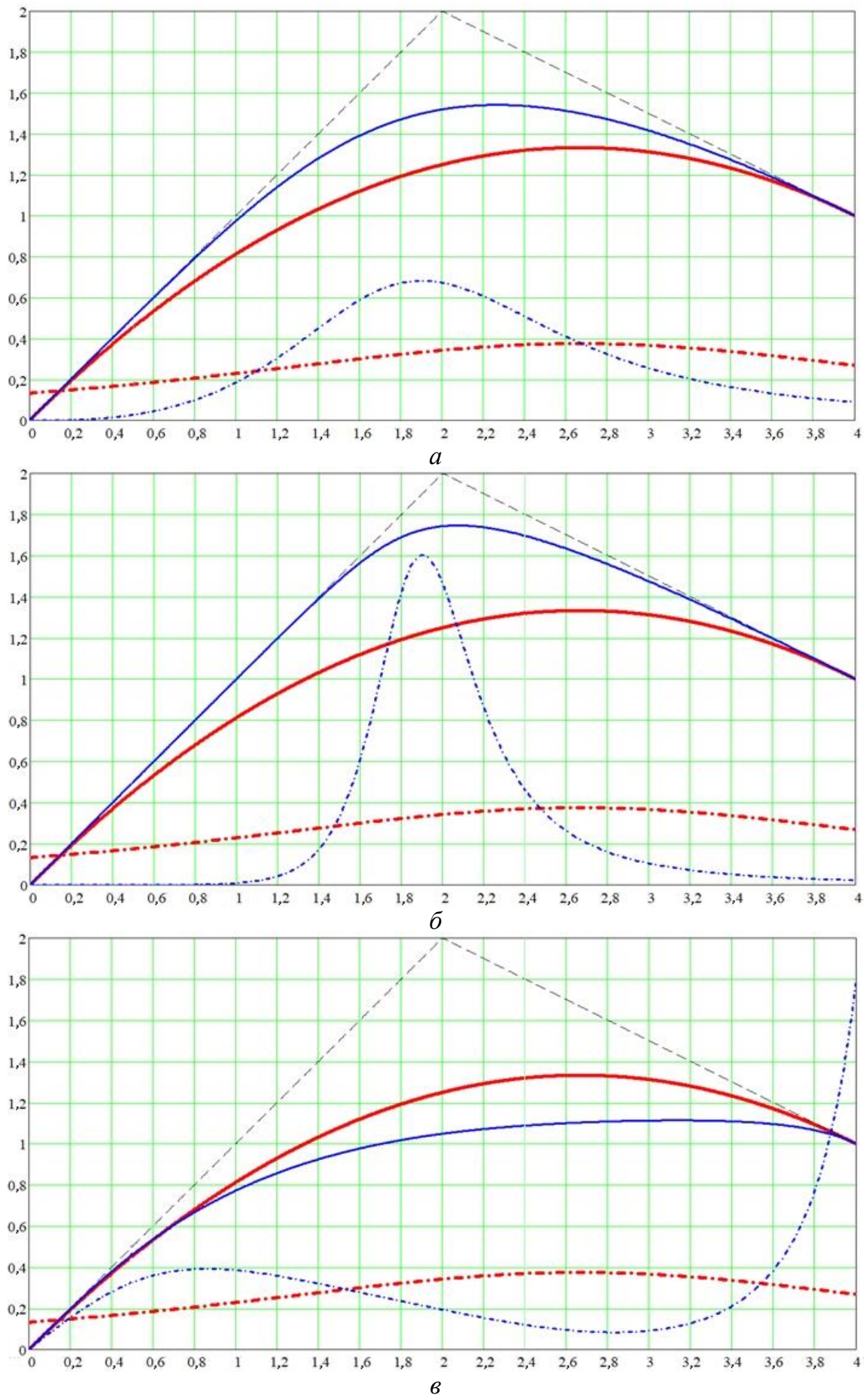


Рис. 2.13. Інші приклади ліній Безьє другого степеня:
 а – $m_1=2,5$ і $m_2=4,5$; б – $m_1=2,5$ та $m_2=10$; в – $m_1=15$ і $m_2=2$

У додатку А.1 приклад А.5 ілюструє практичне використання запропонованих кривих Безьє для геометричного моделювання серединних поверхонь газових балонів із дотриманням гладкості за кривиною. Прикладом А.6 проаналізовано максимальні відхилення зазначених ліній другого степеня від дуги кола з варіюванням величин показників степенів m_1 та m_2 . Показано, що при цьому похибка становить менше 0,7 %. Проілюстровано підвищення точності побудов за рахунок використання показника m_3 . Акцентовано необхідність проведення подальших наукових досліджень в окресленому напрямку.

2.3. Загальна методика геометричного моделювання

Ця частина даної наукової праці є завершальною у другому розділі дисертації, який присвячено теоретичним засадам інтегрованого комплексного формоутворення різноманітних технічних об'єктів на прикладі ґрунтообробних знарядь. Логічним підсумком викладеної вище методології геометричного моделювання, відповідних способів, прийомів та алгоритмів є опис належної запропонованої загальної методики, призначеної для безпосереднього використання на практиці.

Її головний зміст становить рекомендований порядок інтегрованого комплексного формоутворення різноманітних технічних об'єктів, який у наступних розділах проілюстровано на конкретних ґрунтообробних знаряддях.

1. *Визначення груп опрацьовуваних об'єктів і процесів, їхня систематизація в геометричному аспекті та стосовно функціонального призначення.*

При цьому особливо важливим моментом є дефініція оптимального складу зазначених груп. Під останнім мається на увазі компроміс між широтою охоплення номенклатури й певною схожістю її елементів. Недотримання вказаної умови призводить або до вузької спеціалізації створюваних геометричних моделей, або до великої складності їхнього розроблення та подальшого застосування.

2. Під час виконання попередньої стадії необхідно брати до уваги інтегрований комплексний характер автоматизованого проєктування сучасної техніки.

Акцентоване стосується, зокрема, тісного взаємозв'язку геометричних параметрів і характеристик промислової продукції з належними їй функціональними властивостями. Це підкреслено виразами (2.1) і (2.2) викладеної вище методології формоутворення. Зауважимо, що для опрацювання описів суміжних дисциплін доволі часто зручно використовувати геометричний підхід. Це також проілюстровано в наступних матеріалах дисертаційного дослідження.

3. На підставі запропонованого способу інтегрованих класифікацій для успішного автоматизованого формоутворення груп технічних об'єктів рекомендується встановити найбільш придатні відповідні засоби моделювання.

У разі їхньої відсутності або недосконалості треба розробити нові. Відповідні приклади наведено в наступних розділах дисертації.

4. Обов'язково брати до уваги вплив областей проєктних розв'язків інших дисциплін, за допомогою яких визначаються раціональні спеціалізовані параметри й характеристики.

Для належного практичного застосування було напрацьовано спосіб зменшення області проєктних розв'язків. Його використання також подано далі.

5. З метою підвищення продуктивності автоматизованого проєктування бажано вживати достатньо узагальнені засоби комп'ютерного формоутворення, розробляючи на їхній основі уніфіковані та спеціалізовані геометричні модулі.

Такими засобами в дисертації є, зокрема, раціональні векторні параметричні криві другого порядку й поверхні Кунса та побудовані на їхній основі моделі для формоутворення полицевих і чизельних знарядь, запропоновані криві Безьє зі степеневою параметризацією, спосіб узагальненого контуру тощо.

б. Для забезпечення успішного поєднання проаналізованих вище компонентів рекомендується застосовувати СПГМ, які становлять основу для побудови відповідних КГМ, ПГМ та ІКГМ.

Їхнє проектування для ґрунтообробних знарядь розглядається в подальших розділах дисертації. Головними перевагами зазначеного підходу є забезпечення всебічного дослідження певного об'єкта, дефініція можливих взаємозв'язків між його елементами, опрацювання варіантних послідовностей синтезу з реалізацією ефективної його структурно-параметричної оптимізації.

Під час проаналізованого вище порядку інтегрованого комплексного формоутворення технічних об'єктів використовуються різноманітні типові прийоми, наприклад, для розрахунків позиційних і метричних характеристик геометричних фігур. Деякі з них подано в підпункті 2.2.3.2 для кривих Безьє. Дефініція довжин та площ параметричних ліній і поверхонь, визначених у декартовій системі координат $Oxuz$, вигляду

$$\mathbf{r}(u) = (x(u), y(u), z(u)), \quad u \in [u_{\min}, u_{\max}];$$

$$\mathbf{r}(u, v) = (x(u, v), y(u, v), z(u, v)), \quad u \in [u_{\min}, u_{\max}], v \in [v_{\min}, v_{\max}]$$

здійснюється за допомогою обчислювальних процедур, що апроксимують із необхідною точністю лінії ламаними, а поверхні – трикутниками.

При цьому реалізується ітераційний поділ навпіл із поступовим загушенням проміжків змінювання параметрів u та v . У поданому нижче співвідношенні (2.86) для них застосовано узагальнене позначення t . Критерієм досягнення на поточному i -му проміжку $[t_i, t_{i+1}]$ потрібної точності δ є вираз

$$\frac{((\mathbf{r}(t_k) - \mathbf{r}(t_i)) \times (\mathbf{r}(t_{i+1}) - \mathbf{r}(t_i)))^2}{(\mathbf{r}(t_{i+1}) - \mathbf{r}(t_i))^2} \leq \delta^2, \quad (2.86)$$

де t_k – величини параметра для контрольних точок.

Наведена залежність характеризує відхилення поточної дуги лінії або поверхні від апроксимуючої її хорди.

Також доволі поширені різноманітні прийоми інтерполяції, оскільки у ґрунтообробній механіці значна кількість розрахунків виконується на основі експериментальних даних. З метою застосування останніх у вигляді аналітичних залежностей в інтегрованих комплексних комп'ютерних геометричних моделях ґрунтообробних знарядь використовується наступний математичний апарат.

Зазвичай дослідні величини подаються у вигляді точок або ліній на площині. У першому разі інтерполюючим геометричним об'єктом є лінія, а у другому – поверхня. Розглянемо останній випадок як більш загальний, бо перший є його окремим різновидом. Нехай маємо наступну множину експериментальних радіусів-векторів точок P у декартовій системі координат $Oxyz$

$$P_{i,j} = (x_i, y_j, z_{i,j})_{i=0}^{N_{P_i}} \cdot_{j=0}^{N_{P_j}}, \quad (2.87)$$

де $N_p = (N_{p_i} + 1) \cdot (N_{p_j} + 1)$ – їхнє число.

Застосуємо лінійну інтерполяцію для заміни множин точок ламаними. Це обумовлено як простотою математичного апарату, так і тим, що в даному випадку виключається можливе підсилення похибок дослідницьких даних, наприклад, як поліномами вищих порядків.

Для інтерполяції вздовж осі x маємо

$$P_{i,j}(u) = (1-u)P_{i,j} + uP_{i+1,j}, \quad i = 0 \dots N_{P_i} - 1, \quad j = 0 \dots N_{P_j}. \quad (2.88)$$

У випадку площини одній лінії відповідає $j=0$, інакше отримуємо $N_{p_j} + 1$ ліній. Для інтерполяції по осі y маємо

$$P_{i,j}(v) = (1-v)P_{i,j} + vP_{i,j+1}, \quad i = 0 \dots N_{P_i}, \quad j = 0 \dots N_{P_j} - 1. \quad (2.89)$$

Отже, виконано узагальнення від сукупності (2.87) точок до геометричної моделі у вигляді множини ліній (2.88) та (2.89). Число останніх

$$N_L = N_{P_i} \cdot (N_{P_j} + 1) + (N_{P_i} + 1) \cdot N_{P_j}. \quad (2.90)$$

Для кожної з одержаних чарунок (2.90) можна використати метод Кунса.

Тоді

$$\begin{aligned} P_{i,j}(u, v) = & (1 - v)P_{i,j}(u) + vP_{i,j+1}(u) + (1 - u)P_{i,j}(v) + uP_{i+1,j}(v) - \\ & - (1 - v)(1 - u)P_{i,j} - (1 - v)uP_{i+1,j} - v(1 - u)P_{i,j+1} - vuP_{i+1,j+1}, \\ & u = [0, 1], v = [0, 1]. \end{aligned} \quad (2.91)$$

Це дозволяє з певною точністю визначати необхідні для подальших розрахунків величини не тільки в окремих точках або на деяких лінях, а й на потрібних ділянках площини Oxy .

Загальне число чарунок (2.91)

$$N_S = N_{p_i} \cdot N_{p_j}. \quad (2.92)$$

Можливий випадок, коли вздовж осі x чи y виконується інтерполяція або апроксимація (наприклад методом найменших квадратів) поліномами вищих порядків, трансцендентними функціями з подальшим застосуванням уже до них лінійної інтерполяції.

Тоді

$$L_j(u) = (L_j(u))_{j=0}^{N_{L_j}}, \quad (2.93)$$

$$L_j(u, v) = (1 - v)L_j(u) + vL_{j+1}(u), \quad j = 0 \dots N_j - 1; \quad (2.94)$$

або

$$L_i(v) = (L_i(v))_{i=0}^{N_{L_i}}, \quad (2.95)$$

$$L_i(u, v) = (1 - u)L_i(v) + uL_{i+1}(v), \quad i = 0 \dots N_i - 1. \quad (2.96)$$

Кількість поверхонь у поданих двох останніх випадках відповідно N_{L_j} та N_{L_i} .

Для заміни множини (2.87) однією поліноміальною поверхнею використовується наступний підхід.

Спочатку для інтерполяції або апроксимації по осі x маємо

$$a_{N_{p_i}, j} x^{N_{p_i}} + a_{N_{p_i}-1, j} x^{N_{p_i}-1} + \dots + a_{0, j} x^0, \quad j = 0 \dots N_{p_j}. \quad (2.97)$$

Коефіцієнти $a_{i,j}$ у формулі (2.97), де $i=0 \dots N_{p_j}$, обчислюються, зокрема, за методом Лагранжа чи Ньютона або способом найменших квадратів.

Далі інтерполюються по y , тобто вздовж j , вже коефіцієнти $a_{i,j}$. У результаті отримуємо

$$a_{N_{p_i}}(y) \cdot x^{N_{p_i}} + a_{N_{p_i}-1}(y) \cdot x^{N_{p_i}-1} + \dots + a_0(y) \cdot x^0. \quad (2.98)$$

Отже, вираз (2.98), як уже акцентувалось вище, становить одну функціональну залежність, що подає всю вихідну множину (2.87).

Зауважимо, що безпосереднє використання такого підходу без виконання належного аналізу початкових точок, наприклад, викладеними методами лінійної інтерполяції, внаслідок наявності похибок в експериментальних даних може призвести спотворення отримуваних результатів. Локалізувати ймовірні вади краще на рівні геометричних моделей ліній. Для цього доволі зручними є сучасні засоби комп'ютерної графічної візуалізації.

У конкретних випадках інтегрованого комплексного геометричного моделювання різноманітних технічних об'єктів, у тому числі й ґрунтообробних знарядь, крім співвідношень (2.87) ... (2.98) може застосовуватися й інший подібний математичний апарат.

Таким чином, нами викладено базові основи запропонованої загальної методики автоматизованого комп'ютерного формоутворення, яка підводить рекомендаційні підсумки другого розділу, присвяченого теоретичним засадам інтегрованого комплексного геометричного моделювання ґрунтообробних знарядь. На підставі цього в наступних матеріалах дисертації здійснюється проєктування плугів, стрілчастих лап, сільськогосподарських дисків, процесів обробітку ґрунту і т. д.

Висновки до розділу 2

У цьому розділі дисертації з метою розширення теоретичного ядра прикладної геометрії розроблено спеціальну теорію інтегрованого комплексного геометричного моделювання для якісно нового дослідження

багатопараметричних складних технічних об'єктів і процесів на прикладі ґрунтообробних знарядь та здійснено подальше вдосконалення автоматизованого формоутворення.

Було отримано наступні нові наукові результати.

1. Розроблено методологію інтегрованого комплексного формоутворення технічних об'єктів, яку проілюстровано на прикладі сільськогосподарських 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. Ця методологія забезпечила базис для розроблення нових способів, прийомів та алгоритмів формоутворення різноманітних технічних об'єктів, сприяє інтеграції в цілісний науковий підхід таких напрямків досліджень наукової школи геометричного моделювання КПІ ім. Ігоря Сікорського, як структурно-параметричне моделювання, сільськогосподарське машинобудування та багатовимірна геометрія.

2. Розроблено спосіб інтегрованих класифікацій для автоматизованого формоутворення груп технічних об'єктів, який реалізує продуктивне комп'ютерне геометричне моделювання належної номенклатури. Це забезпечується за рахунок взаємної адаптації систематизованих графічних засобів і відтворюваних промислових виробів. За потреби існуюча методологія доповнюється новими прийомами, алгоритмами тощо. Так реалізується обопільне вдосконалення в теоретичному і практичному плані геометричного моделювання та технічних об'єктів.

Зазначений спосіб спрямований на побудову не індивідуальних геометричних моделей, а узагальнених групових. Це потребує проведення відповідної систематизації як засобів формоутворення, так й опрацьовуваної промислової продукції. Подано класифікацію засобів автоматизованого геометричного моделювання, яка є інваріантною по відношенню до

різноманітних технічних об'єктів. Виконано спеціалізовану структурно-параметричну класифікацію ґрунтообробних знарядь в аспекті формоутворення. Підкреслено, що у випадку іншої номенклатури потрібно здійснювати належну систематизацію за аналогією з розглянутим прикладом. Таким чином, даний спосіб забезпечує зручну автоматизовану генерацію великої кількості варіантів опрацьовуваної промислової продукції. Останнє дозволяє підвищувати ефективність проектування завдяки аналізу більшого числа різновидів та визначенню кращих із них.

3. Розроблено спосіб зменшення області проектних розв'язків, що призначений для дефініції раціональних величин параметрів і характеристик не тільки геометричних, а й інших дисциплін.

Цей спосіб також є інваріантною складовою запропонованої інтегрованої комплексної методології автоматизованого формоутворення технічних об'єктів. Його головна ідея полягає в поступовому визначенні раціонального варіанта опрацьовуваного виробу, який із геометричних позицій являє собою певну точку в багатовимірному функціональному просторі. Порядок дій зводиться до послідовного зменшення для досліджуваного об'єкта вихідної багатовимірної області допустимих розв'язків. Ключовий момент становить поєднання засобів геометричного моделювання, параметрів і характеристик формоутворення та розрахункових величин інших, ніж геометрія, спеціалізованих дисциплін. При цьому в конкретних випадках застосовуються такі операції, як перетин ліній, поверхонь, тіл тощо. Зауважимо, що зазначений простір інтегрований та комплексний, оскільки охоплює геометричні параметри й характеристики проєктованої промислової продукції та її належні інші величини.

4. Розроблено спосіб узагальненого контуру, який є логічним продовженням і доповненням запропонованого підходу інтегрованих класифікацій, спирається на методологію структурно-параметричного формоутворення, доволі універсальний, оскільки придатний для проектування різноманітних груп технічних об'єктів. Його основна перевага полягає в забезпеченні плідного аналізу комп'ютерними засобами чисельних варіантів опрацьовуваної промислової продукції.

У рамках даного способу виконано узагальнення кривих Безьє шляхом застосування степеневі параметризації. Показано, що в результаті цього підвищується гнучкість формоутворення, з'являється ряд корисних нових геометричних властивостей, які підтверджено належними математичними викладками.

5. Удосконалено методологію структурно-параметричного формоутворення доповненням її базових наукових положень принципом інтеграції, що полягає в поєднанні етапів життєвого циклу технічних об'єктів та належних засобів геометричного моделювання. Також покращено СПГМ застосуванням до їхніх компонентів циклічних, тобто повторюваних, операцій формоутворення.

Принцип інтеграції проходить червоною ниткою через усе дане наукове дослідження, слугує об'єднуючим засобом для багатьох напрацьованих способів, прийомів, алгоритмів і методик автоматизованого комп'ютерного геометричного моделювання.

Отже, другий розділ дисертації містить запропоновані теоретичні положення та розроблені на їхніх засадах нові способи інтегрованого комплексного варіантного формоутворення. Викладені відомості слугують основою для виконаного у трьох наступних розділах опрацювання різноманітних сільськогосподарських ґрунтообробних знарядь, побудови належних СПГМ, КГМ, ІГМ та ІКГМ.

Публікації автора з розглянутих питань: [244, 245, 246, 252–254, 256, 257, 262, 263, 266, 269, 270, 274, 276, 365].

Список публікацій здобувача за матеріалами розділу 2

1. 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.

2. Яблонський П.М. Деякі питання узагальнення формоутворення різального інструменту. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. Херсон: ХНТУ, 2019. Вип. 1(68). С. 73–77.

3. 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.

4. 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. Особистий внесок здобувача: розроблено теоретичні основи автоматизованого геометричного моделювання групи технічних об'єктів на прикладі дискових ґрунтообробних знарядь шляхом узагальнення засобів комп'ютерного формоутворення на засадах використання принципу інтеграції.

5. 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. Особистий внесок здобувача: розроблено математичний апарат для розрахунку площ криволінійних трапецій, обмежених кривими Безьє третього степеня.

6. 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. Особистий внесок здобувача: запропоновано узагальнення структурно-параметричних геометричних моделей шляхом застосування до їхніх елементів циклічних, тобто повторюваних, операцій формоутворення.

7. 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. Особистий внесок здобувача: проаналізовано сучасний стан, актуальні проблеми та напрямки розвитку наукової школи прикладної геометрії КПІ ім. Ігоря Сікорського.

8. 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. 15. Особистий внесок здобувача: обґрунтовано, що для досягнення ефективних результатів комп'ютерного геометричного моделювання різноманітної промислової продукції необхідно здійснювати не тільки узагальнення засобів формоутворення, а й відповідних об'єктів проектування.

9. 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. 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.

10. 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. Особистий внесок здобувача: виконано аналіз сучасного стану, основних напрямків досліджень, отриманих здобутків та перспектив подальшого розвитку наукової школи прикладної геометрії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», визначено потреби формування інтегрованої комплексної методології геометричного моделювання різноманітних технічних об'єктів, процесів їхнього виготовлення та експлуатації.

11. 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. Особистий внесок здобувача: визначено перспективний підхід до комп'ютерного формоутворення різноманітної промислової продукції,

зроблено прогноз необхідних методів, способів, прийомів, алгоритмів і методик автоматизованого геометричного моделювання технічних об'єктів.

12. 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. Особистий внесок здобувача: опрацьовано питання вдосконалення обчислення площ криволінійних трапецій, обмежених кривими Безьє різних степенів, запропоновано застосування розробленого математичного апарату в середовищі сучасних комп'ютерних інформаційних технологій.

13. 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. Особистий внесок здобувача: виконано опис основних положень інтегрованого комплексного геометричного моделювання ґрунтообробних знарядь.

14. 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. Особистий внесок здобувача: запропоновано спосіб інтегрованих класифікацій для автоматизованого формоутворення груп технічних об'єктів.

15. Яблонський П.М., Вірченко Г.А., Терещук М.О. Криві Безьє зі степеневою параметризацією. *Прикладні питання математичного моделювання*. Херсон: ХНТУ, 2024. Т. 7, №1. С. 23–31. Особистий внесок здобувача: запропоновано математичний апарат степеневої параметризації для кривих Безьє.

16. 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. Особистий внесок здобувача: розроблено математичний апарат комп'ютерного варіантного геометричного моделювання відвалів плугів.

РОЗДІЛ 3

ГЕОМЕТРИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОБОЧИХ ОРГАНІВ ПОЛИЦЕВИХ ТА ЧИЗЕЛЬНИХ ЗНАРЯДЬ

Третій розділ дисертації присвячено безпосередньому геометричному моделюванню конкретних сільськогосподарських ґрунтообробних знарядь, зокрема полицевих і чизельних. Реалізацію здійснено на засадах поданої в попередній частині дослідження запропонованої методології із застосуванням відповідних напрацьованих нових способів та прийомів формоутворення.

При цьому широко використана виконана систематизація як геометричних засобів, так і класифікація ґрунтообробних знарядь. Основний акцент спрямовано на доцільність побудови узагальнених моделей для комп'ютерного формоутворення. Підкреслено важливий момент стосовно того, що певні такі геометричні засоби здатні ефективно охоплювати доволі різні знаряддя з точки зору обробітку ґрунту. У даному разі маються на увазі полицеві та чизельні, див. вираз (2.26). Більш докладно перші розкриваються множиною (2.27), а другі – кортежем (2.29). Також розглянуто питання вдосконалення конструкції деяких сільськогосподарських ґрунтообробних машин із метою практичної реалізації запропонованого інтегрованого комплексного підходу до автоматизованого формоутворення.

3.1. Узагальнена модель формоутворення

Як уже зазначалось вище, головною метою даного наукового дослідження є напрацювання нових геометричних засобів для ефективного здійснення комп'ютерного моделювання технічних об'єктів. У багатьох випадках належною основою для цього постають узагальнені моделі формоутворення. Зазначеному питанню на прикладі ґрунтообробних знарядь присвячено цей підрозділ дисертації.

Аналіз приведених на рис. 2.3 ... 2.5 та інших робочих органів, наявних у літературних джерелах, свідчить, що для достатньо широкої їхньої

номенклатури необхідне геометричне моделювання основних робочих поверхонь може бути реалізоване за викладеною нижче запропонованою схемою.

У якості відправної теоретичної бази візьмемо наведене в підрозділі 1.2 існуюче формоутворення ґрунтообробних знарядь. Аналізуючи рис. 1.6, приходимо до висновку про те, що подані поверхні є *лінійчастими*, тобто побудованими переміщенням прямолінійних твірних уздовж певних, у загальному випадку криволінійних напрямних. Зовнішній контур, який обмежує ці поверхні, можна розглядати як топологічний чотирикутник.

До акцентованих у підрозділі 1.2 недоліків зазначених моделей відносяться:

- придатність до виконання тільки графічними методами;
- відсутність орієнтації на реалізацію засобами сучасної комп'ютерної техніки;
- значна трудомісткість створення великого числа варіантів проєктованих поверхонь робочих органів із метою їхньої ітераційної оптимізації згідно з різноманітними наявними умовами;
- відсутність акцентування на засобах для гнучкого, продуктивного і прогнозованого змінювання форми та розмірів досліджуваної промислової продукції.

Ще одне проблемне питання становить неможливість безпосередньої точної реалізації описаних геометричних побудов у нинішніх CAD/CAM/CAE системах. Викладені вище недоліки слугують вихідними вимогами стосовно напрацювання відповідного нового математичного апарату для формоутворення вказаних основних робочих поверхонь розглянутих сільськогосподарських знарядь.

На підставі способу інтегрованих класифікацій, згідно з визначеними технічними об'єктами для проєктування, тобто *полицевими* та *чизельними* ґрунтообробними знаряддями, див. вирази (2.26), (2.27), (2.29), для подальшого використання з множини фігур (2.15) обираємо елемент $\Gamma\Phi_2 = ПВ$ (*поверхні*), а

з геометричних способів ГС моделювання (2.16) – $ГС_1 = ГСС$ (геометричні способи створення). З кортежу (2.17), що відповідає останнім, беремо елемент $ГС_{1_2}$ (аналітичні способи). Для нього з множини (2.20) визначаємо компонент $ГС_{1_2_1}$ (алгебраїчні способи).

Як зазначалось у підпункті 2.2.1.1, згідно з конкретними умовами моделювання здійснюється більш докладна дефініція необхідних засобів формоутворення. У нашому випадку це можуть бути поверхні Кунса, див. рис. 3.1.

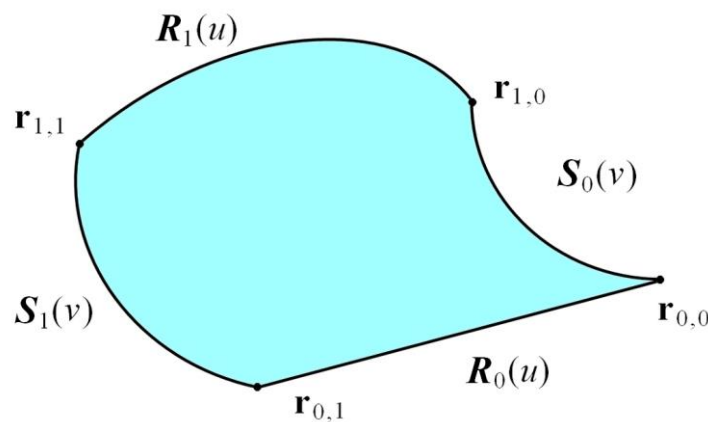


Рис. 3.1. Поверхня Кунса

Відомо, що вказана фігура будується на основі чотирьох обмежуючих її ліній, у даному разі $R_0(u)$, $R_1(u)$, $S_0(v)$, $S_1(v)$, які стикуються в точках $r_{0,0}$, $r_{0,1}$, $r_{1,0}$, $r_{1,1}$ та утворюють топологічний чотирикутник.

$$\begin{aligned} \mathbf{R}(u, v) = & (1-v)\mathbf{R}_0(u) + v\mathbf{R}_1(u) + (1-u)\mathbf{S}_0(v) + u\mathbf{S}_1(v) - \\ & - (1-v)(1-u)\mathbf{r}_{0,0} - (1-v)u\mathbf{r}_{0,1} - v(1-u)\mathbf{r}_{1,0} - vu\mathbf{r}_{1,1}, \end{aligned} \quad (3.1)$$

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

Наведені точки та криві для різноманітних комп'ютерних пакетів автоматизованого конструювання зручно визначати в декартовій системі координат $Oxyz$. У якості ліній $R_0(u)$, $R_1(u)$, $S_0(v)$, $S_1(v)$ можуть застосовуватися як трансцендентні, так й алгебраїчні криві. Використаємо останні, зокрема у вигляді векторних раціональних ліній другого порядку

$$\mathbf{r}(u) = \frac{(1-u)^2 \mathbf{r}_0 + 2w_1 u(1-u) \mathbf{r}_1 + u^2 \mathbf{r}_2}{(1-u)^2 + 2w_1 u(1-u) + u^2}, \quad (3.2)$$

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

Як видно із заголовка поточного підрозділу дисертації, у даній частині дослідження головним завданням є напрацювання достатньо узагальненої геометричної моделі для забезпечення ефективного формоутворення обраної номенклатури ґрунтообробних знарядь (*полицевих і чизельних*). При цьому як ключові вживаються запропоновані при викладенні способу узагальненого контуру в підпункті 2.2.3.1 прийоми, наприклад, широкого охоплення номенклатури проєктованих виробів, гнучких геометричних перетворень застосовуваних елементів, універсального характеру використовуваного математичного апарату тощо.

Розлоге охоплення номенклатури підтверджується, з одного боку, поданими вище посиланнями на належні множини виконаної в підпункті 2.2.1.2 структурно-параметричної класифікації ґрунтообробних знарядь, а, з іншого, буде надалі продемонстроване в цьому розділі дисертації на конкретних зразках конструкції сільськогосподарської техніки.

Реалізацію гнучкого формоутворення використовуваних елементів покажемо на прикладі ліній (3.2). Необхідними корисними їхніми властивостями є:

- розташування всередині характеристичного трикутника $\mathbf{r}_0 \mathbf{r}_1 \mathbf{r}_2$;
- при змінюванні параметра $u \in [0, 1]$ початок кривої знаходиться в точці \mathbf{r}_0 , а кінець – в точці \mathbf{r}_2 ;
- дотичні в \mathbf{r}_0 та \mathbf{r}_2 визначаються положенням керуючої вершини \mathbf{r}_1 ;
- ваговий коефіцієнт w_1 забезпечує різні види ліній: $w_1=0$ – відрізок прямої; $0 < w_1 < 1$, $w_1=1$, $w_1 > 1$ – відповідно дугу еліпса, параболи, гіперболи. Як бачимо, збільшення w_1 притягує криву до вершини \mathbf{r}_1 характеристичного трикутника;

- можливість відтворення дуги кола з кутовою величиною $0 < \theta < \pi$ значенням $w_1 = \cos(\theta/2)$;
- виродження в точку при $w_1 = 0$ та $\mathbf{r}_0 = \mathbf{r}_2$;
- відсутність у даних ліній перегинів.

Подані властивості стосуються гнучкого створення наведеної геометричної фігури, яка належить до компонента $GC_1 = GCS$ (геометричні способи створення) множини GC , див. вираз (2.16). Коротко проаналізуємо також пристосованість розглянутої кривої до вимог другого компонента $GC_2 = GSM$ (геометричні способи модифікації) зазначеного кортежу. У даному випадку це стосується таких перетворень координат, як рух, симетрія та деформація, див. співвідношення (2.18).

Рух і симетрія у вигляді елементів (2.21), тобто прямолінійного, обертального, складного руху й симетрії, та деформація у вигляді елементів (2.22), тобто зміни розмірів і форми, які можна визначити афінними перетвореннями A , для ліній (3.2) моделюється належними модифікаціями положень їхніх вершин $\mathbf{r}_0, \mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2$.

Для тривимірного простору в декартовій системі $Oxyz$ перетворення A , що опрацьовуються, подаються матрицями розміром 4×4 із застосуванням однорідних координат

$$\mathbf{r}' = \mathbf{r} \cdot A, \quad (3.3)$$

де $\mathbf{r}' = [x' \ y' \ z' \ 1]$, $\mathbf{r} = [x \ y \ z \ 1]$ – відповідно модифіковані та вихідні координати довільної точки.

Конкретними прикладами таких матриць слугують наступні.

Перенесення на вектор $T(Tx, Ty, Tz)$:

$$A = T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ Tx & Ty & Tz & 1 \end{bmatrix}, \quad (3.4)$$

де Tx, Ty, Tz – належні компоненти вздовж осі x, y, z .

Масштабування відносно початку координат:

$$A = S = \begin{bmatrix} S_x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & S_y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & S_z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3.5)$$

де S_x, S_y, S_z – коефіцієнти збільшення відстаней уздовж осі x, y, z .

Поворот відносно початку координат:

$$A = R(\alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad A = R(\beta) = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & -\sin \beta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \beta & 0 & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$A = R(\gamma) = \begin{bmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma & 0 & 0 \\ -\sin \gamma & \cos \gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3.6)$$

де $R(\alpha)$ – на кут α навколо осі x ; $R(\beta)$ – на кут β навколо осі y ; $R(\gamma)$ – на кут γ навколо осі z .

У більш складних випадках перетворень координат (3.3), порівняно з наведеними (3.4) ... (3.6), у проаналізованих матрицях A стає менше нульових елементів.

Згідно з виразом (3.3) для кривої (3.2) маємо

$$\mathbf{r}'(u) = \mathbf{r}(u) \cdot A. \quad (3.7)$$

Співвідношення (3.2) можна записати як

$$\mathbf{r}(u) = \sum_{i=0}^2 a_i \cdot \mathbf{r}_i, \quad (3.8)$$

де

$$a_0(u) = \frac{(1-u)^2}{(1-u)^2 + 2w_1u(1-u) + u^2}, \quad a_1(u) = \frac{2w_1u(1-u)}{(1-u)^2 + 2w_1u(1-u) + u^2},$$

$$a_2(u) = \frac{u^2}{(1-u)^2 + 2w_1u(1-u) + u^2}.$$

Очевидно, що

$$\sum_{i=0}^2 a_i = 1.$$

Підстановкою формули (3.8) до залежності (3.7) отримуємо

$$\begin{aligned} \mathbf{r}'(u) &= \left(\sum_{i=0}^2 a_i \cdot \mathbf{r}_i \right) \cdot A = \sum_{i=0}^2 (a_i \cdot \mathbf{r}_i \cdot A) = \\ &= \frac{(1-u)^2 \mathbf{r}_0 \cdot A + 2w_1 u(1-u) \mathbf{r}_1 \cdot A + u^2 \mathbf{r}_2 \cdot A}{(1-u)^2 + 2w_1 u(1-u) + u^2}. \end{aligned} \quad (3.9)$$

Вираз (3.9) свідчить, що для розглянутих модифікацій, крім операцій над множинами точок відповідно до кортежу (2.23), належні перетворення кривої (3.2) реалізуються відповідними модифікаціями вершин її характеристичного трикутника. Зауважимо, в геометричній моделі, яка аналізується, елементи (2.23) не застосовуються. За потреби перетин ліній (3.2) реалізується заміною їх ламаними за наведеною в підрозділі 2.3 процедурою та подальшим розрахунком точок перетину отриманих відрізків.

Універсальність напрацьованого математичного апарату (3.1) ... (3.9) обумовлена поданими вище його особливостями, які дозволяють гнучко змінювати форму, розміри та положення проєктованих об'єктів достатньо широкої номенклатури ґрунтообробних знарядь.

Також акцентуємо увагу на відкритості для подальших модифікацій побудованої моделі. Тобто, за потреби можна замінити обмежуючі лінії контуру на інші. Зокрема, це стосується й запропонованих кривих Безьє (2.74) зі степеневою параметризацією. Тоді, наприклад, див. рис. 3.1, у показаній нижній частині з прямолінійним відрізком $\mathbf{R}_0(u)$ завдяки зазначеним лініям $S_0(v)$ та $S_1(v)$ реалізується неперервність кривини з певною необхідною плоскою ділянкою.

На підставі способу узагальненого контуру, див. пункт 2.2.3.1 дисертації, можливості геометричної моделі, яка розглядається, розширюються наступним чином.

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

$$УК = (УК_i)_{i=1}^{N_{УК}} = (УК_i)_{i=1}^2, \quad (3.10)$$

де $УК_1=K2П$ – крива другого порядку (3.2), $УК_2=КБС$ – крива Безьє зі степеневою параметризацією (2.74).

На основі виразу (3.10) створюємо множину контурів моделі

$$KM = (KM_j)_{j=1}^{N_{KM}} = (KM_j)_{j=1}^2, \quad (3.11)$$

де

$$\begin{aligned} KM_1 &= (KM_{1_k})_{k=1}^{N_{KM1}} = (KM_{1_k})_{k=1}^4 = (УК_{1_k})_{k=1}^4 = \\ &= (K2П, K2П, K2П, K2П), \end{aligned} \quad (3.12)$$

$$\begin{aligned} KM_2 &= (KM_{2_k})_{k=1}^{N_{KM2}} = (KM_{2_k})_{k=1}^4 = (УК_{1_1}, УК_{1_2}, УК_{2_1}, УК_{2_2}) = \\ &= (K2П, K2П, КБС, КБС). \end{aligned} \quad (3.13)$$

Зауважимо, що в кортежах (3.12) і (3.13) використовувані лінії подаються в наступній послідовності, див. рис. 3.1: спочатку крива, що виходить із точки $\mathbf{r}_{0,0}$ і залежить від u ; потім інша лінія цього ж параметра; далі крива, яка починається у вершині $\mathbf{r}_{0,0}$ і є функцією від v ; нарешті інша лінія даного параметра. Отже для контуру KM_1 усі чотири його складові криві (3.2). Обвід KM_2 містить дві такі ж лінії та дві криві Безьє (2.74) зі степеневою параметризацією.

Покажемо, що в разі необхідності афінних перетворень A фігур (2.74) це здійснюється відповідними модифікаціями радіус-векторів їхніх вершин характеристичних ламаних. Спираючись на залежність (3.3), для вказаних кривих отримуємо

$$\mathbf{r}'(u) = \mathbf{r}(u) \cdot A, \quad (3.14)$$

де

$$\mathbf{r}(u) = \sum_{i=0}^2 a_i \cdot \mathbf{r}_i, \quad (3.15)$$

$$a_0(u) = (1 - u^{m_1})(1 - u), \quad a_1(u) = (1 - u)u^{m_1} + u(1 - u^{m_2}), \quad a_2(u) = u^{m_2+1}. \quad (3.16)$$

Підстановкою виразу (3.15) до формули (3.14) із використанням співвідношень (3.16) одержуємо

$$\begin{aligned} \mathbf{r}'(u) &= \left(\sum_{i=0}^2 a_i \cdot \mathbf{r}_i \right) \cdot A = \sum_{i=0}^2 (a_i \cdot \mathbf{r}_i \cdot A) = \\ &= a_0(u) \cdot \mathbf{r}_0 \cdot A + a_1(u) \cdot \mathbf{r}_1 \cdot A + a_2(u) \cdot \mathbf{r}_2 \cdot A = \\ &= ((1 - u^{m_1})(1 - u)) \cdot \mathbf{r}_0 \cdot A + ((1 - u)u^{m_1} + u(1 - u^{m_2})) \cdot \mathbf{r}_1 \cdot A + u^{m_2+1} \cdot \mathbf{r}_2 \cdot A = \\ &= ((1 - u^{m_1}) \cdot \mathbf{r}_0 \cdot A + u^{m_1} \cdot \mathbf{r}_1 \cdot A) \cdot (1 - u) + u \cdot ((1 - u^{m_2}) \cdot \mathbf{r}_1 \cdot A + u^{m_2} \cdot \mathbf{r}_2 \cdot A). \quad (3.17) \end{aligned}$$

Залежність (3.17) показує, що для зазначених афінних модифікацій A кривої (2.74) відповідні перетворення здійснюються над вершинами її характеристичного трикутника.

Таким чином, вирази (3.10) ... (3.17) засвідчують відкритість, тобто пристосованість до внесення потрібних змін, запропонованої узагальненої геометричної моделі для формоутворення таких ґрунтообробних знарядь, як полицеві та чизельні.

Подамо в наступному підрозділі дисертації на основі напрацьованих теоретичних матеріалів безпосереднє комп'ютерне варіантне геометричне формоутворення відвалів плугів.

3.2. Плуги

Одна з головних задач виконаних наукових розвідок полягає у створенні гнучких, продуктивних та універсальних засобів для автоматизованого формоутворення ґрунтообробних знарядь. Необхідну для цього ефективність геометричного моделювання досягнуто шляхом використання запропонованого спеціального математичного апарату, що пристосований для використання в середовищі нинішніх комп'ютерних інформаційних систем інженерного профілю. Реалізацію здійснено на основі популярних нині в CAD/CAM/CAE системах параметричних ліній у вигляді NURBS. Як буде показано далі, ці

геометричні моделі характеризуються охопленням достатньо великої номенклатури ґрунтообробних знарядь, зокрема відвалів плугів. Зазначені засоби формоутворення здатні зручно адаптуватися до змінюваних умов проектування сільськогосподарської техніки, що висуваються як теоретичними розрахунками, так і практичними експериментами. Наведені факти сприяють багатогранному уточненню вказаної інформації, забезпечують її відповідну інтеграцію, можливість визначення серед досліджуваних різновидів відвалів плугів найбільш раціональних варіантів. При цьому розглянуто найпоширенішу групу відвалів із циліндроїдальними та іншими робочими поверхнями. Підкреслено особливу роль геометричних моделей для якісного узгодження й ефективного поєднання поміж собою значного числа інших моделей, зокрема, міцності, технології виготовлення, експлуатації тощо. Акцентовані особливості спрямовані на проведення комплексної оптимізації, в даному випадку плугів, протягом усього їхнього життєвого циклу. Розв'язання поданої задачі сприяє успішному вирішенню актуальної науково-прикладної проблеми підвищення якості сільськогосподарської техніки.

3.2.1. Розробляння теоретичних поверхонь

На початку виконаємо короткий огляд деяких літературних джерел, що безпосередньо стосуються зазначеної в заголовку тематики.

У працях [304, 326, 339] експериментально досліджується вплив різних типів відвальних плугів на фізичні властивості ґрунту при кількох станах його вологості, глибинах обробітку, швидкостях руху та величинах сили тяги трактора. Отримані результати підтвердили суттєву роль указаних факторів на такі одержані після обробітку фізичні властивості ґрунту, як його пористість та коефіцієнт подрібнення. Стосовно геометрії плугів наголошено важливість їхніх габаритів, кутів встановлення відносно напрямку руху, форми робочих поверхонь. Але відсутній аналіз та наукові узагальнення щодо впливу змінювання зазначених геометричних параметрів на обробіток ґрунту. Подана інформація засвідчує також велике число можливих комбінацій наявних умов

експлуатації відвальних плугів. Для їхнього належного врахування необхідні спеціалізовані комп'ютерні засоби, основою яких може слугувати методологія структурно-параметричного моделювання та оптимізації. Деякі відповідні практичні приклади містяться в п'ятому розділі дисертації.

У публікації [351] для відвала плуга розглядається теоретична геометрична модель робочої поверхні, яка розгортається та визначається двома напрямними кривими. При цьому викладено математичний апарат для необхідних побудов. Зазначено, що наведена поверхня успішно використана в конструкції плуга загального призначення. Однак питання її *вільного деформування* (free-form deformation) із метою адаптування до різноманітних вимог теоретичних розрахунків, умов проведення натурних або комп'ютерних експериментів не аналізуються. Це стосується процесів конструювання, технології виробництва, експлуатації тощо. Зокрема, таких властивостей, як міцність, собівартість виготовлення, продуктивність та економічність функціонування, надійність, ресурс і т. д. Окреслена прогресивна сучасна методологія доволі розповсюджена в інших галузях життєдіяльності, див. для прикладу видання [321, 327, 356, 357, 369] та ін. Отже, акцентовані завдання становлять актуальний новий напрямок для здійснення геометричних наукових досліджень у сфері сільськогосподарського машинобудування.

Поданий далі підхід до комп'ютерного варіантного формоутворення поверхонь відвалів плугів спирається на попередньо викладені матеріали. Стосується аргументованої в першому розділі дисертації перспективності автоматизованого проєктування для покращення якості ґрунтообробних знарядь, провідної ролі в зазначених процесах геометричного моделювання, визначених для цього необхідних вимог. Наприклад, щодо забезпечення відповідними моделями потрібної точності побудов, їхньої варіантної гнучкості, продуктивності, універсальності, передбачуваності та керованості. З метою успішної практичної реалізації вказаного у другому розділі дисертації напрацьовано потрібні теоретичні засади, на основі надалі сформовано належну узагальнену геометричну модель.

Як зазначалось у підрозділі 1.2, для відвалів плугів найпоширенішими робочими поверхнями є лінійчасті з *площиною паралелізму*, паралельно якій розташовуються всі прямолінійні твірні. Це стосується *циліндроїдальних* і *коноїдальних поверхонь*, *гіперболічних параболоїдів (косих площин)* та ін.

Циліндроїдальними вважатимемо лінійчасті поверхні з площиною паралелізму, яка має дві довільні криволінійні напрямні. Конкретним їхнім різновидом є *циліндричні поверхні*, що утворюються рухом прямолінійної твірної по двох напрямних, які збігаються при певному паралельному перенесенні однієї в іншу.

Коноїдальні поверхні формуються з циліндроїдальних, коли одна з напрямних стає прямою.

Гіперболічний параболоїд (косу площину) одержуємо з циліндроїдальної поверхні у випадку двох мимобіжних прямолінійних напрямних.

Відомо, що криві поверхні є *розгортними*, коли їхні суміжні прямолінійні твірні паралельні, перетинаються або дотичні до деякої просторової лінії. Такі поверхні за допомогою згинання суміщаються з площиною. Серед наведених вище розгортні тільки циліндричні поверхні.

Проілюструємо як за допомогою певних обмежень з узагальненої геометричної моделі підрозділу 3.1 можна отримати пристосовані для побудови зазначених вище популярних для формоутворення відвалів плугів циліндричні й коноїдальні поверхні та гіперболічні параболоїди. Акцентуємо, що всіх їх можна розглядати як різновиди циліндроїдальних поверхонь.

Будемо використовувати контур KM_1 моделі, який складається, див. множини (3.12), із кривих другого порядку (3.2). Для центральних характеристичних точок та їхніх вагових коефіцієнтів ліній $R_0(u)$, $R_1(u)$, $S_0(v)$, $S_1(v)$, див. рис. 3.1, вживатимемо відповідно позначення (P_1, w_1) , (P_2, w_2) , (P_3, w_3) та (P_4, w_4) .

Визначимо умови, які забезпечують побудову циліндроїдальних поверхонь математичним апаратом, поданим у підрозділі 3.1 дисертації.

Нехай (рис. 3.2) потрібно створити належну поверхню.

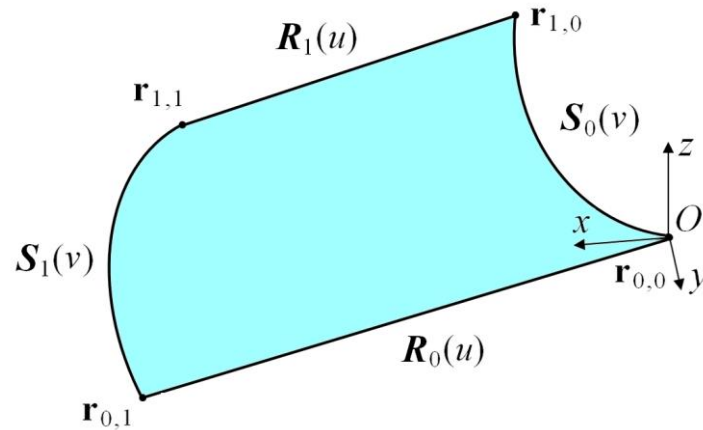


Рис. 3.2. Схема побудови циліндроїдальної поверхні

У прямокутній декартовій системі координат $Oxyz$ оберемо Oxy площиною паралелізму. Зауважимо, що наведені подальші міркування застосовуються за аналогією у випадках й іншої площини.

Як криволінійні напрямні візьмемо

$$\begin{aligned} S_0(v) &= \frac{(1-v)^2 \mathbf{r}_{0,0} + 2w_3 v(1-v) \mathbf{P}_3 + v^2 \mathbf{r}_{1,0}}{(1-v)^2 + 2w_3 v(1-v) + v^2}, \\ S_1(v) &= \frac{(1-v)^2 \mathbf{r}_{0,1} + 2w_4 v(1-v) \mathbf{P}_4 + v^2 \mathbf{r}_{1,1}}{(1-v)^2 + 2w_4 v(1-v) + v^2}, \end{aligned} \quad (3.18)$$

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 (3.18) необхідно мати

$$z_{0,1} = z_{0,0}; \quad z_{1,1} = z_{1,0}, \quad (3.19)$$

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

$$\mathbf{R}(u, v) = (1-u)S_0(v) + uS_1(v). \quad (3.20)$$

Зі співвідношень (3.18) та (3.20) видно, що для паралельності твірних площині Oxy треба забезпечити

$$\frac{(1-v)^2 z_{0,0} + 2w_3 v(1-v)z_{P_3} + v^2 z_{1,0}}{(1-v)^2 + 2w_3 v(1-v) + v^2} = \frac{(1-v)^2 z_{0,1} + 2w_4 v(1-v)z_{P_4} + v^2 z_{1,1}}{(1-v)^2 + 2w_4 v(1-v) + v^2}, \quad (3.21)$$

де z_{P_3}, z_{P_4} – аплікати відповідно точок P_3, P_4 .

На основі виразів (3.19) і (3.21) остаточною умовою для реалізації циліндроїдальної поверхні у вигляді формули (3.1) є

$$z_{0,1} = z_{0,0}; \quad z_{1,1} = z_{1,0}; \quad z_{P_4} = z_{P_3}; \quad w_4 = w_3. \quad (3.22)$$

Визначимо тут також подібні до (3.22) обмеження, які забезпечують побудову циліндроїдальних поверхонь у випадку кривих Безьє (2.74) зі степеневою параметризацією та контуром моделі (3.13).

У даному разі маємо

$$\begin{aligned} S_0(v) &= ((1 - v^{m_{13}}) \mathbf{r}_{0,0} + v^{m_{13}} \mathbf{P}_3)(1 - v) + v((1 - v^{m_{23}}) \mathbf{P}_3 + v^{m_{23}} \mathbf{r}_{1,0}), \\ S_1(v) &= ((1 - v^{m_{14}}) \mathbf{r}_{0,1} + v^{m_{14}} \mathbf{P}_4)(1 - v) + v((1 - v^{m_{24}}) \mathbf{P}_4 + v^{m_{24}} \mathbf{r}_{1,1}), \end{aligned} \quad (3.23)$$

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 залежностях (3.23) необхідно реалізувати

$$z_{0,1} = z_{0,0}; \quad z_{1,1} = z_{1,0}, \quad (3.24)$$

що визначається початковими та кінцевими умовами формування циліндроїдальної поверхні, рівняння якої теж

$$\mathbf{R}(u, v) = (1 - u)S_0(v) + uS_1(v). \quad (3.25)$$

Із виразів (3.23) і (3.25) видно, що для паралельності твірних площині Oxy треба мати

$$\begin{aligned} &(1 - v^{m_{13}})(1 - v)z_{0,0} + ((1 - v)v^{m_{13}} + v(1 - v^{m_{23}}))z_{P_3} + v^{m_{23}+1}z_{1,0} = \\ &= (1 - v^{m_{14}})(1 - v)z_{0,1} + ((1 - v)v^{m_{14}} + v(1 - v^{m_{24}}))z_{P_4} + v^{m_{24}+1}z_{1,1}, \end{aligned} \quad (3.26)$$

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

Спираючись на співвідношення (3.24) та (3.26), результуючими обмеженнями для дефініції циліндроїдальної поверхні з використанням формули (2.74) є

$$z_{0,1} = z_{0,0}; \quad z_{1,1} = z_{1,0}; \quad z_{P_4} = z_{P_3}; \quad m_{14} = m_{13}; \quad m_{24} = m_{23}. \quad (3.27)$$

Як бачимо, умови (3.22) і (3.27) тільки обмежують суттєво більші можливості варіантного геометричного моделювання за допомогою поданих вище загальних математичних засобів.

Перш ніж навести конкретні приклади комп'ютерного формоутворення акцентуємо увагу на деяких перевагах запропонованого підходу стосовно його універсальності, гнучкості, передбачуваності та керованості. З рис. 3.1, 3.2 та викладених вище математичних залежностей видно, що за допомогою вершин $\mathbf{r}_{0,0}$, $\mathbf{r}_{0,1}$, $\mathbf{r}_{1,0}$, $\mathbf{r}_{1,1}$, керуючих точок P_1 , P_2 , P_3 , P_4 та вагових коефіцієнтів w_1 , w_2 , w_3 , w_4 достатньо просто і прогнозовано визначаються потрібні габарити відвалів плугів, їхні контури, кути нахилу робочих знарядь, динаміка належного змінювання вказаних величин і т. д. Доволі легко вносяться також необхідні коригування.

Циліндричні поверхні

На рис. 3.3 ... 3.5 показано деякі варіанти теоретичних циліндричних поверхонь відвалів плугів, які побудовані на засадах узагальненої геометричної моделі, що розглядається, з використанням певних обмежень.

Зазначені фігури мають наступні параметри в міліметрах: $\mathbf{r}_{0,0}=(0; 0; 0)$, $\mathbf{r}_{0,1}=(1000; 750; 0)$, $\mathbf{r}_{1,0}=(100; 0; 400)$, $\mathbf{r}_{1,1}=(1100; 750; 400)$, $P_1=(500; 200; 0)$, $P_2=(500; 200; 400)$, $P_3=(200; 0; 100)$, $P_4=(1200; 750; 100)$ та $w_1=w_2=0$. Для параболічної, еліптичної та гіперболічної циліндричних поверхонь застосовано відповідно вагові коефіцієнти $w_3=w_4=1$; $w_3=w_4=0,9$; $w_3=w_4=1,2$. Зауважимо, що для визначення циліндричних поверхонь дотримано можливість суміщення напрямної $S_0(v)$ з кривою $S_1(v)$ завдяки вектору $(1000; 750; 0)$.

Комп'ютерна програма для проаналізованого формоутворення в системі математичних обчислень Maple подана в пункті А.2.1 додатків.

З наведених зображень зрозуміле визначення габаритів відвалу, його зовнішнього теоретичного контуру, кутів розпушення α , обертання β та зсуву γ

грунту. Бачимо, що порівняно з параболічною поверхнею еліптична менш зігнута, а гіперболічна – навпаки.

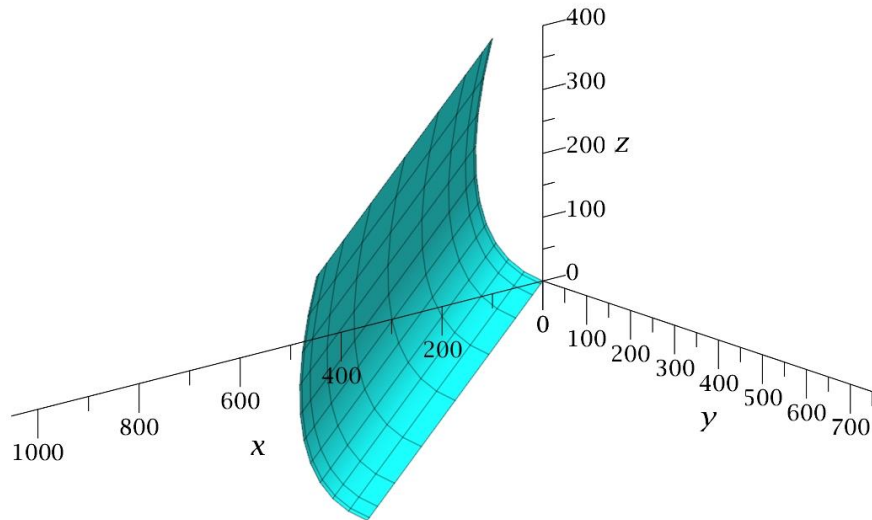


Рис. 3.3. Параболічна циліндрична поверхня

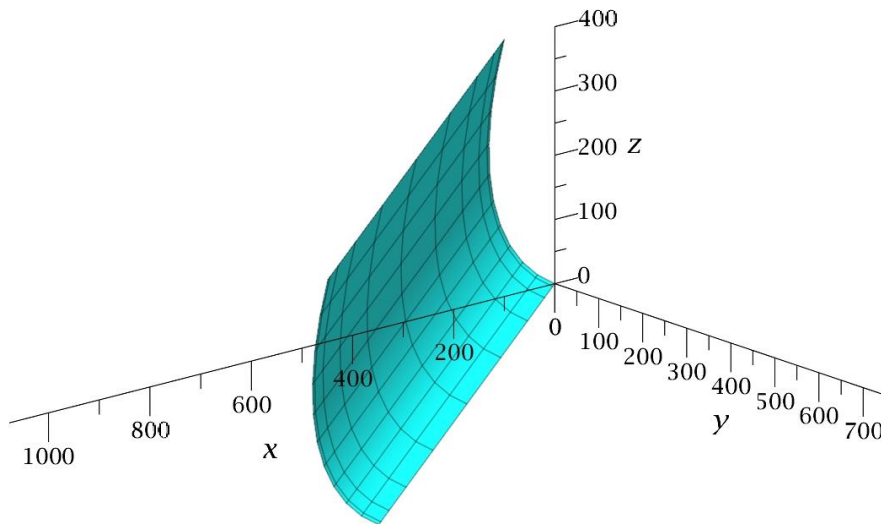


Рис. 3.4. Еліптична циліндрична поверхня

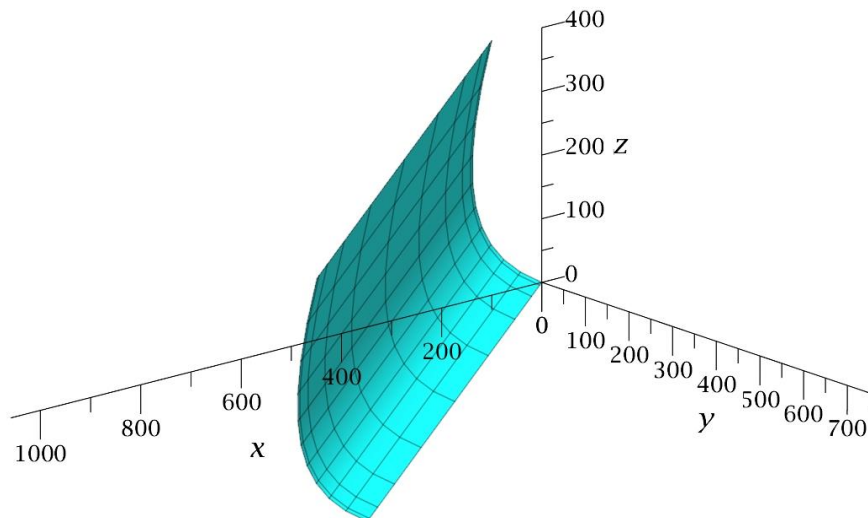


Рис. 3.5. Гіперболічна циліндрична поверхня

Викладені побудови гнучкі, універсальні, керовані, пристосовані до продуктивної реалізації в середовищі сучасних CAD/CAM/CAE систем. Дана модель надає також різноманітну інформацію щодо метричних (довжин, площ, кутів), позиційних (координат точок) та інших геометричних властивостей. Наступний пункт дисертації містить деякі відповідні відомості, важливі для сільськогосподарського обробітку ґрунту. Продемонструємо далі формування за допомогою напрацьованої узагальненої моделі циліндроїдальних теоретичних поверхонь відвалів плугів.

Циліндроїдальні поверхні

Покажемо як розглянуті вище поверхні перетворюються в циліндроїдальні. Рис. 3.6 відповідає модифікації $\mathbf{r}_{1,1}=(1100; 850; 400)$, а рис. 3.7 – $\mathbf{r}_{1,0}=(100; 0; 350)$, $\mathbf{r}_{1,1}=(1100; 750; 350)$, $\mathbf{P}_4=(1200; 650; 100)$ параболічного варіанта.

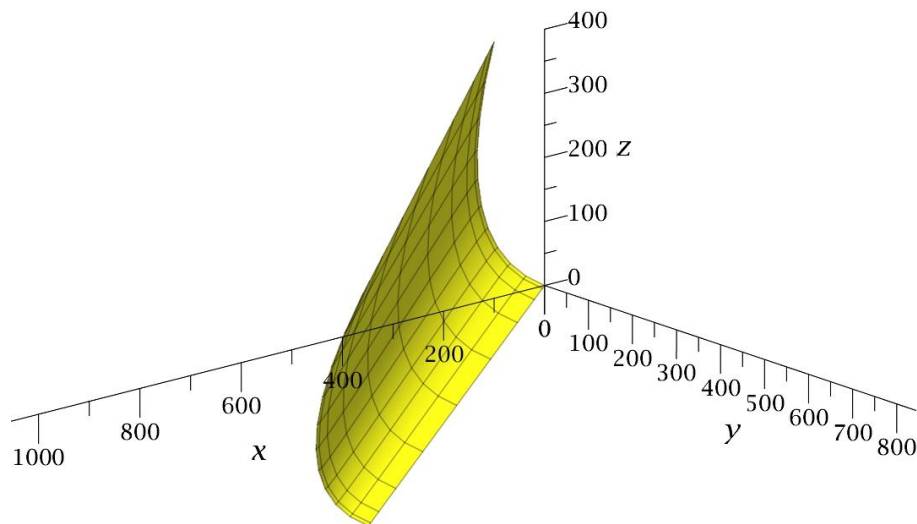


Рис. 3.6. Циліндроїдальна поверхня на основі рис. 3.3

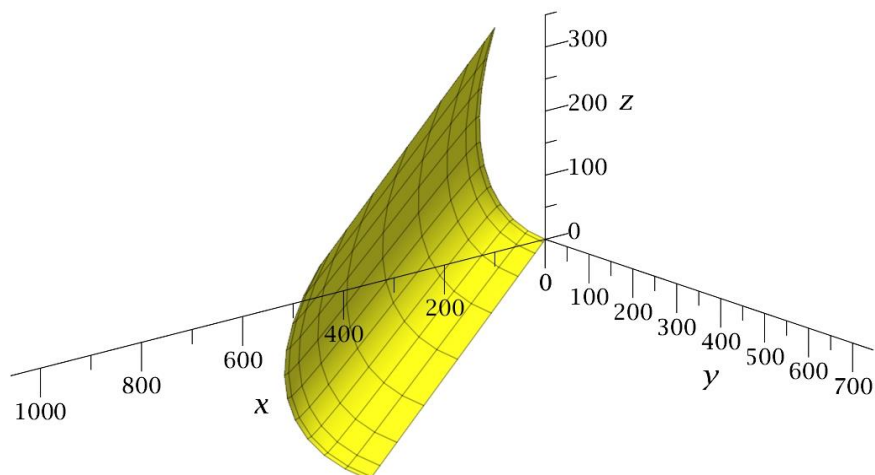


Рис. 3.7. Циліндроїдальна поверхня на основі рис. 3.4

Для першої це стосується змінювання вершини $\mathbf{r}_{1,1}$, яку перенесено на 100 мм уздовж осі y , чим виконано необхідне скручування теоретичної поверхні відвала навколо осі x , тобто збільшено кут β обертання ґрунту. У другому випадку зменшено на 50 мм координати z вершин $\mathbf{r}_{1,0}$ і $\mathbf{r}_{1,1}$. У такий спосіб відкореговано потрібним чином висоту відвала. Переміщення точки P_4 на 100 мм проти напрямку осі y сприяє згинанню кінцевої частини даної теоретичної поверхні.

Наведені два рисунки та коментарі до них забезпечують базові уявлення про керування формоутворенням відвалів плугів за допомогою напрацьованої загальної геометричної моделі. Проілюструємо це ще також на приладі коноїдальних поверхонь, див. рис. 1.6, б.

Коніодальні поверхні

Зазначені фігури обмежено розповсюджені на практиці для відвалів плугів. Шляхом застосування запропонованої загальної геометричної моделі можна гнучко визначати форму та розміри зовнішнього контуру вказаних поверхонь. Але умови (3.22) забезпечення паралельності твірних площині Oxy точно не виконуються, оскільки, наприклад, для однієї напрямної цієї фігури треба мати $w_3 \neq 0$ (крива), а для іншої (пряма) – $w_4 = 0$. На рис. 3.8 представлено поверхню, отриману для величин: $\mathbf{r}_{0,0} = (0; 0; 0)$, $\mathbf{r}_{0,1} = (1100; 750; 0)$, $\mathbf{r}_{1,0} = (200; 0; 350)$, $\mathbf{r}_{1,1} = (1100; 750; 350)$, $P_1 = (500; 200; 0)$, $P_2 = (500; 200; 350)$, $P_3 = (200; 0; 0)$, $P_4 = (1200; 750; 100)$, $w_1 = w_2 = w_4 = 0$, $w_3 = 0,2$.

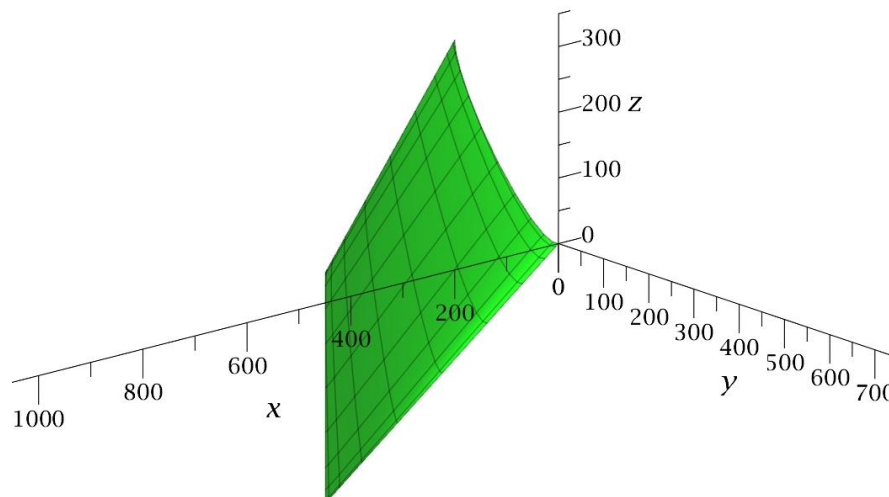


Рис. 3.8. Квазіконоїдальна поверхня 1

Як видно зі співвідношення (3.21), при $z_{P_3}=0$ та достатньо малому w_3 вказане рівняння наближається до істини. Про це свідчить, зокрема, зображення нижче.

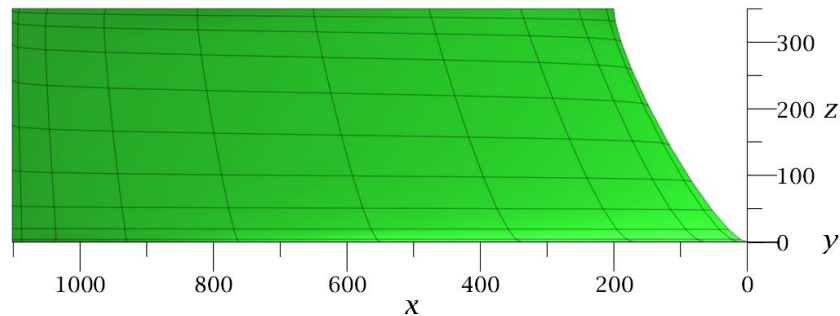


Рис. 3.9. Інший ракурс поверхні 1

У даному разі останнє досягнуто за рахунок вагового коефіцієнта $w_3=0,2$. За потреби більшої кривини вказаної лінії використовуватимемо два наступні прийоми геометричного моделювання. Перший полягає в тому, що на зазначену кривину впливає не тільки w_3 , а й розташування відповідної керуючої вершини P_3 . Другий зводиться до застосування лише потрібного фрагмента параметричної поверхні. У нашому випадку верхня та задня частина теоретичної поверхні відвалу надалі, під час конструювання, обрізується належним чином, а до її нижньої кріпиться леміш. Також, з експлуатаційних вимог, відвал поділяється на груди та крило, див. рис. 2.3.

На рис. 3.10 подано побудований на основі наведених міркувань інший варіант проєктованої квазіконоїдальної поверхні. Це забезпечено величинами: $\mathbf{r}_{0,0}=(0; 0; 0)$, $\mathbf{r}_{0,1}=(1100; 750; 0)$, $\mathbf{r}_{1,0}=(200; 0; 350)$, $\mathbf{r}_{1,1}=(1100; 750; 350)$, $\mathbf{P}_1=(500; 200; 0)$, $\mathbf{P}_2=(500; 200; 350)$, $\mathbf{P}_3=(700; 0; 0)$, $\mathbf{P}_4=(1200; 750; 100)$, $w_1=w_2=w_4=0$, $w_3=0,2$. Для параметра ν проміжок $[0; 1]$ змінено на $[0; 0,8]$.

Конкретні відхилення твірних ліній квазіконоїдальних поверхонь від площини паралелелізму потребують свого опрацювання. Через існуючу обмеженість вжитку проаналізованих поверхонь для створення відвалів плугів та достатньо задовільну для практики точність розглянутих вище побудов зазначене питання в дисертації не досліджувалось. Це може становити предмет подальших наукових розвідок.

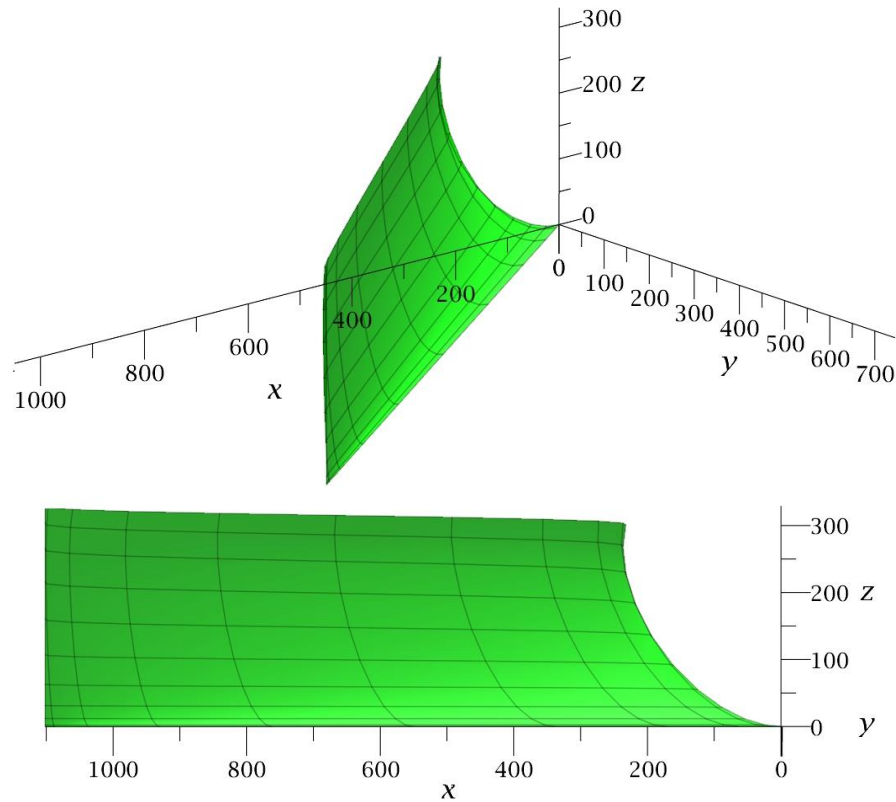


Рис. 3.10. Квазіконоїдальна поверхня 2

Викладемо далі матеріали стосовно створення поверхонь гіперболічного параболоїда, див. рис. 1.6, *в* та рис. 1.6, *г*, за допомогою запропонованої узагальненої геометричної моделі для побудови відвалів плугів.

Поверхні гіперболічних параболоїдів

Рис. 3.11 ілюструє визначену за даними переднього зображення косу площину. Відмінність полягає тільки в застосуванні $P_3=(700; 0; 100)$, $w_3=0$ та проміжку $[0; 1]$ для параметра v .

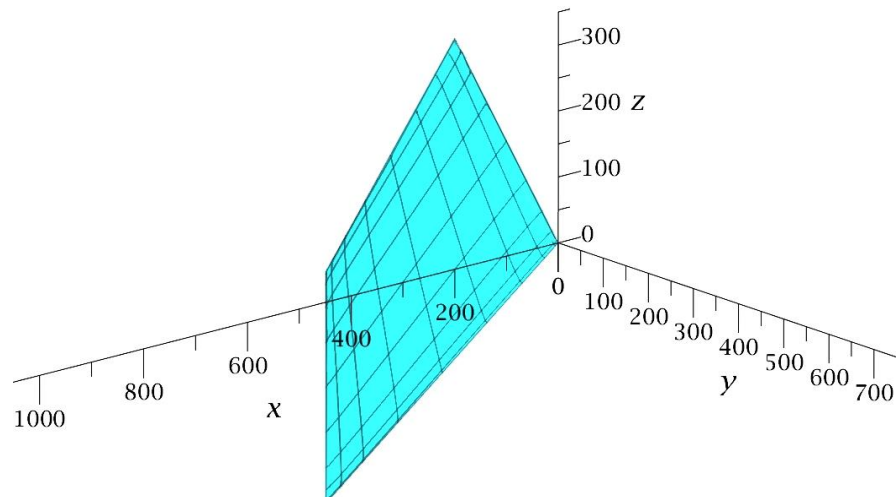


Рис. 3.11. Гіперболічний параболоїд із горизонтальними твірними

Відповідну програму для комп'ютерного пакета Maple містить приклад А.8 додатків. З нього видно, що вживаний математичний апарат залишається сталим, а змінюються тільки вихідні дані, які визначають конкретний геометричний об'єкт.

Стосовно гіперболічних параболоїдів із вертикальною площиною паралелізму, див. рис. 1.6, z , то в нашому випадку (рис. 3.12) це відповідає розташуванню твірних у площинах, перпендикулярних до осі x . При цьому всі лінії $R_0(u)$, $R_1(u)$, $S_0(v)$, $S_1(v)$ є відрізками прямих. Рівняння косої площини має вигляд

$$R(u, v) = (1 - v)R_0(u) + vR_1(u). \quad (3.28)$$

Оскільки

$$\begin{aligned} R_0(u) &= \frac{(1-u)^2 \mathbf{r}_{0,0} + 2w_1 u(1-u)P_1 + u^2 \mathbf{r}_{0,1}}{(1-u)^2 + 2w_1 u(1-u) + u^2}, \\ R_1(u) &= \frac{(1-u)^2 \mathbf{r}_{1,0} + 2w_2 u(1-u)P_2 + u^2 \mathbf{r}_{1,1}}{(1-u)^2 + 2w_2 u(1-u) + u^2}, \end{aligned} \quad (3.29)$$

де $\mathbf{r}_{0,0}=(x_{0,0}; y_{0,0}; z_{0,0})$, $\mathbf{r}_{0,1}=(x_{0,1}; y_{0,1}; z_{0,1})$, $\mathbf{r}_{1,0}=(x_{1,0}; y_{1,0}; z_{1,0})$, $\mathbf{r}_{1,1}=(x_{1,1}; y_{1,1}; z_{1,1})$, то в залежностях (3.29) необхідно мати

$$x_{1,0} = x_{0,0}; \quad x_{1,1} = x_{0,1}, \quad (3.30)$$

що впливає з початкових і кінцевих умов побудови поверхні.

З формул (3.28) і (3.29) видно, що для паралельності твірних площині Ouz треба забезпечити

$$\frac{(1-u)^2 x_{0,0} + 2w_1 u(1-u)x_{P_1} + u^2 x_{0,1}}{(1-u)^2 + 2w_1 u(1-u) + u^2} = \frac{(1-u)^2 x_{1,0} + 2w_2 v(1-u)x_{P_2} + u^2 x_{1,1}}{(1-u)^2 + 2w_2 u(1-u) + u^2}, \quad (3.31)$$

де x_{P_1} , x_{P_2} – абсциси відповідно точок P_1 , P_2 .

Через те, що в даному разі $w_1=w_2=0$, то загальна вимога (3.31) зводиться до виразу (3.30).

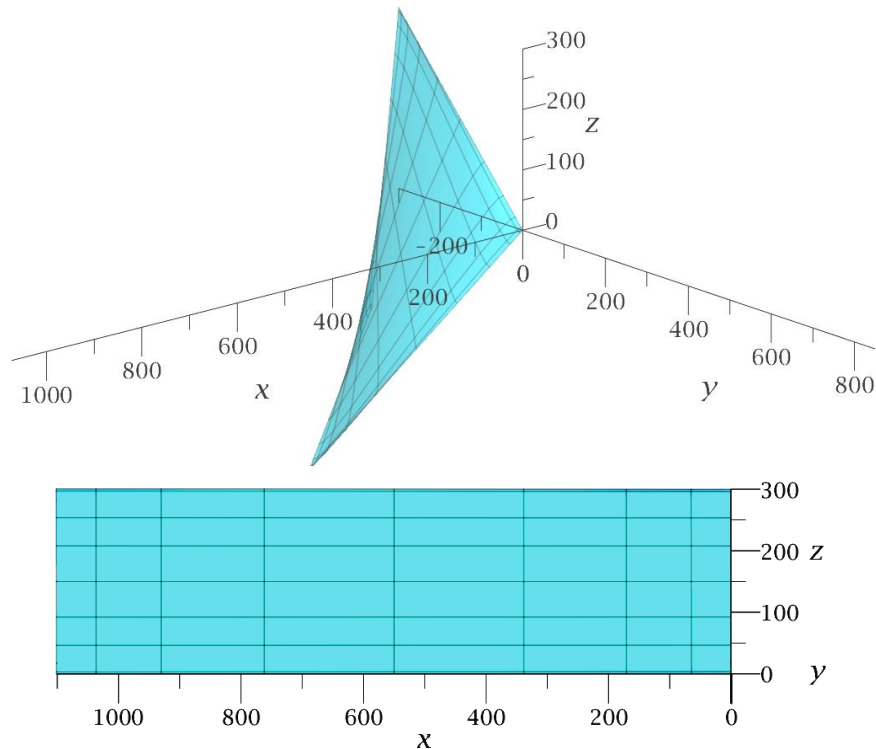


Рис. 3.12. Гіперболічний параболоїд із твірними у вертикальній площині

Проаналізуємо далі моделювання для відвалів плугів гелікоїдальних поверхонь типу показаних на рис. 1.6, д.

Гелікоїдальні поверхні

Зауважимо, що дані фігури схожі на попередньо розглянуті, тобто мають твірні, які розташовані у вертикальних площинах, перпендикулярних до осі x . Але напрямними є не відрізки прямих, а криві лінії. Це забезпечує більший діапазон змінювання кута β обертання ґрунту.

Тепер із рівняння (3.31) витікає вимога

$$x_{1,0} = x_{0,0}; x_{1,1} = x_{0,1}; x_{P_2} = x_{P_1}; w_2 = w_1. \quad (3.32)$$

Побудовану згідно з обмеженнями (3.32) поверхню зображено на рис. 3.13. При цьому використано величини: $\mathbf{r}_{0,0}=(0; 0; 0)$, $\mathbf{r}_{0,1}=(1100; 600; 0)$, $\mathbf{r}_{1,0}=(0; -300; 300)$, $\mathbf{r}_{1,1}=(1100; 900; 300)$, $\mathbf{P}_1=(500; 200; 0)$, $\mathbf{P}_2=(500; 200; 300)$, $\mathbf{P}_3=(0; 0; 0)$, $\mathbf{P}_4=(0; 0; 0)$, $w_1=w_2=1$, $w_3=w_4=0$, $u \in [0; 1]$, $v \in [0; 1]$. Зауважимо, що оскільки третій та четвертий вагові коефіцієнти дорівнюють нулю, то вплив належних керуючих точок відповідний. Тому їхні координати можна обирати довільно.

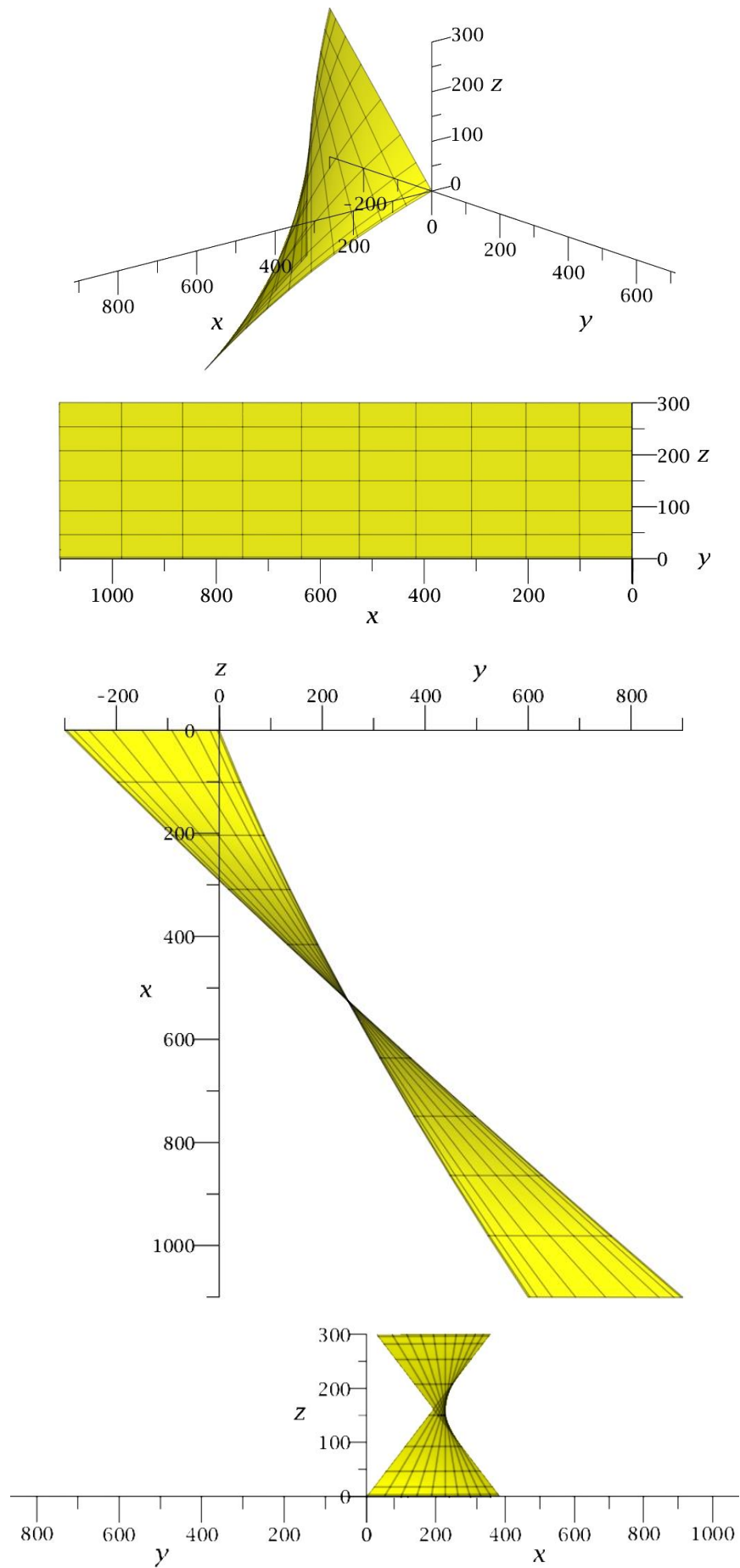


Рис. 3.13. Приклад гелікоїдальної поверхні

Отже, в поточній частині дисертації нами викладено питання стосовно побудови різноманітних популярних теоретичних поверхонь відвалів плугів із використанням запропонованої узагальненої моделі формоутворення, яка орієнована на широке застосування в середовищі сучасних CAD/CAM/CAE систем. Наступний пункт праці присвячено дослідженню певних важливих для обробітку ґрунту геометричних властивостей зазначених фігур.

3.2.2. Аналіз поверхонь

Відомо, що для складних геометричних об'єктів багато метричних характеристик, зокрема, довжини, площі і т. д. розраховуються із застосуванням обчислювальних методів. При цьому лінії замінюються ламаними, поверхні – множинами дрібних трикутників тощо. Як показав виконаний у першій частині дисертації аналіз формоутворення ґрунтообробних знарядь, див. підрозділ 1.2, особливо актуальним для досягнення необхідних агротехнічних показників є дотримання потрібного змінювання кутів розпушення α , обертання β та зсуву γ ґрунту для проєктованих робочих поверхонь відвалів плугів. Окресленій задачі присвячено цей пункт дослідження. Зауважимо, що результати розрахунків надалі наводяться з певною точністю.

Циліндричні поверхні

Змінювання кута γ зсуву ґрунту для зображених на рис. 3.3 ... 3.5 теоретичних поверхонь відвалів плугів доволі прогнозоване, оскільки зазначена величина є сталою. Це підтверджує розроблена комп'ютерна програма для пакета Maple, див. приклад А.9 додатків. У даному випадку $\gamma \approx 37^\circ$. Рис. 3.14 демонструє цей кут у залежності від висоти підйому вздовж осі z . Наведене програмне забезпечення дозволяє варіювати кількість досліджуваних ділянок n , одержувати аналітичний апроксимаційний вираз для подальшого використання суміжними з геометрією дисциплінами.

Кут γ_i поточної i -ї ($1 \leq i \leq n$) твірної розраховується як

$$\gamma_i = \arctg\left(\frac{|y_{2i} - y_{1i}|}{|x_{2i} - x_{1i}|}\right) \cdot 180/\pi^\circ, \quad (3.33)$$

де $(x_{1i}, y_{1i}), (x_{2i}, y_{2i})$ – абсциси та ординати початку й кінця поточної i -ї твірної.

Правильність формули (3.33) підтверджує рис. 3.14.

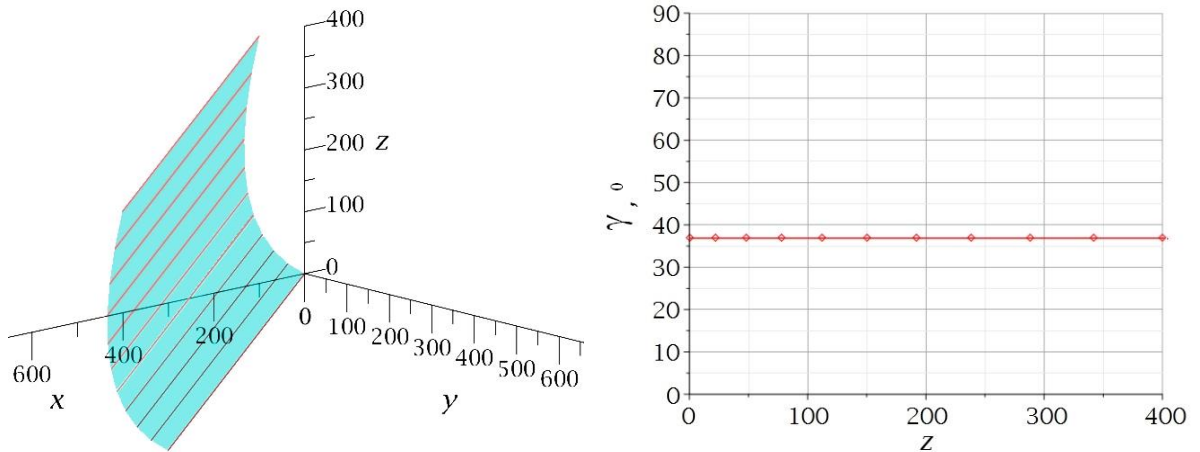


Рис. 3.14. Кут γ зсуву ґрунту для поверхні рис. 3.3

Змінювання кута β обертання ґрунту при підйомі вздовж осі z у перерізі площиною $x=500$ мм параболічної циліндричної поверхні, показаної на рис. 3.3, ілюструє рис. 3.15.

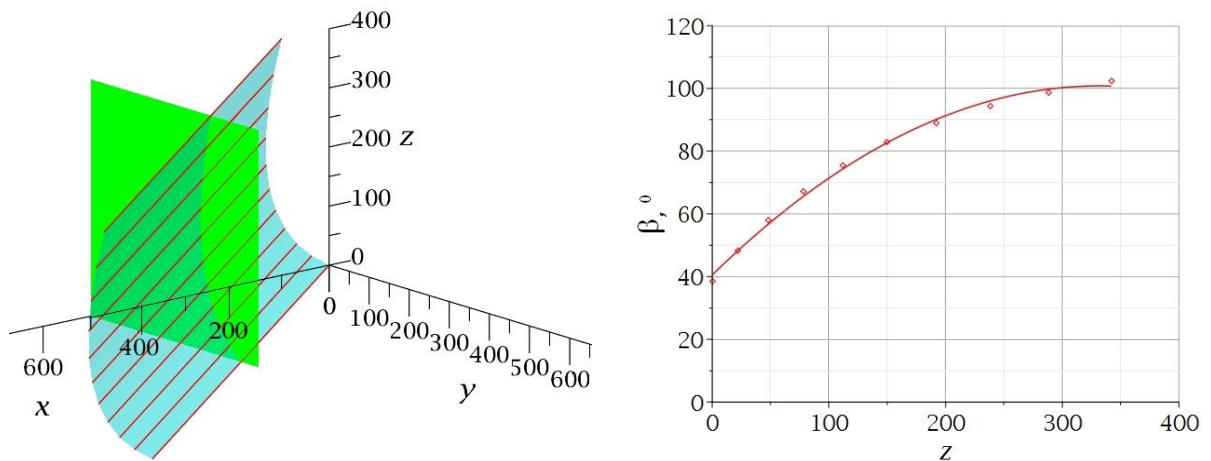


Рис. 3.15. Змінювання кута β обертання ґрунту для поверхні рис. 3.3 в перерізі площиною $x=500$ мм

Виконані побудови забезпечуються розробленою програмою для системи Maple, див. приклад А.10 додатків,. Алгоритм її функціонування полягає в наступному. Для сформованої розглянутим у попередньому пункті способом поверхні, обраної дистанції x_p уздовж осі x положення січної площини, кількості n опрацьовуваних ділянок (на рис. 3.15 $x_p=500$ мм, $n=10$) виконується дефініція кутів β у точках перетину твірних, визначених проміжками, з січною площиною. Отримані дані апроксимуються необхідною аналітичною функцією.

При цьому твірні зображуються тільки з метою контролю та забезпечення наочності. Координати поточної точки $P=(x_p, y_p, z_p)$ їхнього перетину з січною площиною, крім сталої величини x_p , розраховуються так. Апліката z_p дорівнює висоті z поточної твірної. Значення y_p обчислюється за формулою

$$y_p = a \cdot x_p + b, \quad (3.34)$$

де

$$a = (y_2 - y_1)/(x_2 - x_1), \quad b = y_1 - a \cdot x_1, \quad (3.35)$$

$(x_1, y_1), (x_2, y_2)$ – абсциси та ординати початку й кінця поточної твірної.

Як бачимо, вирази (3.34) та (3.35) описують її положення у площині, паралельній Oxy . Безпосередньо кут β_i в i -й ($1 \leq i \leq n$) точці $P_i=(x_{P_i}=x_p, y_{P_i}, z_{P_i})$ перетину твірної та січної площини розраховується у вигляді:

– якщо $y_{P_{i+1}} < y_{P_i}$, то

$$\beta_i = \arctg\left(\frac{|z_{P_{i+1}} - z_{P_i}|}{|y_{P_{i+1}} - y_{P_i}|}\right) \cdot 180/\pi^0; \quad (3.36)$$

– якщо $y_{P_{i+1}} > y_{P_i}$, то

$$\beta_i = 90 + \arctg\left(\frac{|y_{P_{i+1}} - y_{P_i}|}{|z_{P_{i+1}} - z_{P_i}|}\right) \cdot 180/\pi^0. \quad (3.37)$$

Співвідношення (3.36) і (3.37) обумовлені властивостями напрямних, їхнім розташуванням у просторі. Програмою, що розглядається, обчислені координати (z_{P_i}, β_i) , де $i \in \mathbb{N}$ та $i \leq n$, наносяться на графік у вигляді точок, див. рис. 3.15. Далі останні, з використанням методу найменших квадратів, апроксимуються потрібною функцією $f(z)$, у даному разі квадратичною параболою, яка теж відображається на графіку. Це дозволяє оцінити одержані відхилення та характер побудованої лінії. Її рівняння

$$f(z) = az^2 + bz + c, \quad (3.38)$$

де

$$a = -547,721 \cdot 10^{-6}, \quad b = 363,394 \cdot 10^{-3}, \quad c = 40,536. \quad (3.39)$$

У випадку застосування $n=50$ опрацьовуваних точок маємо показане на рис. 3.16 зображення та вираз (3.38) із коефіцієнтами

$$a = -491,323 \cdot 10^{-6}, \quad b = 353,552 \cdot 10^{-3}, \quad c = 37,467. \quad (3.40)$$

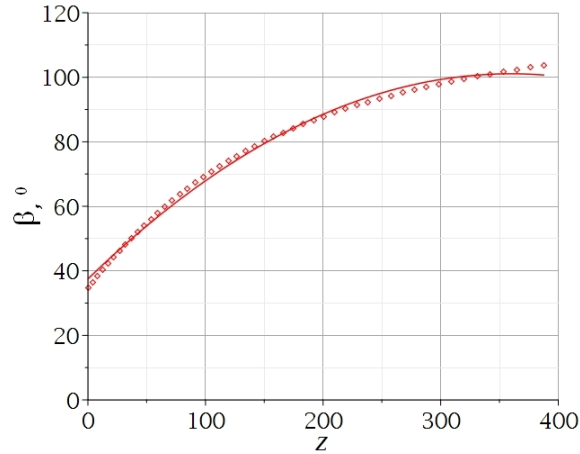


Рис. 3.16. Графік змінування кута β для $n=50$ точок квадратичної апроксимації

Варіанти кубічної апроксимації

$$f(z) = az^3 + bz^2 + cz + d, \quad (3.41)$$

для $n=10$:

$$a = 1,4094 \cdot 10^{-6}, \quad b = -1,2642 \cdot 10^{-3}, \quad c = 454,359 \cdot 10^{-3}, \quad d = 38,673; \quad (3.42)$$

для $n=50$:

$$a = 1,14 \cdot 10^{-6}, \quad b = -1,132 \cdot 10^{-3}, \quad c = 446,04 \cdot 10^{-3}, \quad d = 34,982; \quad (3.43)$$

подано на рис. 3.17.

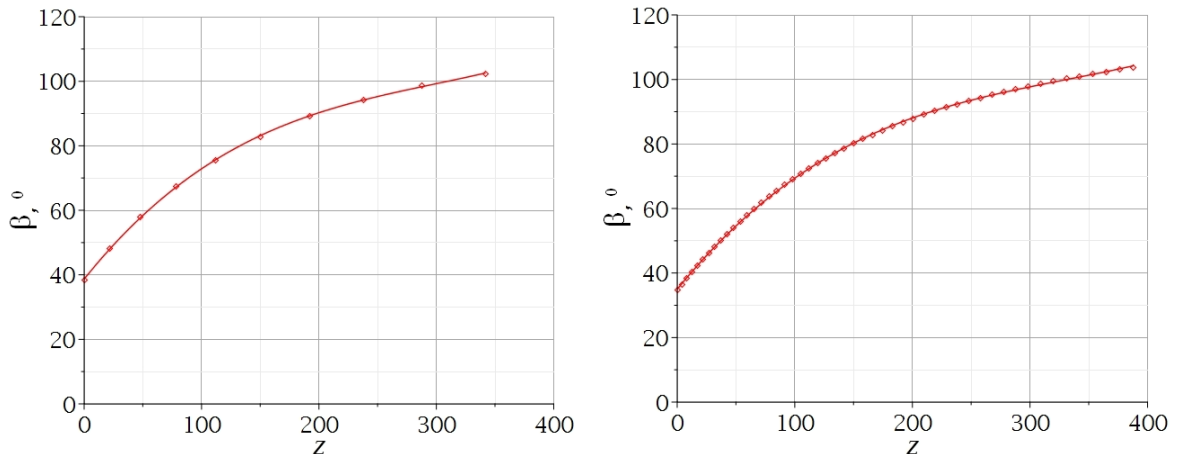


Рис. 3.17. Змінування кута β для $n=10$ та $n=50$ точок кубічної апроксимації

Відповідно до методики (3.38) ... (3.43) виконано ще кілька комп'ютерних обчислювальних експериментів. Зокрема, отримано:

– для квадратичної апроксимації:

при $n=100$

$$a = -485,347 \cdot 10^{-6}, b = 352,52 \cdot 10^{-3}, c = 37,08; \quad (3.44)$$

при $n=1000$

$$a = -480,15 \cdot 10^{-6}, b = 351,565 \cdot 10^{-3}, c = 36,74; \quad (3.45)$$

– для кубічної апроксимації:

при $n=100$

$$a = 1,1134 \cdot 10^{-6}, b = -1,1177 \cdot 10^{-3}, c = 445,133 \cdot 10^{-3}, d = 34,52; \quad (3.46)$$

при $n=1000$

$$a = 1,0907 \cdot 10^{-6}, b = -1,1056 \cdot 10^{-3}, c = 444,343 \cdot 10^{-3}, d = 34,1; \quad (3.47)$$

Деякі особливості значень (3.44) ... (3.47) ілюструє рис. 3.18. Як видно, у випадку квадратичної параболи величини кутів β обертання ґрунту на початковій висоті $z=0$ мм дещо завищені, а на прикінцевій – занижені. У середині вказаного проміжку відбувається збільшення та зменшення вихідних даних. Окреслене обумовлене властивостями цієї функції, яка є опуклою. Відповідна поведінка характерна і для кубічної інтерполяції, але точність при цьому суттєво вища. Недоліком є ймовірність осциляцій апроксимуючого аналітичного виразу.

Для аналізу, наприклад, величини кута β_0 в початковій точці $z=0$ мм можна використати табл. 3.1. У ній наведено дані з формул (3.38) ... (3.47) та додатково, з метою забезпечення більш цілісної інформації, результати обчислень для $n=5000$ точок. Бачимо, що квадратична апроксимація реалізує значення $\beta_0 \approx 37^0$, а кубічна – $\beta_0 \approx 34^0$, яке більш точне. Однак, остаточний висновок стосовно подальшого застосування того чи іншого отриманого математичного співвідношення залежить від багатьох конкретних існуючих факторів.

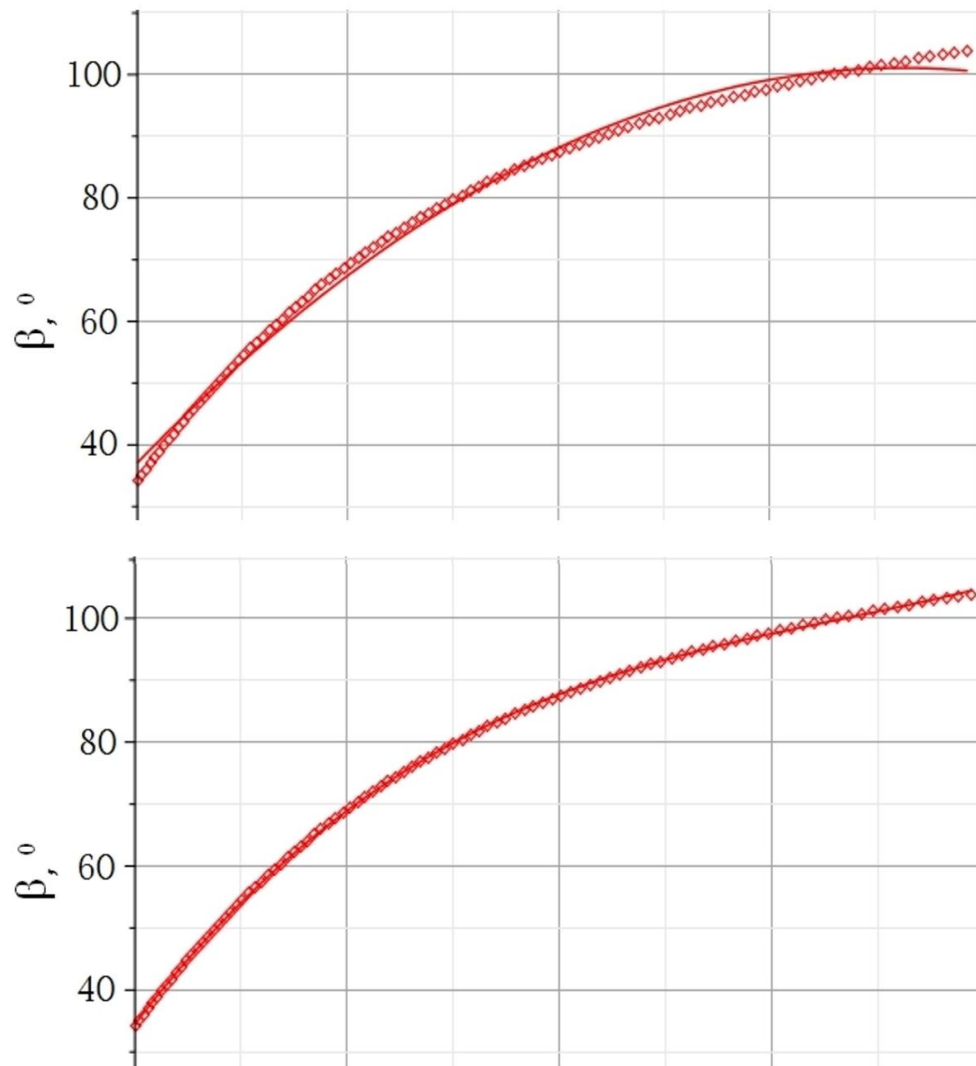


Рис. 3.18. До аналізу квадратичної та кубічної апроксимації при $n=100$ точок

Кут β_0 обертання ґрунту в точці $z=0$ мм Таблиця 3.1

| число n точок | Апроксимація | |
|--------------------|--------------------|--------------------|
| | квадратична | кубічна |
| 10 | 40,54 ⁰ | 38,67 ⁰ |
| 50 | 37,47 ⁰ | 34,98 ⁰ |
| 100 | 37,08 ⁰ | 34,52 ⁰ |
| 1000 | 36,74 ⁰ | 34,10 ⁰ |
| 5000 | 36,71 ⁰ | 34,06 ⁰ |

Для практичного вжитку в суміжних із геометрією дисциплінах, наприклад ґрунтообробній механіці, кориснішою може бути кубічна апроксимація змінювання кута β обертання ґрунту завдяки її кращій точності, а

для виконання належних теоретичних досліджень – квадратична, через її простоту, що полегшує виконання необхідних, зазвичай доволі складних, наступних математичних викладок.

Зауважимо, що надалі, у зв'язку з обмеженим обсягом дисертації, здійснювати такий докладний, як вище, аналіз функціональних залежностей апроксимації більш не будемо.

Змінювання кута β обертання ґрунту від висоти z циліндричною еліптичною (рис. 3.4) та гіперболічною (рис. 3.5) поверхнею показано відповідно на рис. 3.19 і рис. 3.20.

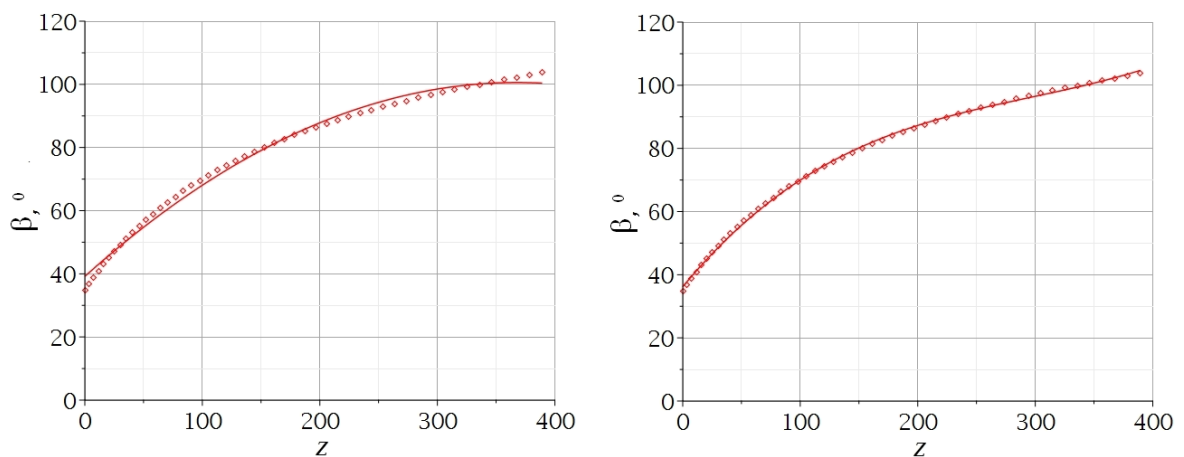


Рис. 3.19. Змінювання кута β еліптичної поверхні рис. 3.4 для $n=50$ точок квадратичної та кубічної апроксимації

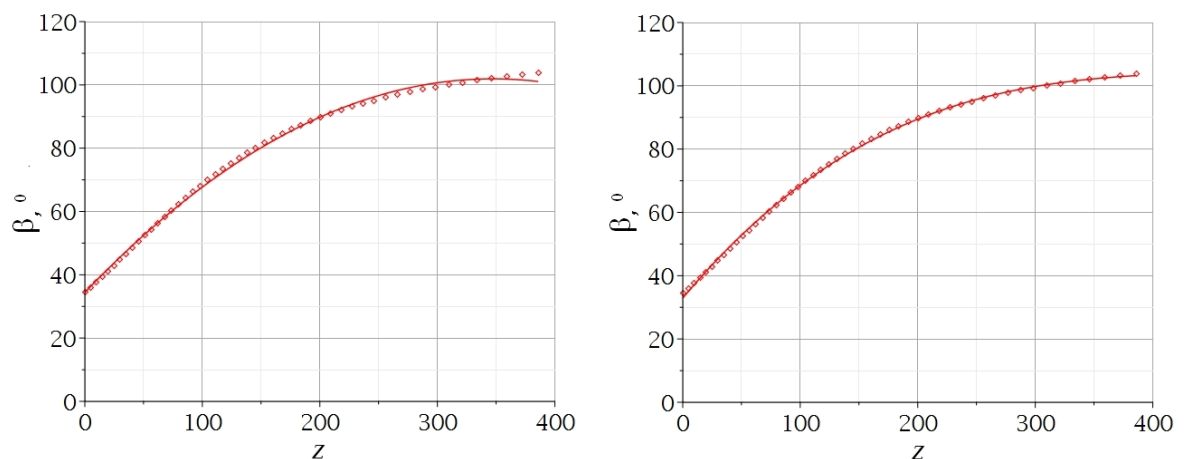


Рис. 3.20. Змінювання кута β гіперболічної поверхні рис. 3.5 для $n=50$ точок квадратичної та кубічної апроксимації

Як видно, графіки рис. 3.16, другого зображення рис. 3.17, та рис. 3.19 і рис. 3.20 дуже схожі. Але є певні відмінності. Наприклад, у двох останніх кут β_0 в точці $z=0$ мм для квадратичної інтерполяції відповідно $\beta_0 \approx 39,18^\circ$ та $\beta_0 \approx 34,42^\circ$,

а для кубічної – $\beta_0 \approx 36,18^0$ та $\beta_0 \approx 32,92^0$. Зіставляючи вказані дані з відповідною інформацією табл. 3.1, робимо висновок про те, що в цьому разі, порівняно з параболічною в еліптичної поверхні β_0 збільшується, а в гіперболічної – зменшується.

На завершення опису змінювання кута β обертання ґрунту від висоти z циліндричними параболічними поверхнями зазначимо, що характер вказаної величини інваріантний до положення січної площини, яка перпендикулярна осі x і перетинає всі твірні, див. рис. 3.15.

Тепер розглянемо змінювання кута α розпушення ґрунту циліндричними параболічними поверхнями залежно від висоти z у січних площинах, перпендикулярних осі y , див. рис. 3.21.

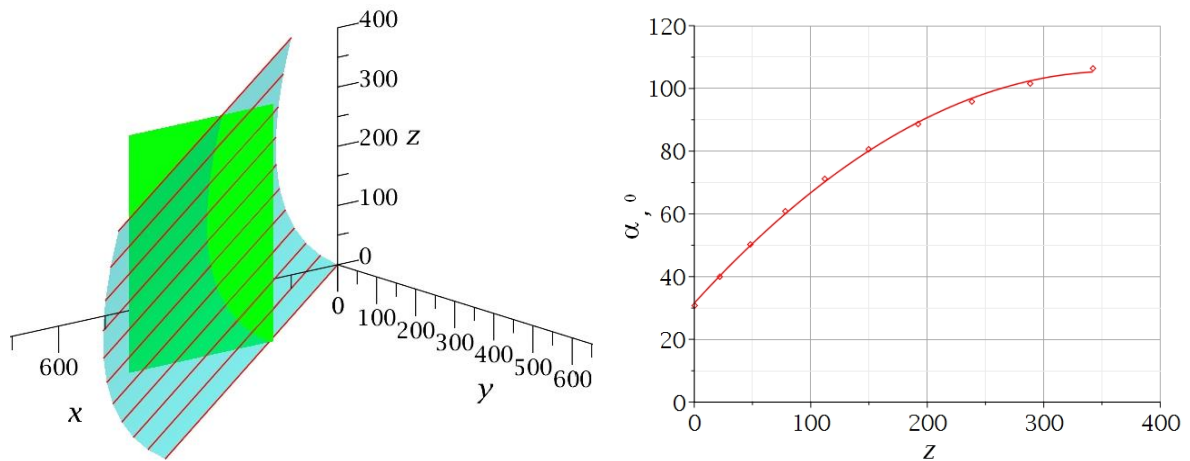


Рис. 3.21. Змінювання кута α розпушування ґрунту для поверхні рис. 3.3 в перерізі площиною $y=300$ мм

Здійснені далі побудови забезпечуються розробленою програмою для системи Maple, див. приклад А.11 додатків,. Алгоритм її функціонування полягає в наступному.

Для сформованої циліндричної поверхні, необхідної дистанції y_p уздовж осі y положення січної площини, кількості n опрацьовуваних ділянок (на рис. 3.21 $y_p=300$ мм, $n=10$) здійснюється визначення кутів α_i в точках перетину твірних з січною площиною. Отримані дані апроксимуються потрібною математичною залежністю. Наведена послідовність дій схожа на розглянуту для кута β з відмінністю, яка стосується перпендикулярності січної площини

не осі x , а осі y . Отже в рівнянні (3.34) невідомою величиною є не y_P , а x_P .
Тобто.

$$x_P = y_P - b \cdot \frac{y_P - b}{a}. \quad (3.48)$$

Кут α_i в поточній i -й ($1 \leq i \leq n$) точці $P_i = (x_{P_i}, y_{P_i} = y_P, z_{P_i})$ перетину твірної та січної площини з використанням співвідношення (3.48) розраховується у вигляді:

– якщо $x_{P_{i+1}} > x_{P_i}$, то

$$\alpha_i = \arctg\left(\frac{|z_{P_{i+1}} - z_{P_i}|}{|x_{P_{i+1}} - x_{P_i}|}\right) \cdot 180/\pi^0; \quad (3.49)$$

– якщо $x_{P_{i+1}} < x_{P_i}$, то

$$\alpha_i = 90 + \arctg\left(\frac{|x_{P_{i+1}} - x_{P_i}|}{|z_{P_{i+1}} - z_{P_i}|}\right) \cdot 180/\pi^0. \quad (3.50)$$

Вирази (3.49) і (3.50) обумовлені властивостями напрямних, їхнім розташуванням у просторі. Розробленою програмою обчислені координати (z_{P_i}, α_i) , де $i \in \mathbb{N}$ та $i \leq n$, наносяться на графік у вигляді точок, див. рис. 3.21. Далі за докладно описаною вище процедурою реалізується проаналізована апроксимація.

Порівнюючи рис. 3.21 і рис. 3.15, тобто змінювання кутів обертання β та кутів розпушення α при однакових висотах z й умовах апроксимації, зазначимо наступне. У якісному плані вказані величини достатньо схожі. Але в кількісному наявні певні відмінності. Зауважимо також, що значення кутів α інваріантні до дистанції y_P . У випадку рис. 3.15 апроксимуюча квадратична парабола (3.38) має коефіцієнти (3.39), а для рис. 3.21

$$a = -564,82 \cdot 10^{-6}, \quad b = 408,691 \cdot 10^{-3}, \quad c = 31,544. \quad (3.51)$$

Порівнюючи вирази (3.39) та (3.51), зокрема, акцентуємо достатньо різні кути для висоти $z=0$ мм. Це ж стосується й кінцевої ділянки.

За допомогою більш точної кубічної інтерполяції (3.41) при $n=1000$ точок, див. рис 3.22, для кута розпушення α маємо

$$a = 0,5708 \cdot 10^{-6}, \quad b = -0,8198 \cdot 10^{-3}, \quad c = 442,16 \cdot 10^{-3}, \quad d = 25,97. \quad (3.52)$$

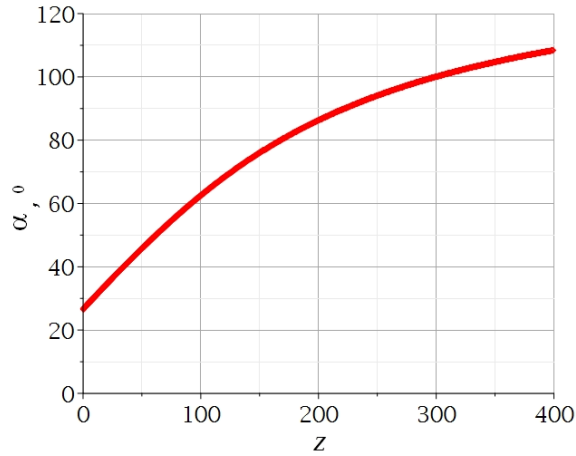


Рис. 3.22. Змінювання кута α поверхні рис. 3.3 в перерізі площиною $y=300$ мм

Рис. 3.23 та рис. 3.24 характеризують кут α відповідно еліптичної та гіперболічної циліндричної поверхні.

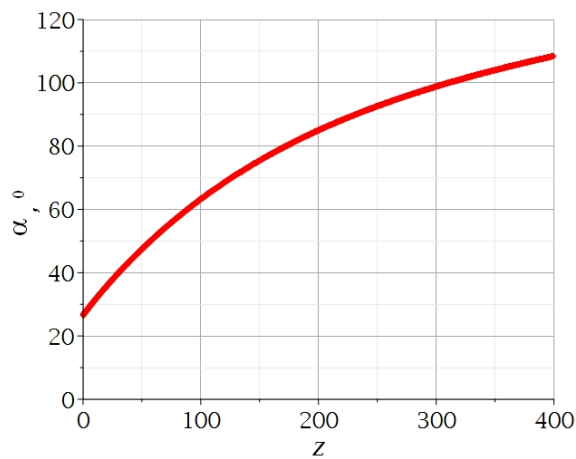


Рис. 3.23. Кут α еліптичної поверхні рис. 3.4

При цьому застосовано інтерполяцію (3.41) для $n=1000$ точок й отримано результати:

$$a = 0,90534 \cdot 10^{-6}, \quad b = -0,9713 \cdot 10^{-3}, \quad c = 448,24 \cdot 10^{-3}, \quad d = 27,15; \quad (3.53)$$

$$a = 5,817 \cdot 10^{-9}, \quad b = -0,569 \cdot 10^{-3}, \quad c = 434,86 \cdot 10^{-3}, \quad d = 23,86. \quad (3.54)$$

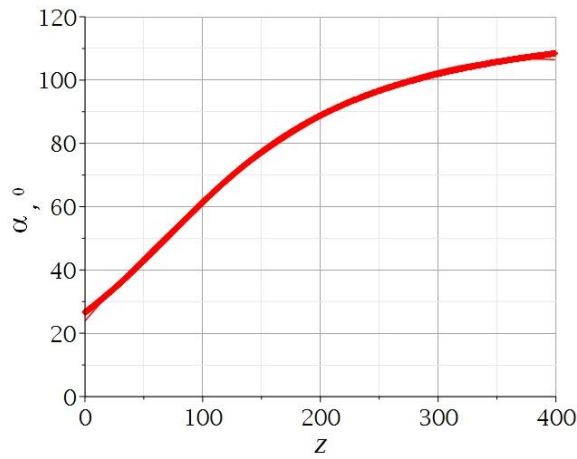


Рис. 3.24. Кут α гіперболічної поверхні рис. 3.5

Як бачимо, для еліптичної поверхні характер кута α схожий на проаналізовані попередні. Стосовно гіперболічної, то послідовність вихідних точок візуально, див. рис. 3.24, має тенденцію до перегину. Про це також свідчить відхилення від них апроксимуючої функції та її дотичних на кінцях опрацьовуваного проміжку z .

Залежність із коефіцієнтами (3.54) має вигляд

$$f(z) = 5,817 \cdot 10^{-9} z^3 - 0,569 \cdot 10^{-3} z^2 + 434,86 \cdot 10^{-3} z + 23,86, \quad (3.55)$$

яку показано на рис. 3.25.

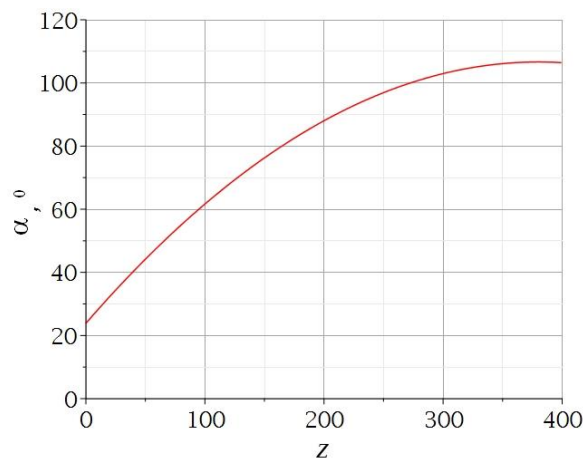


Рис. 3.25. Апроксимуюча крива для кута α гіперболічної поверхні

Похідна виразу (3.55)

$$f'(z) = -1,7451 \cdot 10^{-8} z^2 - 1,1378 \cdot 10^{-3} z + 0,4349. \quad (3.56)$$

Прирівнюючи співвідношення (3.56) до нуля, отримуємо квадратне рівняння з розв'язками

$$z_1 \approx -65579; \quad z_2 \approx 380. \quad (3.57)$$

Величини (3.57) свідчать, що у кривій (3.55) дві критичні точки. На проміжку, який нас цікавить, маємо максимум із координатою $z_2 \approx 380$ мм. Значенню $z_1 \approx -65579$ мм відповідає мінімум. В апроксимуючій лінії наявна точка перегину, але вона розташована за межами відрізка $z \in [0 \text{ мм}; 400 \text{ мм}]$. Отже, за умов застосування розрахованої залежності (3.55), особливо в теоретичному плані в суміжних із геометрією дисциплінах, треба обов'язково звернути увагу на акцентованих вище моментах. Питання узагальнення щодо коефіцієнтів (3.52) ... (3.54) можуть становити предмет наступних наукових досліджень із викладеної тематики.

На завершення опису змінювання кутів α розпушення ґрунту та β його обертання для різних (параболічних, еліптичних, гіперболічних) циліндричних поверхонь у залежності від висоти z відвала плуга, наведемо деяку інформацію стосовно впливу на ці величини кута γ зсуву ґрунту. З умов побудови даних поверхонь випливає, що кут α інваріантний до значень γ . Належні розрахунки для кутів β виконано на основі подібної до прикладу А.10 додатків розробленої програми для системи Maple.

При цьому використано величини:

– для $\gamma_1 = 30,96^\circ$:

$$\mathbf{r}_{0,0} = (0; 0; 0), \quad \mathbf{r}_{0,1} = (1000; 600; 0), \quad \mathbf{r}_{1,0} = (100; 0; 400), \quad \mathbf{r}_{1,1} = (1100; 600; 400), \\ \mathbf{P}_1 = (500; 200; 0), \quad \mathbf{P}_2 = (500; 200; 300), \quad \mathbf{P}_3 = (200; 0; 100), \quad \mathbf{P}_4 = (1200; 600; 100), \\ w_1 = w_2 = 0, \quad w_3 = w_4 = 1;$$

– для $\gamma_2 = 36,87^\circ$:

$$\mathbf{r}_{0,0} = (0; 0; 0), \quad \mathbf{r}_{0,1} = (1000; 750; 0), \quad \mathbf{r}_{1,0} = (100; 0; 400), \quad \mathbf{r}_{1,1} = (1100; 750; 400), \\ \mathbf{P}_1 = (500; 200; 0), \quad \mathbf{P}_2 = (500; 200; 400), \quad \mathbf{P}_3 = (200; 0; 100), \quad \mathbf{P}_4 = (1200; 750; 100), \\ w_1 = w_2 = 0, \quad w_3 = w_4 = 1;$$

– для $\gamma_2 = 45^\circ$:

$$\mathbf{r}_{0,0} = (0; 0; 0), \quad \mathbf{r}_{0,1} = (1000; 1000; 0), \quad \mathbf{r}_{1,0} = (100; 0; 400), \quad \mathbf{r}_{1,1} = (1100; 1000; 400), \\ \mathbf{P}_1 = (500; 200; 0), \quad \mathbf{P}_2 = (500; 200; 400), \quad \mathbf{P}_3 = (200; 0; 100), \quad \mathbf{P}_4 = (1200; 1000; 100), \\ w_1 = w_2 = 0, \quad w_3 = w_4 = 1.$$

Отримані результати показано на рис. 3.26 ... 3.28. Зауважимо, що еліптична та гіперболічна поверхня будуються за наведеними вище даними з різницею тільки в застосуванні замість $w_3=w_4=1$ відповідно $w_3=w_4=0,9$ та $w_3=w_4=1,2$.

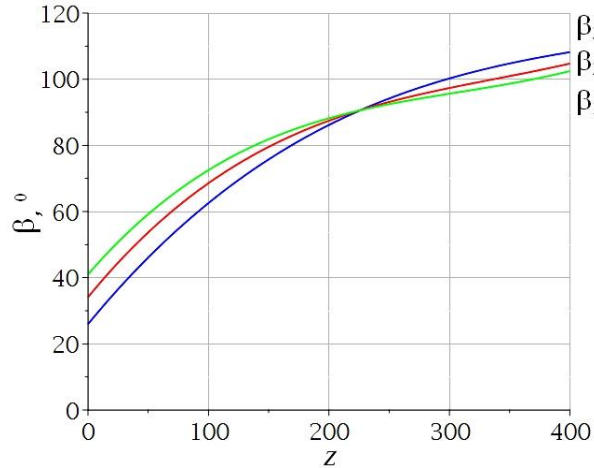


Рис. 3.26. Кут β параболічної поверхні для $\gamma_1=30,96^0$; $\gamma_2=36,87^0$; $\gamma_3=45^0$

Для кутів $\gamma_1=30,96^0$; $\gamma_2=36,87^0$; $\gamma_3=45^0$ (рис. 3.26) визначаємо необхідні функції з належними індексами:

$$\beta_1(z) = 1,273 \cdot 10^{-6} z^3 - 1,176 \cdot 10^{-3} z^2 + 420,35 \cdot 10^{-3} z + 40,97; \quad (3.58)$$

$$\beta_2(z) = 1,091 \cdot 10^{-6} z^3 - 1,106 \cdot 10^{-3} z^2 + 444,3 \cdot 10^{-3} z + 34,1; \quad (3.59)$$

$$\beta_3(z) = 0,571 \cdot 10^{-6} z^3 - 0,82 \cdot 10^{-3} z^2 + 442,16 \cdot 10^{-3} z + 25,97. \quad (3.60)$$

З виразів (3.58) ... (3.60) та рис. 3.26 видно, що на проміжку $z \in [0 \text{ мм}; 400 \text{ мм}]$ найменший діапазон змінювання кута обертання ґрунту $\beta_1 \in [40,97^0; 102,47^0]$ у кута $\gamma_1=30,96^0$. Для $\gamma_2=36,87^0$ маємо $\beta_2 \in [34,1^0; 104,75^0]$, для $\gamma_3=45^0$ – $\beta_3 \in [25,97^0; 108,2^0]$. Отже, зі збільшенням кута γ зсуву ґрунту в циліндричній параболічній поверхні початковий кут β спадає, а кінцевий – зростає.

Для кутів $\gamma_1=30,96^0$; $\gamma_2=36,87^0$; $\gamma_3=45^0$ (рис. 3.27) розраховуємо

$$\beta_1(z) = 1,458 \cdot 10^{-6} z^3 - 1,251 \cdot 10^{-3} z^2 + 419,15 \cdot 10^{-3} z + 42,17; \quad (3.61)$$

$$\beta_2(z) = 1,333 \cdot 10^{-6} z^3 - 1,21 \cdot 10^{-3} z^2 + 445,68 \cdot 10^{-3} z + 35,34; \quad (3.62)$$

$$\beta_3(z) = 0,90534 \cdot 10^{-6} z^3 - 0,971 \cdot 10^{-3} z^2 + 448,24 \cdot 10^{-3} z + 27,15. \quad (3.63)$$

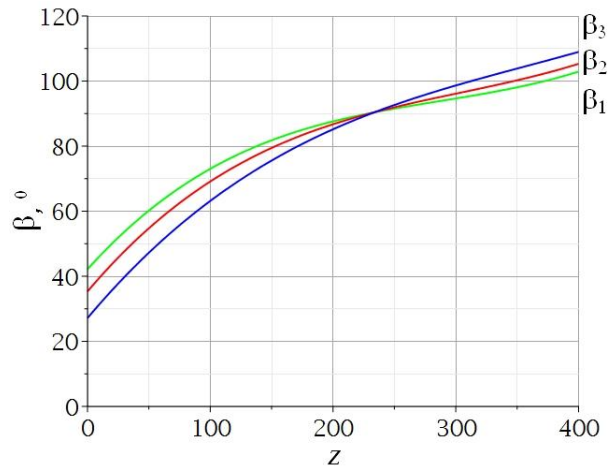


Рис. 3.27. Кут β еліптичної поверхні для $\gamma_1=30,96^0$; $\gamma_2=36,87^0$; $\gamma_3=45^0$

Співвідношення (3.61) ... (3.63) свідчать, що в цьому разі $\beta_1 \in [42,17^0; 102,92^0]$, $\beta_2 \in [35,34^0; 105,32^0]$, $\beta_3 \in [27,15^0; 108,98^0]$. Як бачимо, характер впливу кута γ зсуву ґрунту на циліндричну еліптичну поверхню схожий на попередній випадок. Головною якісною відмінністю є зміщення на графіку вгору апроксимуючих ліній.

Для кутів $\gamma_1=30,96^0$; $\gamma_2=36,87^0$; $\gamma_3=45^0$ (рис. 3.28) обчислюємо

$$\beta_1(z) = 0,948 \cdot 10^{-6} z^3 - 1,048 \cdot 10^{-3} z^2 + 424 \cdot 10^{-3} z + 38,85; \quad (3.64)$$

$$\beta_2(z) = 0,6684 \cdot 10^{-6} z^3 - 0,93 \cdot 10^{-3} z^2 + 444 \cdot 10^{-3} z + 31,92; \quad (3.65)$$

$$\beta_3(z) = 0,0058 \cdot 10^{-6} z^3 - 0,569 \cdot 10^{-3} z^2 + 435 \cdot 10^{-3} z + 23,86. \quad (3.66)$$

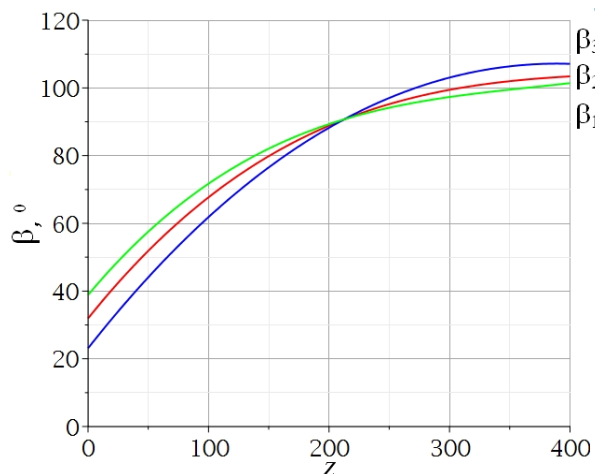


Рис. 3.28. Кут β гіперболічної поверхні для $\gamma_1=30,96^0$; $\gamma_2=36,87^0$; $\gamma_3=45^0$

Вирази (3.64) ... (3.66) показують, що $\beta_1 \in [38,85^0; 101,43^0]$, $\beta_2 \in [31,92^0; 103,41^0]$, $\beta_3 \in [23,86^0; 106,41^0]$. Отже, вплив кута γ на циліндричну гіперболічну

поверхню подібний до попереднього. Основна відмінність полягає у зміщенні на графіку вниз апроксимуючих кривих.

Примітка. Достатньо розлогий матеріал, який присвячено циліндричним поверхням, обумовлено не тільки їхнім поділом на параболічні, еліптичні та гіперболічні, а й докладним описом належної розробленої методики, використовуваного математичного апарату, напрацьованих програмних засобів, різноманітних нюансів, зокрема, апроксимації. Це дозволяє надалі, під час розгляду інших теоретичних поверхонь відвалів плугів, більш не зупинятися на означених моментах.

Підкреслимо також необхідність проведення наукових розвідок у проаналізованому плані, але це виходить за рамки теми та нормативних обсягів дисертації. На підтвердження сказаного наведемо кілька прикладів.

Нехай для поверхні $\mathbf{r}_{0,0}=(0; 0; 0)$, $\mathbf{r}_{0,1}=(1000; 1000; 0)$, $\mathbf{r}_{1,0}=(100; 0; 400)$, $\mathbf{r}_{1,1}=(1100; 1000; 400)$, $\mathbf{P}_1=(500; 200; 0)$, $\mathbf{P}_2=(500; 200; 400)$, $\mathbf{P}_3=(200; 0; 100)$, $\mathbf{P}_4=(1200; 1000; 100)$, $w_1=w_2=0$, $w_3=w_4=0,2$ в перерізі площиною $x=500$ мм треба визначити аналітичну функцію для кута β обертання ґрунту залежно від висоти z .

На рис. 3.29 показано цю поверхню та апроксимацію змінювання кута β кубічним поліномом для $n=1000$ точок.

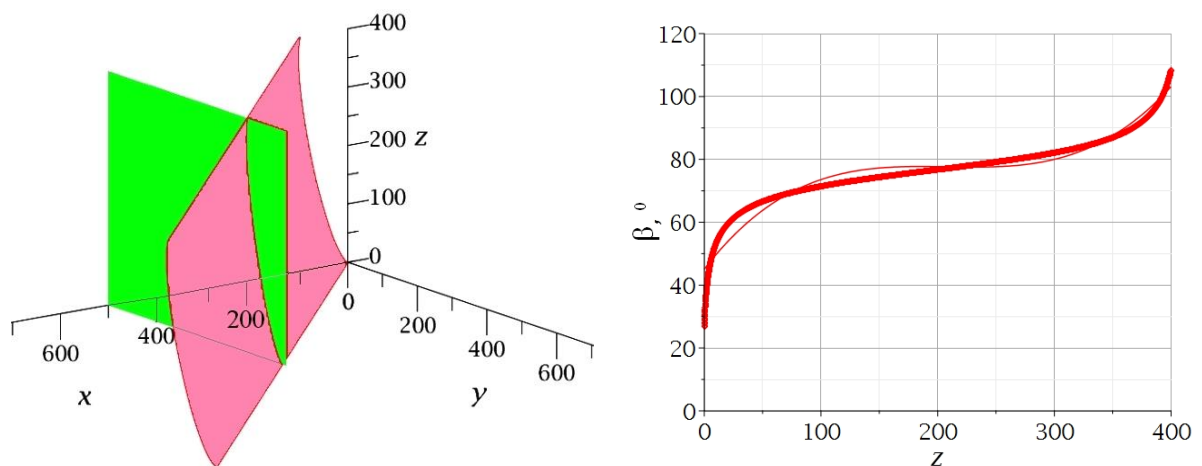
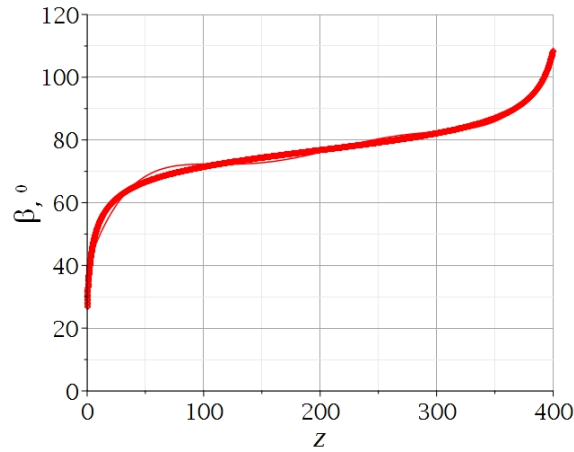
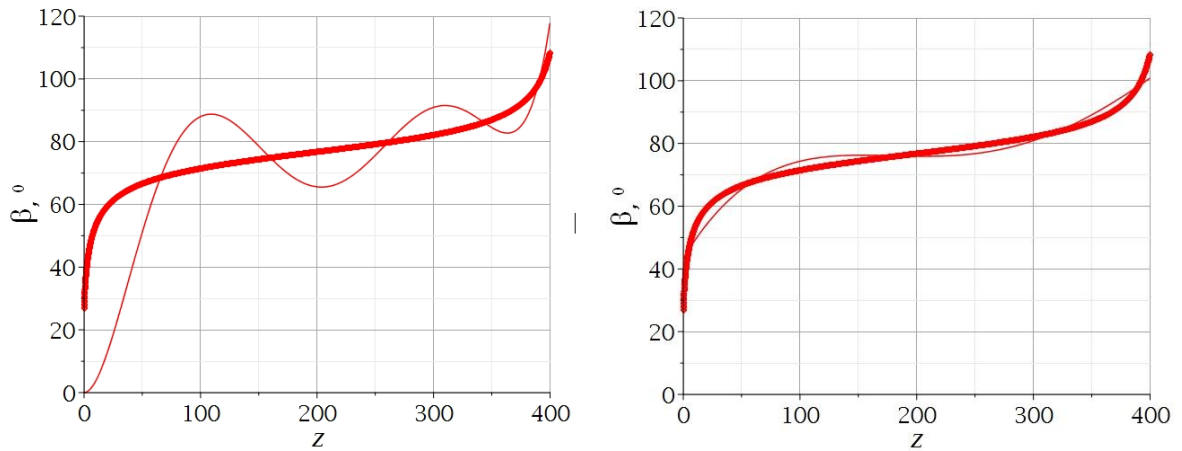


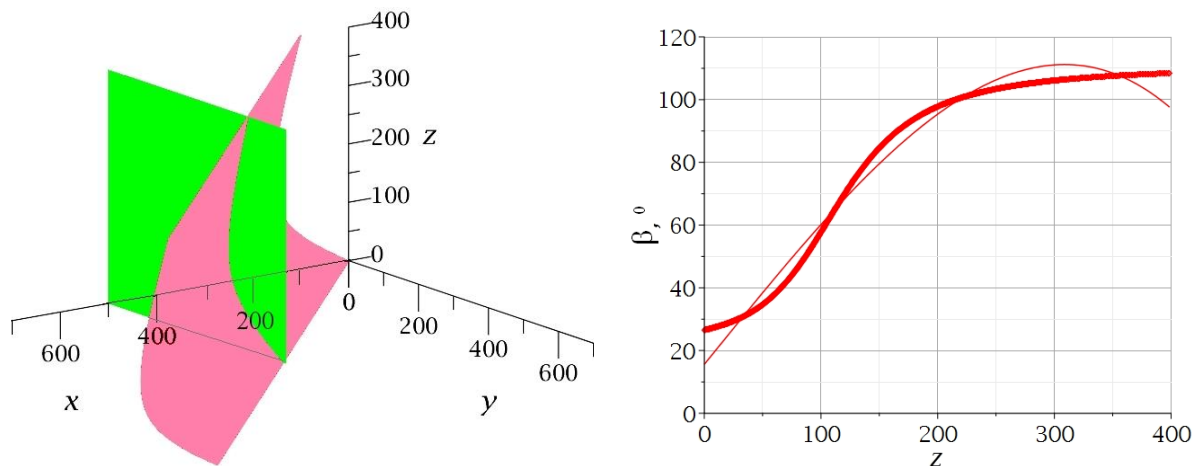
Рис. 3.29. Поверхня та кут β , визначений кубічною апроксимацією

Отриманий вище результат дещо покращує поліном п'ятого степеня, див. рис. 3.30. Застосування шостого та сьомого степеня в першому випадку тільки погіршує ситуацію, а у другому – не забезпечує високої точності (рис. 3.31).

Рис. 3.30. Дефініція кута β поліномом п'ятого степеняРис. 3.31. Визначення кута β поліномом шостого та сьомого степеня

Наведені факти обумовлюють необхідність використання спеціальних функцій апроксимації. Обґрунтуємо це також наступним прикладом.

Нехай для попередніх даних ужито $w_3=w_4=2,2$. Побудовану таку поверхню та апроксимацію кута β кубічним поліномом для $n=1000$ точок зображено на рис. 3.32.

Рис. 3.32. Поверхня та кут β , визначений кубічною апроксимацією

Застосування четвертого й п'ятого степеня ілюструє рис. 3.33.

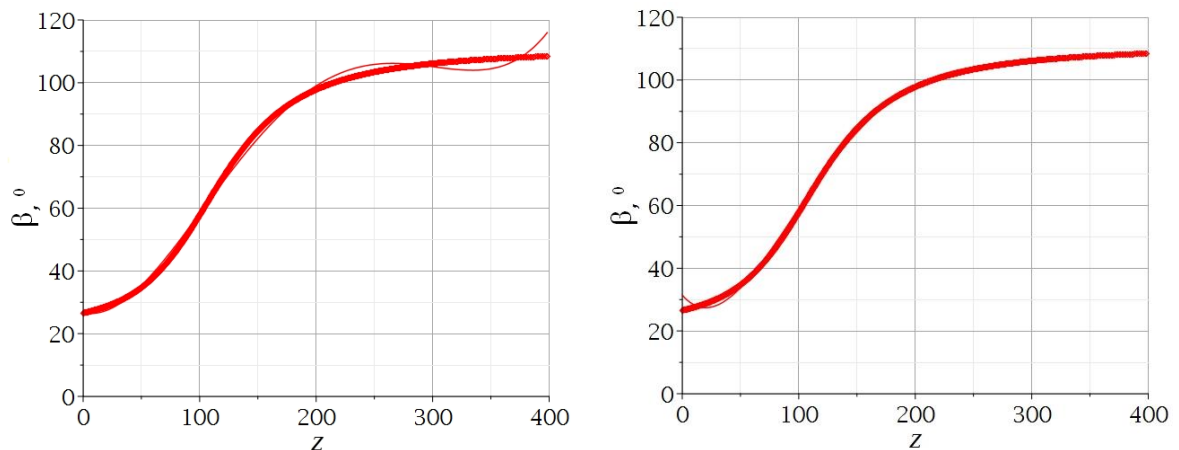


Рис. 3.33. Визначення кута β поліномом четвертого та п'ятого степеня

Отже, переходимо далі до аналізу наступних популярних теоретичних поверхонь відвалів плугів.

Циліндроїдальні поверхні

Розглянемо побудовані в попередньому пункті поверхні, зображені на рис. 3.6 і рис. 3.7. Використовуватимемо вже протестовані програмні засоби щодо формування графіків змінювання кутів α розпушування, β обертання та γ зсуву ґрунту в певних площинах залежно від висоти z . Також, за можливості, з метою дотримання належних обсягів дисертації зупинятимемося, як правило, на якісних, а не докладних кількісних оцінках опрацьовуваних матеріалів.

На рис. 3.34 наведено поверхню (рис. 3.6) і змінювання її кута γ залежно від висоти z .

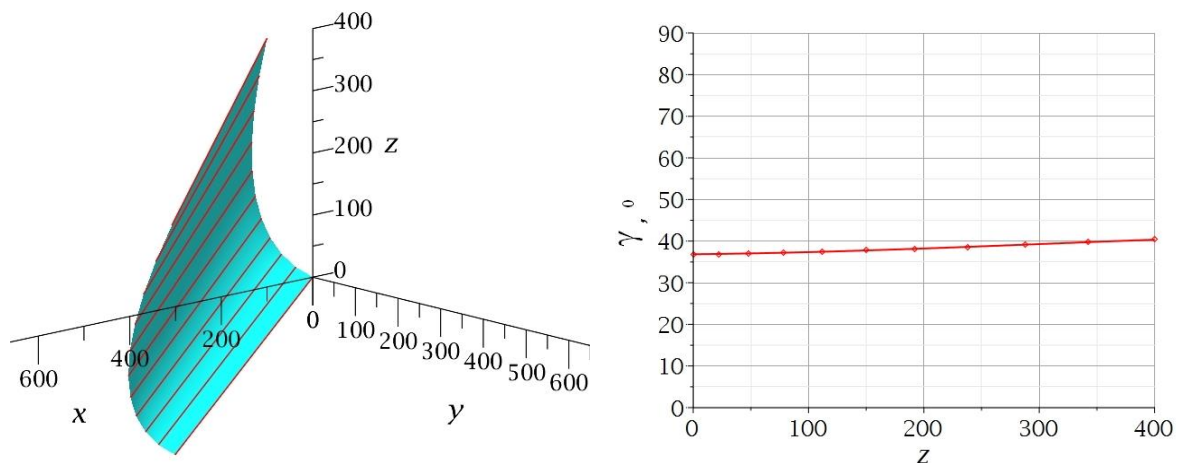


Рис. 3.34. Поверхня та кут γ , визначений квадратичною апроксимацією

Отримана математична залежність має вигляд

$$\gamma(z) = 9,417 \cdot 10^{-6} z^2 + 5,315 \cdot 10^{-3} z + 36,8. \quad (3.67)$$

Для дефініції змінювання кута α розпушування ґрунту від висоти z визначено три дистанції січних площин уздовж осі y , а саме: $y_1=100$ мм, $y_2=400$ мм, $y_3=700$ мм. Для них розраховано апроксимуючі функції:

$$\alpha_1(z) = 0,618 \cdot 10^{-6} z^3 - 0,885 \cdot 10^{-3} z^2 + 0,467 z + 25,76; \quad (3.68)$$

$$\alpha_2(z) = 0,834 \cdot 10^{-6} z^3 - 1,132 \cdot 10^{-3} z^2 + 0,549 z + 25,02; \quad (3.69)$$

$$\alpha_3(z) = 1,177 \cdot 10^{-6} z^3 - 1,46 \cdot 10^{-3} z^2 + 0,642 z + 24,18. \quad (3.70)$$

Графіки виразів (3.68) ... (3.70) ілюструє рис. 3.35.

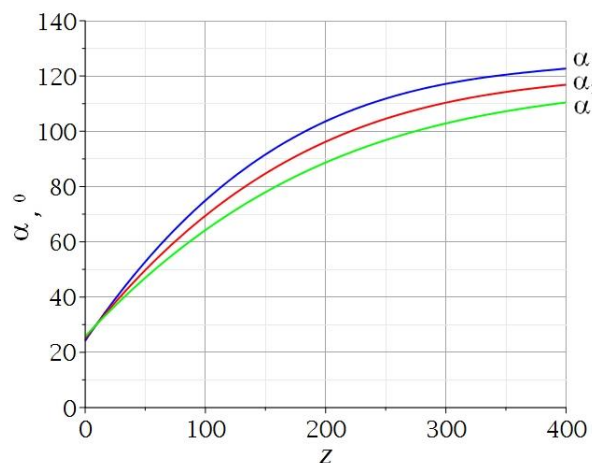


Рис. 3.35. Кут α поверхні рис. 3.6 для дистанцій $y_1=100$ мм, $y_2=400$ мм, $y_3=700$ мм

Виконавши квадратичну інтерполяцію цих ліній поверхнею за підходом (2.97) і (2.98), маємо:

$$\alpha(y, z) = \sum_{i=0}^3 a_i(y) z^i, \quad (3.71)$$

де

$$a_0(y) = -0,55555 \cdot 10^{-6} y^2 - 2,189 \cdot 10^{-3} y + 25,98;$$

$$a_1(y) = 0,06111 \cdot 10^{-6} y^2 + 0,2428 \cdot 10^{-3} y + 0,442;$$

$$a_2(y) = -0,45 \cdot 10^{-9} y^2 - 0,5983 \cdot 10^{-6} y - 0,0008;$$

$$a_3(y) = 0,7056 \cdot 10^{-12} y^2 + 0,3672 \cdot 10^{-9} y + 0,57 \cdot 10^{-6}.$$

Цю функцію показано на рис. 3.36. Зазначимо, що квадратичну інтерполяцію застосовано завдяки характеру опрацьовуваних ліній.

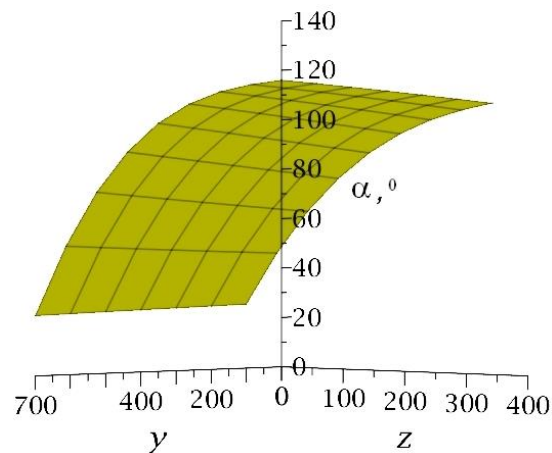


Рис. 3.36. Залежність кута α розпушування ґрунту поверхні рис. 3.6 від координат y та z

За допомогою співвідношення (3.71) розраховується кут α в довільній точці проміжків $y \in [100 \text{ мм}; 700 \text{ мм}]$, $z \in [0 \text{ мм}; 400 \text{ мм}]$. Це зручно для суміжних із геометрією спеціальних дисциплін, наприклад ґрунтообробної механіки. Наявні y та z забезпечують, за потреби, дефініцію відповідної абсциси x .

Визначимо далі характер змінювання кута β обертання ґрунту від висоти z і координати x для циліндроїдальної поверхні, яка аналізується. Обираємо три дистанції січних площин уздовж осі x , а саме: $x_1=150 \text{ мм}$, $x_2=550 \text{ мм}$, $x_3=950 \text{ мм}$. З використанням описаних вище програм системи Maple обчислюємо апроксимуючі функції:

$$\beta_1(z) = 1,1557 \cdot 10^{-6} z^3 - 1,111 \cdot 10^{-3} z^2 + 0,443 z + 34,35; \quad (3.72)$$

$$\beta_2(z) = 1,3169 \cdot 10^{-6} z^3 - 1,2851 \cdot 10^{-3} z^2 + 0,504 z + 34,07; \quad (3.73)$$

$$\beta_3(z) = 1,5376 \cdot 10^{-6} z^3 - 1,502 \cdot 10^{-3} z^2 + 0,572 z + 33,73. \quad (3.74)$$

Вирази (3.72) ... (3.74) проілюстровано на рис. 3.37. Здійснивши квадратичну інтерполяцію вказаних кривих, отримуємо

$$\beta(x, z) = \sum_{i=0}^3 b_i(x) z^i, \quad (3.75)$$

де

$$b_0(x) = -0,1875 \cdot 10^{-6} x^2 - 0,569 \cdot 10^{-3} x + 34,44;$$

$$b_1(x) = 0,02188 \cdot 10^{-6} x^2 + 0,1372 \cdot 10^{-3} x + 0,422;$$

$$b_2(x) = -0,1344 \cdot 10^{-9} x^2 - 0,341 \cdot 10^{-6} x - 0,00106;$$

$$b_3(x) = 0,1859 \cdot 10^{-12} x^2 + 0,2728 \cdot 10^{-9} x + 1,111 \cdot 10^{-6}.$$

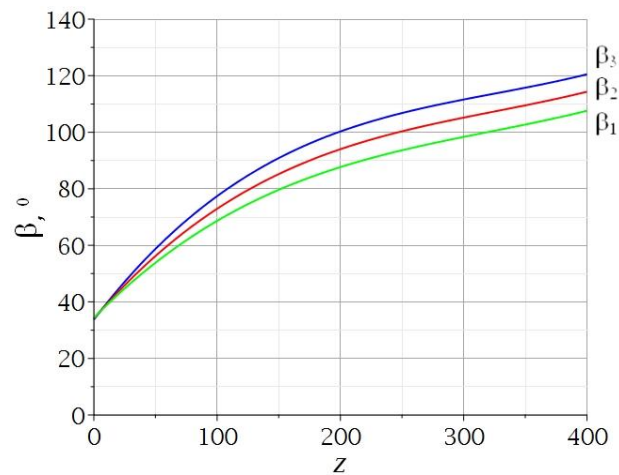


Рис. 3.37. Кут β поверхні рис. 3.6 для дистанцій
 $x_1=150$ мм, $x_2=550$ мм, $x_3=950$ мм

Дану поверхню зображено на рис. 3.38.

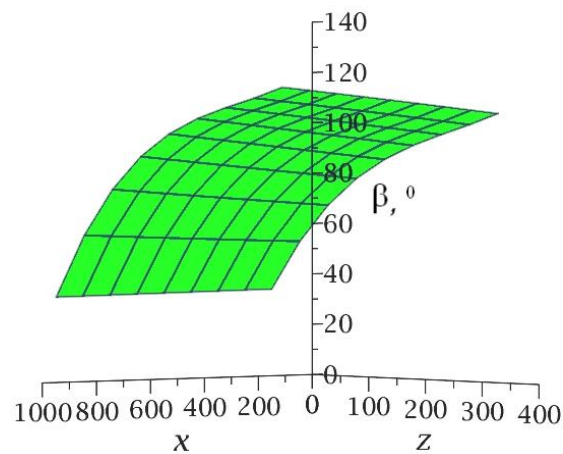


Рис. 3.38. Залежність кута β обертання ґрунту поверхні рис. 3.6
від координат x та z

За допомогою співвідношення (3.75) обчислюється кут β у довільній точці проміжків $x \in [150 \text{ мм}; 950 \text{ мм}]$, $z \in [0 \text{ мм}; 400 \text{ мм}]$. Покажемо далі створення більш загальної функції $\beta(x, z, w_4)$, де ваговий коефіцієнт другої напрямної $w_4 \in [0,5; 1,5]$. Для значення $w_4=1$ вже розраховано вираз (3.75). За аналогією отримуємо:

– для $w_4=0,5$

$$\beta(w_4 = 0,5; x, z) = \sum_{i=0}^3 b_i(x)z^i, \quad (3.76)$$

де

$$b_0(x) = 5,825 \cdot 10^{-6} x^2 - 0,0116x + 34,06;$$

$$b_1(x) = -0,075 \cdot 10^{-6} x^2 + 22,5 \cdot 10^{-6} x + 0,401;$$

$$b_2(x) = 0,2813 \cdot 10^{-9} x^2 + 63,13 \cdot 10^{-9} x - 0,904 \cdot 10^{-3};$$

$$b_3(x) = -0,3447 \cdot 10^{-12} x^2 - 0,4787 \cdot 10^{-9} x + 0,8816;$$

– для $w_4=1,5$

$$\beta(w_4 = 1,5; x, z) = \sum_{i=0}^3 b_i(x)z^i, \quad (3.77)$$

де

$$b_0(x) = 1,25 \cdot 10^{-6} x^2 - 0,01114x + 34,903;$$

$$b_1(x) = -20,313 \cdot 10^{-9} x^2 + 0,3235 \cdot 10^{-3} x + 0,4244;$$

$$b_2(x) = 0,14063 \cdot 10^{-9} x^2 - 1,391 \cdot 10^{-6} x - 1,08 \cdot 10^{-3};$$

$$b_3(x) = -0,35 \cdot 10^{-12} x^2 + 2,208 \cdot 10^{-9} x + 1,1178 \cdot 10^{-6}.$$

Зауважимо, що при $w_4=0,5$ (рис. 3.39) наявний дещо відмінний від рис. 3.37, для якого $w_4=1$, характер змінювання кута β .

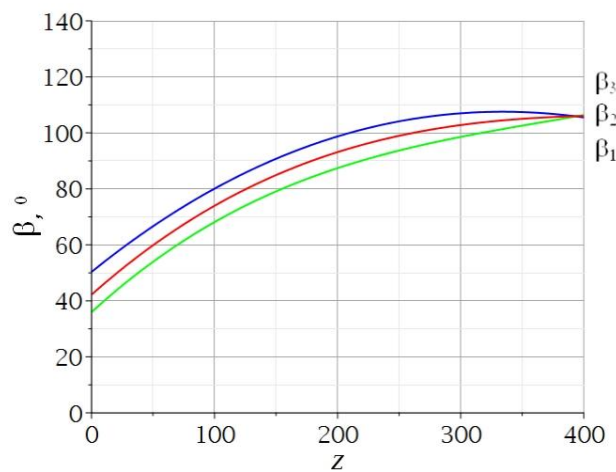
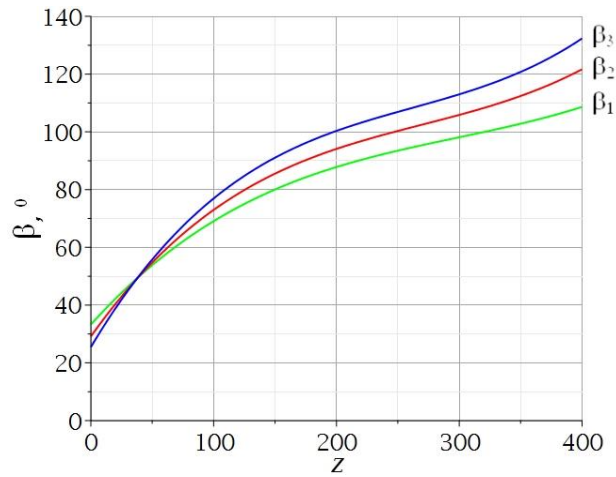


Рис. 3.39. Кут β для дистанцій

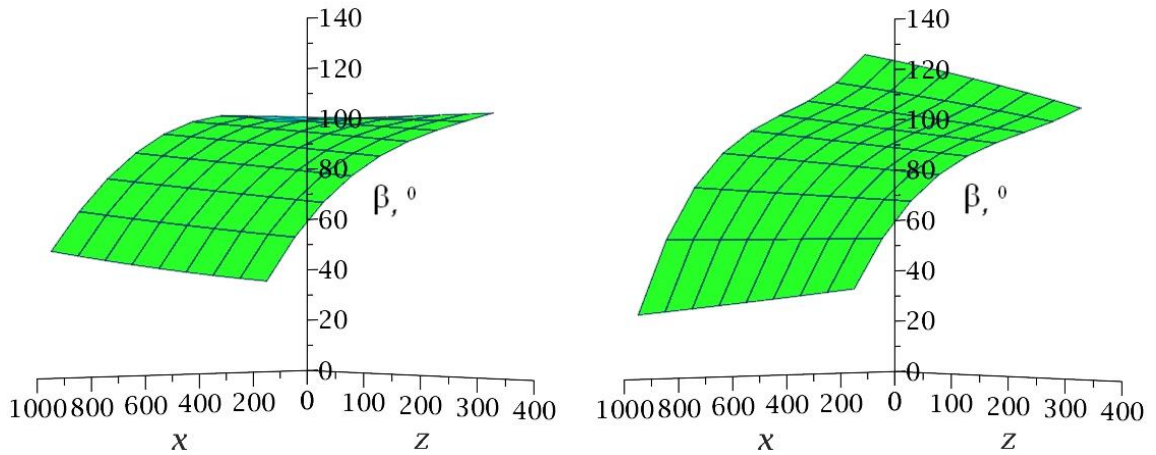
$x_1=150$ мм, $x_2=550$ мм, $x_3=950$ мм при $w_4=0,5$

Для $w_4=1,5$ маємо рис. 3.40.

Рис. 3.40. Кут β для дистанцій

$x_1=150$ мм, $x_2=550$ мм, $x_3=950$ мм при $w_4=1,5$

Графіки залежностей (3.76) і (3.77) показано на рис. 3.41.

Рис. 3.41. Змінювання кута β для випадку $w_4=0,5$ та $w_4=1,5$

Тоді, маємо

$$\beta(w_4, x, z) = \sum_{i=0}^3 b_i(w_4, x) z^i, \quad (3.78)$$

де

$$b_0(w_4, x) = c_{2_0}(w_4)x^2 + c_{1_0}(w_4)x + c_{0_0}(w_4),$$

$$b_1(w_4, x) = c_{2_1}(w_4)x^2 + c_{1_1}(w_4)x + c_{0_1}(w_4),$$

$$b_2(w_4, x) = c_{2_2}(w_4)x^2 + c_{1_2}(w_4)x + c_{0_2}(w_4),$$

$$b_3(w_4, x) = c_{2_3}(w_4)x^2 + c_{1_3}(w_4)x + c_{0_3}(w_4),$$

$$c_{20}(w_4) = 14,9 \cdot 10^{-6} w_4^2 - 34,38 \cdot 10^{-6} w_4 + 19,29 \cdot 10^{-6}; \quad c_{10}(w_4) = 3,196 \cdot 10^{-3} w_4^2 - 0,0291 w_4 + 0,0254;$$

$$c_{00}(w_4) = 0,166 w_4^2 + 0,511 w_4 + 33,763;$$

$$c_{21}(w_4) = -0,278 \cdot 10^{-6} w_4^2 - 0,611 \cdot 10^{-6} w_4 - 0,311 \cdot 10^{-6}; \quad c_{11}(w_4) = 0,143 \cdot 10^{-3} w_4^2 + 14,6 \cdot 10^{-6} w_4 - 20,6 \cdot 10^{-6};$$

$$c_{01}(w_4) = -0,0372 w_4^2 + 0,0978 w_4 + 0,3614;$$

$$c_{22}(w_4) = 1,381 \cdot 10^{-9} w_4^2 - 2,904 \cdot 10^{-9} w_4 + 1,388 \cdot 10^{-9}; \quad c_{12}(w_4) = -1,292 \cdot 10^{-6} w_4^2 + 1,129 \cdot 10^{-6} w_4 - 0,1786 \cdot 10^{-6};$$

$$c_{02}(w_4) = 2,72 \cdot 10^{-3} w_4^2 - 0,72 \cdot 10^{-3} w_4 - 0,612 \cdot 10^{-3};$$

$$c_{23}(w_4) = -2,133 \cdot 10^{-12} w_4^2 + 4,26 \cdot 10^{-12} w_4 - 1,94 \cdot 10^{-12}; \quad c_{13}(w_4) = 2,367 \cdot 10^{-9} w_4^2 - 2,048 \cdot 10^{-9} w_4 - 0,047 \cdot 10^{-9};$$

$$c_{03}(w_4) = -0,4452 \cdot 10^{-6} w_4^2 + 1,127 \cdot 10^{-6} w_4 + 0,4296 \cdot 10^{-6}.$$

Рис. 3.42 ілюструє отримані співвідношення, що з позицій геометрії являють собою тривимірний об'єкт у просторі координат (x, z, β) з параметрами $x \in [150 \text{ мм}; 950 \text{ мм}]$, $z \in [0 \text{ мм}; 400 \text{ мм}]$, $w_4 \in [0,5; 1,5]$. На вказаному зображенні дану фігуру відтворено поверхнями, дві з них габаритні, а одна – проміжна. За аналогією з проаналізованим кутом β , змінювання якого узагальнено від рис. 3.38 (окрема поверхня) до рис. 3.42 (тривимірний об'єкт), виконуються подібні дії і для поверхні на рис. 3.36 стосовно кута α розпушування ґрунту.

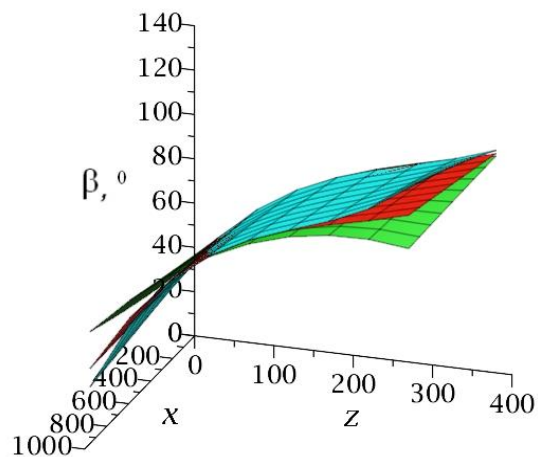


Рис. 3.42. Кут β згідно з виразом (3.78)

Акцентуємо важливий для теорії та практики, особливо в суміжних із геометрією прикладних спеціалізованих дисциплінах, наступний момент щодо автоматизованого опрацювання технічної продукції взагалі та ґрунтообробних знарядь зокрема. Маючи математичний об'єкт відносно великої вимірності, з

нього можна одержати бажану інформацію накладанням певних обмежень. Дане судження лежить також в основі запропонованого способу зменшення області проєктних розв'язків, див. пункт 2.2.2 дисертації. Проілюструємо це на конкретному прикладі (3.78).

Нехай фіксуємо $w_4=1$, обираємо дискретну множину $z=(z_1, z_2, z_3)=(100, 200, 300)$. Тоді отримуємо для визначених висот z три потрібні залежності:

$$\beta_1(x) = 0,8419 \cdot 10^{-6} \cdot x^2 + 0,0100141 \cdot x + 64,15; \quad (3.79)$$

$$\beta_2(x) = 0,2987 \cdot 10^{-6} \cdot x^2 + 0,015414 \cdot x + 85,33; \quad (3.80)$$

$$\beta_3(x) = -0,7017 \cdot 10^{-6} \cdot x^2 + 0,017267 \cdot x + 95,64. \quad (3.81)$$

Графіки функцій (3.79) ... (3.81) показано на рис. 3.43. Тепер ми маємо відомості про змінювання кута β обертання ґрунту на досліджуваних висотах z уздовж осі x відвала плуга, яка протилежна напрямку руху останнього під час обробітку землі.

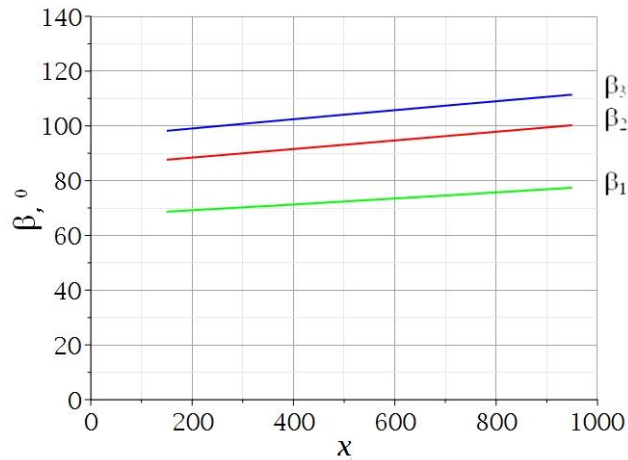


Рис. 3.43. Кут β для висот

$z_1=100$ мм, $z_2=200$ мм, $z_3=300$ мм при $w_4=1$

Зрозуміло, що подібні вирази можна обчислити, наприклад, для $w_4=0,5$ або $w_4=1,5$, інших висот z тощо, здійснити проаналізованим вище шляхом перехід від окремих ліній до необхідних поверхонь і геометричних тіл.

Але зараз розглянемо подальше узагальнення формули (3.78) до вигляду

$$\beta(\hat{w}_3, w_4, x, z), \quad (3.82)$$

де $\hat{w}_3 = (w_{3_1}, w_{3_2}, w_{3_3}) = (0,5; 1; 1,5)$.

Акцентуємо, що для $w_{32}=1$ уже маємо співвідношення (3.78). Рис. 3.44 ілюструє випадок

$$\beta(w_3 = w_{31} = 0,5; w_4; x; z), \quad (3.83)$$

де $w_4 \in [0,5; 1,5]$, $x \in [150; 950]$, $z \in [0; 400]$.

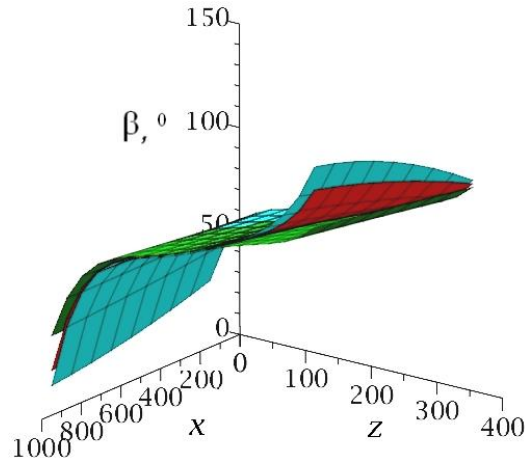


Рис. 3.44. Кут β для $w_{31}=0,5$

Необхідні математичні вирази для залежності (3.83) містить приклад А.12 додатків. Зауважимо, в ньому для апроксимації точок уздовж осі z використано поліноми п'ятого степеня, для інтерполяції ліній уздовж осі x і поверхонь для параметра w_4 – квадратичні. Обрання цих функцій обумовлено конкретними умовами геометричного моделювання. Як зазначалось вище, в загальному випадку можуть застосовуватися й інші аналітичні засоби.

На рис. 3.45 показано зображення для співвідношення

$$\beta(w_3 = w_{33} = 1,5; w_4; x; z), \quad (3.84)$$

де $w_4 \in [0,5; 1,5]$, $x \in [150; 950]$, $z \in [0; 400]$.

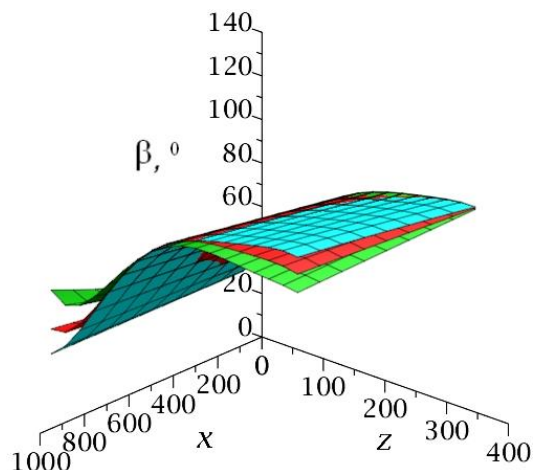


Рис. 3.45. Кут β для $w_{33}=1,5$

Його отримано за поданою вище методикою. Математичний опис залежності (3.84) наведено у прикладі А.13 додатків.

Отже, вираз (3.82) розкрито за допомогою формул (3.83), (3.78) та (3.84). Зрозуміло, що за аналогією будуються моделі вигляду

$$\beta(\hat{w}_4, w_3, x, z), \quad (3.85)$$

де $\hat{w}_4 = (w_{4_1}, w_{4_2}, w_{4_3}) = (0,5; 1; 1,5)$, тощо.

Співвідношення (3.78) ... (3.85) слугують практичною ілюстрацією загальних положень (2.1) та використання способу зменшення області проєктних розв'язків для ґрунтообробних знарядь. В останньому разі це стосується дефініції потрібного характеру змінювання кута β обертання ґрунту поверхнею відвала плуга. Проаналізованими шляхами є два варіанти (3.82) і (3.85) поступового зменшення області проєктних розв'язків. Після їхнього опрацювання визначаються, зокрема, більш конкретні діапазони варіювання величин w_3, w_4, x, z , які можуть уточнюватися здійсненням необхідних ітерацій. Ці значення застосовуються надалі для конструювання відвалів плугів.

За докладно розібраною схемою (3.67) ... (3.85) дослідження поверхні рис. 3.6 виконується належне геометричне моделювання й фігури рис. 3.7.

Поверхні коноїдальні та гіперболічних параболоїдів

На поточний момент висвітлено базові положення запропонованого підходу до аналізу змінювання кутів розпушення α , обертання β і зсуву γ ґрунту циліндричними та циліндроїдальними відвалами плугів. Вище акцентувалось, що коноїдальні поверхні та гіперболічних параболоїдів обмежено розповсюджені на практиці. Оскільки викладена вище методика достатньо інваріантна до вказаних фігур та у зв'язку з обмеженим обсягом дисертації зазначений матеріал тут не викладається.

Гелікоїдальні поверхні

Дана частина праці містить короткі відомості стосовно вказаних геометричних об'єктів із метою формування цілісного уявлення про розроблені

теоретичні поверхні відвалів плугів. Для прикладу обрано фігуру, показану на рис. 3.13. Наступне зображення ілюструє змінювання вздовж осі x кута β обертання ґрунту.

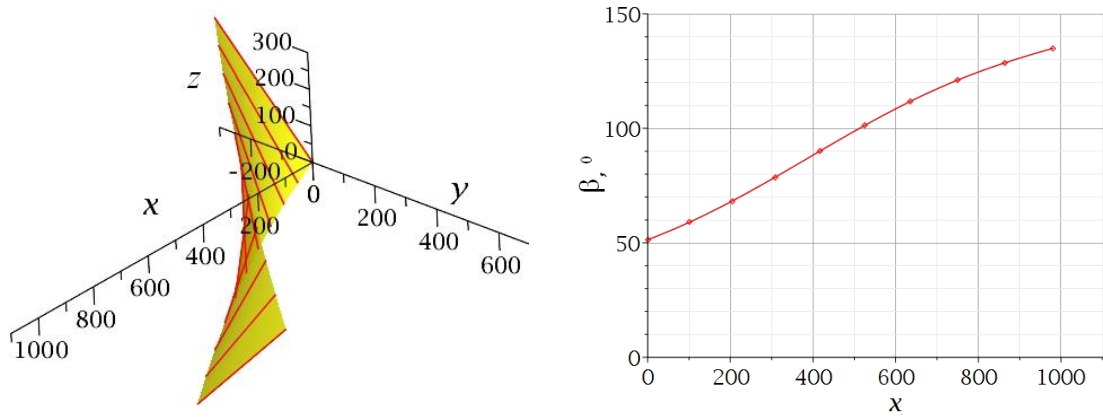


Рис. 3.46. Кут β обертання ґрунту для поверхні рис. 3.13

На рис. 3.47 і рис. 3.48 показані результати розрахунків кута γ зсуву ґрунту, виконані для осі x .

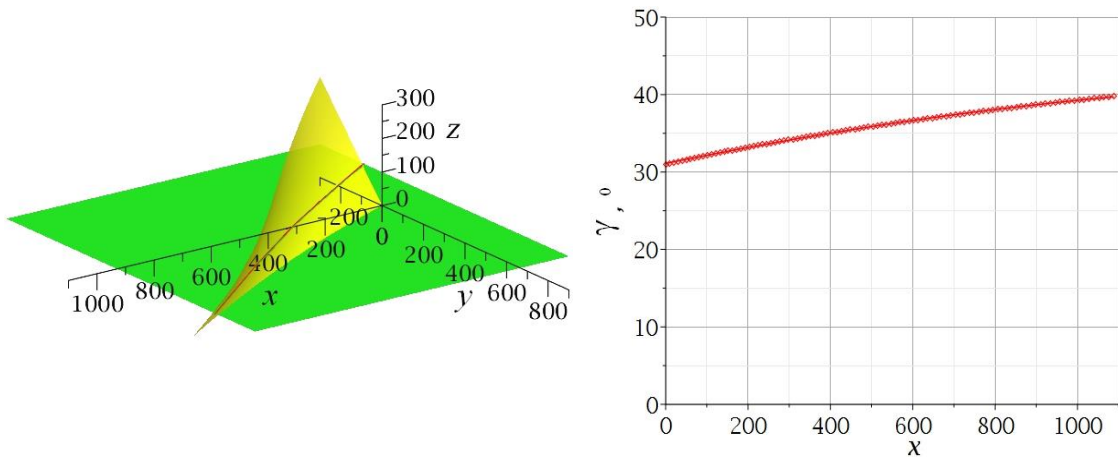


Рис. 3.47. Змінювання кута γ у площині $z=100$ мм

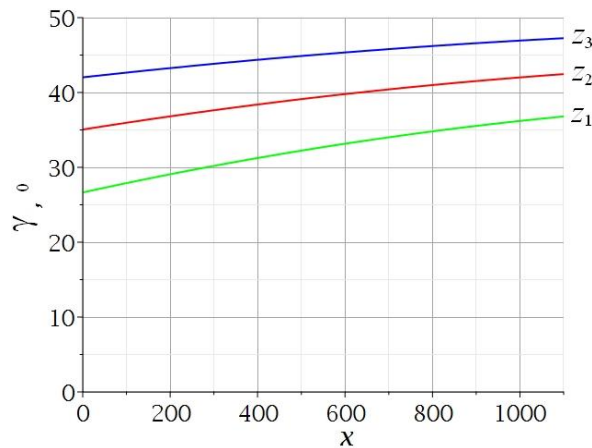


Рис. 3.48. Кут γ для висот

$z_1=50$ мм, $z_2=150$ мм, $z_3=350$ мм

На рис. 3.49 наведені результати обчислень кута α розпушування ґрунту, здійснені для осі x .

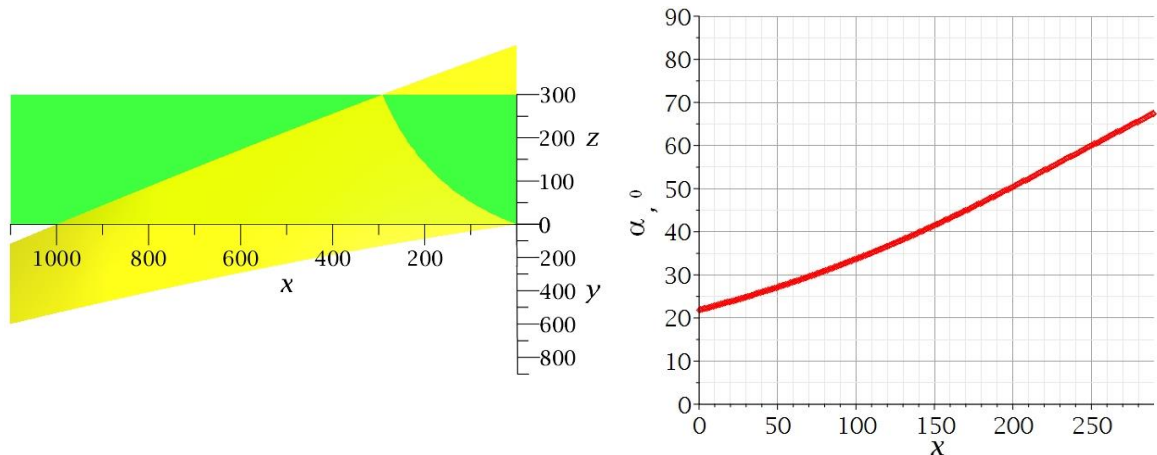


Рис. 3.49. Змінювання кута α у площині $y=0$ мм

Узагальнення поданих у вигляді ліній залежностей поверхнями, тілами та багатовимірними фігурами викладено в попередній частині дисертації щодо циліндроїдальних поверхонь відвалів плугів.

Таким чином, у цьому пункті дослідження висвітлено методику формування математичних залежностей, які описують такі важливі для полицевих ґрунтообробних знарядь характеристики, як змінювання вздовж поверхонь відвалів плугів кутів розпушення α , обертання β та зсуву γ ґрунту. Зазначені засоби пристосовані для реалізації в середовищі сучасних комп'ютерних інформаційних технологій. На їхньому прикладі проілюстровано практичне застосування способу зменшення області проєктних розв'язків. Акцентовано орієнтацію розробленого геометричного апарату для інтегрованого комплексного використання іншими суміжними дисциплінами, зокрема, ґрунтообробною механікою.

3.2.3. Приклади конструкційних моделей

Після визначення основних початкових розрахункових параметрів поверхонь плугів наступною стадією проєктування є дефініція їхньої конструкції. Деяким аспектам даного питання присвячено цей пункт дисертації. Як видно з поданих вище відомостей, створення варіантів теоретичних поверхонь є практично необмеженим, особливо якщо для цього застосовувати

спеціалізовані програмні засоби автоматизованого генерування потрібних різновидів. Продуктивний аналіз більшого їхнього числа сприяє впевненості у знаходженні кращого з них. Унаслідок цього підвищується якість ґрунтообробних знарядь. Наведені факти засвідчують доволі загальний та універсальний характер запропонованого підходу, його наукову і практичну значущість.

Напрацьовані вище варіанти поверхонь відвалів слугують для попередньої дефініції найбільш перспективних різновидів, які надалі уточнюються проведенням додаткових розрахунків, комп'ютерних і натурних експериментів. З геометричної точки зору це стосується конструкційних обводів відвалів, див. рис. 3.50, та побудови належних віртуальних твердотільних об'єктів шляхом надання поверхням потрібної товщини (рис. 3.51).

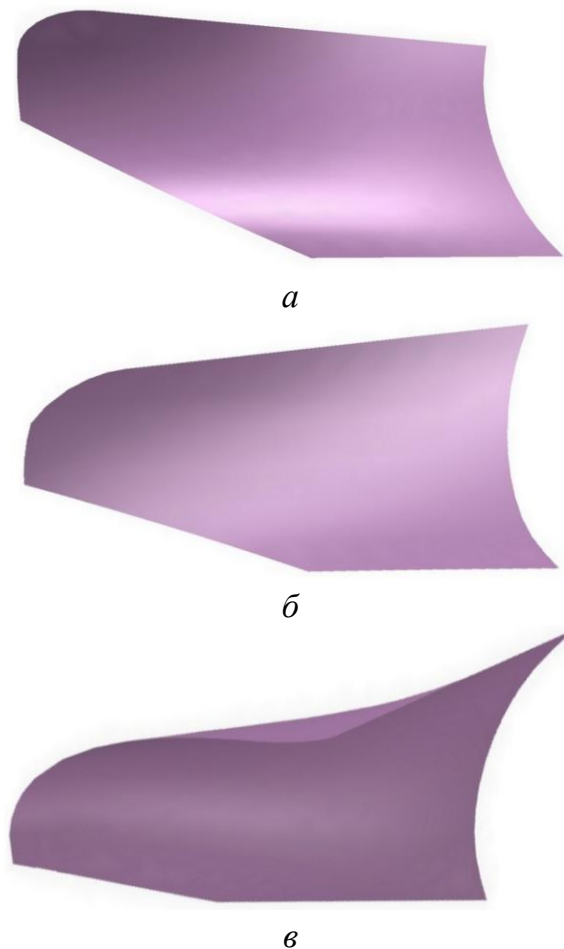


Рис. 3.50. Формування конструкційних обводів поверхонь відвалів плугів

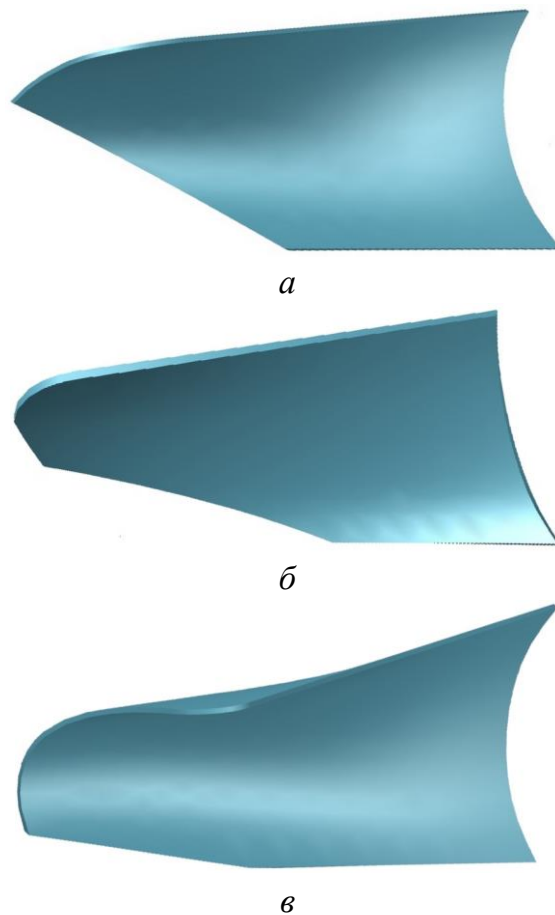


Рис. 3.51. Комп'ютерні твердотільні моделі



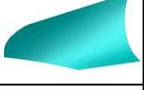

У першому випадку формуються раціональні обрізи низу та заокруглення верху відвалу. Середня висота корпусу плуга, разом із доданим у нижній частині лемешем, повинна приблизно дорівнювати ширині захвату останнього. Важливий похилий прямолінійний нижній обріз, що при функціонуванні плуга привалює зрізаний пласт на попередній. Нахил цієї лінії треба забезпечувати в діапазоні найбільш застосовуваних теоретичних кутів відвалювання пластів ґрунту. Нагадаємо, що синус останніх є відношенням глибини оранки до ширини захвату корпусу плуга.

У другому випадку також існує певна множина проєктних різновидів, пов'язаних не тільки з товщиною, а й доцільним вибором матеріалу плуга, його конструкційними, виробничими, експлуатаційними та іншими властивостями. Окреслені задачі виходять за межі тематики даного дослідження. Зазначені питання стосуються розрахунків на міцність методом скінченних елементів, дефініції технологічних напружень при виготовленні відвалів тиском, визначення діючих на них зусиль під час експлуатації і т. д. На всіх

перерахованих стадіях життєвого циклу плугів із ними нерозривно пов'язана їхня геометрія, яка суттєво впливає на велику кількість багатьох чинників. Тому пошук раціональних параметрів форми та розмірів становить одну з базових складових комплексної оптимізації ґрунтообробних знарядь. Важливим компонентом в окресленому процесі є гнучкі, продуктивні, ефективно керовані комп'ютерні варіантні геометричні моделі, які розглянуто вище.

Стисло, в аспекті забезпечення належної інтеграції та комплексного підходу до автоматизованого проєктування ґрунтообробних знарядь, надамо приклад експертного оцінювання техніко-економічних та інших показників опрацьовуваних відвалів плугів.

Необхідні розрахунки виконуються в електронних таблицях Microsoft Excel, див. рис. 3.52.

| № | Відвал | Площа S | Товщина δ | Об'єм V | Низьколеговані сталі | | | | Високолеговані сталі | | | | Варіанти | | | | Варіанти | | | |
|-----|---|------------|--------------|------------|----------------------|----------|--------|----------|----------------------|----------|------|----------|--------------------------|------|------|------|------------------------------|------|------|------|
| | | | | | 09Г2С | | 16Г2АФ | | Х120Мn12 | | 65Г | | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| | | | | | Маса | Вартість | Маса | Вартість | Маса | Вартість | Маса | Вартість | Середня експертна оцінка | | | | Інтегральний показник витрат | | | |
| | | | | | кг | грн | кг | грн | кг | грн | кг | грн | бал | бал | бал | бал | грн | грн | грн | грн |
| 1.1 |  | 0,664793 | 0,006 | 0,003989 | 31,4 | 1538 | 31,5 | 1292 | 31,4 | 2888 | 31,3 | 3757 | 0,54 | 0,55 | 0,88 | 0,92 | 2849 | 2349 | 3282 | 4084 |
| 1.2 | | 0,664793 | 0,007 | 0,004654 | 36,6 | 1795 | 36,8 | 1507 | 36,6 | 3369 | 36,5 | 4384 | 0,56 | 0,55 | 0,85 | 0,94 | 3205 | 2741 | 3964 | 4663 |
| 1.3 | | 0,664793 | 0,008 | 0,005318 | 41,9 | 2051 | 42,0 | 1723 | 41,9 | 3851 | 41,7 | 5010 | 0,83 | 0,70 | 0,80 | 0,93 | 2471 | 2461 | 4813 | 5387 |
| 1.4 | | 0,664793 | 0,009 | 0,005983 | 47,1 | 2308 | 47,3 | 1938 | 47,1 | 4332 | 47,0 | 5636 | 0,75 | 0,75 | 0,95 | 0,94 | 3077 | 2584 | 4560 | 5996 |
| 2.1 |  | 0,530533 | 0,006 | 0,003183 | 25,1 | 1228 | 25,1 | 1031 | 25,1 | 2305 | 25,0 | 2999 | 0,73 | 0,63 | 0,80 | 0,87 | 1682 | 1637 | 2881 | 3447 |
| 2.2 | | 0,530533 | 0,007 | 0,003714 | 29,2 | 1432 | 29,3 | 1203 | 29,2 | 2689 | 29,2 | 3498 | 0,65 | 0,55 | 0,79 | 0,92 | 2204 | 2187 | 3404 | 3803 |
| 2.3 | | 0,530533 | 0,008 | 0,004244 | 33,4 | 1637 | 33,5 | 1375 | 33,4 | 3073 | 33,3 | 3998 | 0,80 | 0,61 | 0,84 | 0,84 | 2046 | 2254 | 3658 | 4760 |
| 2.4 | | 0,530533 | 0,009 | 0,004775 | 37,6 | 1842 | 37,7 | 1547 | 37,6 | 3457 | 37,5 | 4498 | 0,76 | 0,70 | 0,74 | 0,94 | 2423 | 2209 | 4672 | 4785 |
| 3.1 |  | 0,521929 | 0,006 | 0,003132 | 24,6 | 1208 | 24,7 | 1014 | 24,6 | 2267 | 24,6 | 2950 | 0,67 | 0,56 | 0,80 | 0,90 | 1803 | 1811 | 2834 | 3278 |
| 3.2 | | 0,521929 | 0,007 | 0,003654 | 28,8 | 1409 | 28,9 | 1183 | 28,8 | 2645 | 28,7 | 3442 | 0,61 | 0,55 | 0,87 | 0,89 | 2310 | 2152 | 3041 | 3867 |
| 3.3 | | 0,521929 | 0,008 | 0,004175 | 32,9 | 1610 | 33,0 | 1352 | 32,9 | 3023 | 32,8 | 3933 | 0,65 | 0,70 | 0,73 | 0,92 | 2478 | 1932 | 4141 | 4275 |
| 3.4 | | 0,521929 | 0,009 | 0,004697 | 37,0 | 1812 | 37,1 | 1521 | 37,0 | 3401 | 36,9 | 4425 | 0,73 | 0,72 | 0,88 | 0,89 | 2482 | 2113 | 3865 | 4972 |
| 4.1 |  | 0,566345 | 0,006 | 0,003398 | 26,7 | 1311 | 26,8 | 1101 | 26,7 | 2460 | 26,7 | 3201 | 0,62 | 0,52 | 0,74 | 0,78 | 2114 | 2117 | 3325 | 4104 |
| 4.2 | | 0,566345 | 0,007 | 0,003964 | 31,2 | 1529 | 31,3 | 1284 | 31,2 | 2870 | 31,1 | 3734 | 0,69 | 0,59 | 0,87 | 0,84 | 2216 | 2176 | 3299 | 4446 |
| 4.3 | | 0,566345 | 0,008 | 0,004531 | 35,7 | 1747 | 35,8 | 1468 | 35,7 | 3280 | 35,6 | 4268 | 0,69 | 0,61 | 0,87 | 0,93 | 2532 | 2406 | 3771 | 4589 |
| 4.4 | | 0,566345 | 0,009 | 0,005097 | 40,1 | 1966 | 40,3 | 1651 | 40,1 | 3691 | 40,0 | 4801 | 0,71 | 0,68 | 0,88 | 0,97 | 2769 | 2428 | 4194 | 4950 |

| 09Г2С | | | Х120Мn12 | | |
|-------|-------|--------|----------|-------|--------|
| ρ | 7 871 | кг/м³ | ρ | 7 870 | кг/м³ |
| ц | 49,00 | грн/кг | ц | 92,00 | грн/кг |

| 16Г2АФ | | | 65Г | | |
|--------|-------|--------|-----|--------|--------|
| ρ | 7 900 | кг/м³ | ρ | 7 850 | кг/м³ |
| ц | 41,00 | грн/кг | ц | 120,00 | грн/кг |

Рис. 3.52. Експертне оцінювання техніко-економічних показників проєктованих варіантів відвалів плугів

Вихідними даними для обчислень є чотири типи відвалів

$$ВДВЛ = (ВДВЛ_i)_{i=1}^{N_{ВДВЛ}} = (ВДВЛ_i)_{i=1}^4, \quad (3.86)$$

які сформовані на основі певних теоретичних поверхонь із виконаними

обрізами їхніх контурів. Множина площ цих фігур

$$S = (S_i)_{i=1}^{N_{ВДВЛ}} = (S_i)_{i=1}^4. \quad (3.87)$$

Нехай існує можливість реалізації кожного виробу товщиною

$$\delta = (\delta_j)_{j=1}^{N_\delta} = (\delta_j)_{j=1}^4 = (6; 7; 8; 9) \text{ мм} \quad (3.88)$$

та з матеріалу

$$M = (M_k)_{k=1}^{N_M} = (M_k)_{k=1}^4 = (09Г2С, 16Г2АФ, Х120Мn12, 65Г), \quad (3.89)$$

де перші два відносяться до низьколегованих сталей, а решта – до високолегованих.

Тому кожний варіант відвалу позначається трьома числами, розділеними крапкою. Перше становить номер i -ї поверхні, наступне – j -ту товщину матеріалу, останнє – його k -й вид. У таблиці рис. 3.52 два початкових числа відповідають рядку даних, третє – належним стовпцям. Кількість варіантів відвалів, які аналізуються, становить

$$N_{вар \ ВДВЛ} = N_{ВДВЛ} \cdot N_\delta \cdot N_M = 4 \cdot 4 \cdot 4 = 64. \quad (3.90)$$

Бачимо, що акцентована необхідність ефективного здійснення автоматизованого формоутворення потребує розроблення нових підходів, зокрема стосовно опрацювання великих груп модельованих технічних об'єктів. Певною мірою в дисертації це реалізовано завдяки запропонованому способу інтегрованих класифікацій.

Кожен із конструкційних матеріалів (3.89) характеризується фізичною (густиною ρ) та економічною (ціною u) властивістю.

Застосування поданої таблиці виконуються так. За внесеними площами варіантів відвалів та товщиною матеріалу розраховується об'єми

$$V_{i,j} = S_i \cdot \delta_j, \quad (3.91)$$

де $i \in 1, \dots, N_{ВДВЛ}$; $j \in 1, \dots, N_\delta$.

Після цього обчислюються маси виробів

$$m_{i,j,k} = V_{i,j} \cdot \rho_k, \quad (3.92)$$

де $k \in 1, \dots, N_M$.

Далі визначається їхня вартість

$$B_{i,j,k} = m_{i,j,k} \cdot u_k, \quad (3.93)$$

де $k \in 1, \dots, N_M$.

Зрозуміло, що обрання раціонального різновиду відвалу з множини (3.93) тільки за критерієм мінімальної вартості є неправильним. Потрібно враховувати як ці фінансові вкладення позначаються на міцності, надійності, ресурсі, собівартості виготовлення та експлуатації, охоплюваній номенклатурі сільськогосподарських технологічних операцій обробітку ґрунту і т. д. Наведені питання виходять за межі завдань даного наукового дослідження. Один із шляхів відносно простого вирішення окресленого питання полягає у використанні методу експертних оцінок.

У нашому випадку кожен із $N_{екс}$ таких фахівців характеризує всі варіанти проєктованих відвалів. Унаслідок цього формується множина експертних оцінок

$$EOЦ = (eou_{i,j,k,n})_{i=1}^{N_{ВДВЛ}}, \quad N_{\delta}, \quad N_M, \quad N_{екс}, \quad n=1, \quad (3.94)$$

де

$$0 < eou_{i,j,k,n} \leq 1. \quad (3.95)$$

Далі кожен різновид отримує своє середнє значення

$$Ceou_{i,j,k} = \frac{\sum_{n=1}^{N_{екс}} eou_{i,j,k,n}}{N_{екс}}, \quad (3.96)$$

яке вноситься в належну комірку електронної таблиці.

Завершальний момент обчислень полягає в перерахунку початкових вартостей (3.93), з узяттям до уваги думки експертів щодо комплексного оцінювання проєктованих виробів, в інтегровані показники витрат за формулою

$$IPB_{i,j,k} = \frac{B_{i,j,k}}{C_{eoc}_{i,j,k}}, \quad (3.97)$$

де $i \in 1, \dots, N_{ВДВЛ}$; $j \in 1, \dots, N_{\delta}$; $k \in 1, \dots, N_M$.

Вираз (3.97) свідчить, що меншій величині знаменника відповідає зростання інтегрованого показника витрат. Тобто зниження середньої експертної оцінки призводить до дії, еквівалентної збільшенню вартості. Отже, серед останніх значень кращі варіанти відвалів характеризуються меншими сумами у гривнях. У випадку, що аналізується, для чотирьох різновидів поверхонь це

$$B_{1,1,2} = 2349 \text{ грн}, B_{2,1,2} = 1637 \text{ грн}, B_{3,1,1} = 1803 \text{ грн}, B_{4,1,1} = 2114 \text{ грн}. \quad (3.98)$$

Результати (3.98) значним чином обумовлені порівняно низькою нинішньою ціною матеріалів $M_1=09Г2С$, $M_2=16Г2АФ$ та відносно задовільною їхньою функціональною якістю. Однак, із часом викладена ситуація може й змінитися на користь високолегованих сталей або інших наявних конкретних обставин.

На завершення опису експертного оцінювання техніко-економічних показників відвалів плугів зазначимо, що наведені формули (3.86) ... (3.98) доволі просто реалізуються в середовищі електронних таблиць Microsoft Excel. Також акцентуємо пристосованість викладеного підходу до зручного здійснення оперативних коригувань поточної проєктної інформації.

Заключний етап автоматизованого конструювання полягає в побудові реалістичних комп'ютерних твердотільних деталей і складаних одиниць (рис. 3.53), більш докладне відпрацювання на них технологій виготовлення та експлуатації сільськогосподарської техніки. Тут постає актуальною задача взаємного оптимального комбінаторного поєднання поміж собою як окремих компонентів, так і різних процесів, пов'язаних із ними. Це стосується не тільки техніко-економічних, а й ергономічних, екологічних та інших факторів. У даному разі корисною є запропонована методологія формоутворення, див. підрозділ 2.1, яка спирається на методологію структурно-параметричного моделювання.

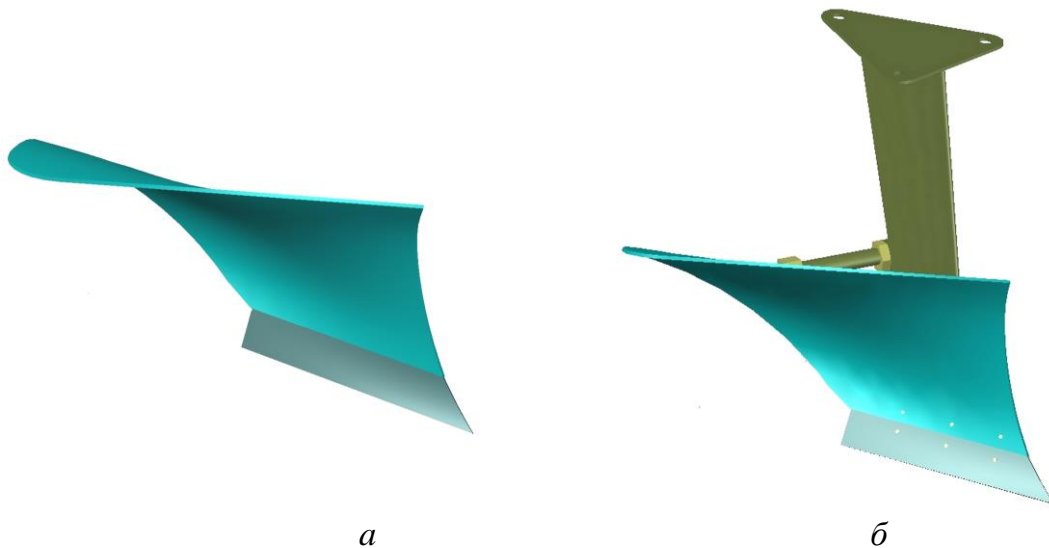


Рис. 3.53. Приклади комп'ютерних деталей і складаних одиниць з використанням поверхонь відвалу:
a – відвал і леміш; *б* – корпус плуга

Отже, в даному підрозділі дисертації, що присвячений автоматизованому формоутворенню таких ґрунтообробних знарядь як плуги, було розглянуто побудову різноманітних теоретичних поверхонь зазначених виробів на основі єдиної узагальненої геометричної моделі. Показано її гнучкість і пристосованість до реалізації комп'ютерними засобами. Значний акцент зроблено на аналіз змінювання кутів розпушення α , обертання β та зсуву γ ґрунту, які особливо важливі для належних сільськогосподарських технологічних процесів. Розглянуто конструювання відвалів плугів в аспекті реалізації інтегрованого комплексного автоматизованого проєктування промислових виробів.

Мета наступної частини виконаного наукового дослідження полягає в демонстрації можливості поширення напрацьованого підходу на інші, ніж плуги, ґрунтообробні знаряддя, а також деяких напрямків його подальшого вдосконалення.

3.3. Стрілчасті лапи

За наведеною у другому розділі дисертації загальною класифікацією ґрунтообробних знарядь стрілчасті лапи відносяться до засобів основного

обробітку ґрунту, див. елемент ΓZ_1 формули (2.24). Надалі становлять компонент чизельних культиваторів згідно з виразами (2.26) і (2.29).

Відомо, що проведення культивації ґрунту, як способу його суцільного або міжрядного обробітку, має відповідати агротехнічним вимогам за показниками кришення, розпушування, часткового переміщення та вирівнювання ґрунту, повного підрізання бур'янів. З цією метою на практиці й використовуються означені знаряддя.

3.3.1. Варіантне формоутворення робочих поверхонь

Основні геометричні параметри стрілкової лапи (СЛ) показано на рис. 3.54. У даному випадку останні ілюструють конкретні значення загальної формули (2.1). При цьому використовуються неперервні величини.

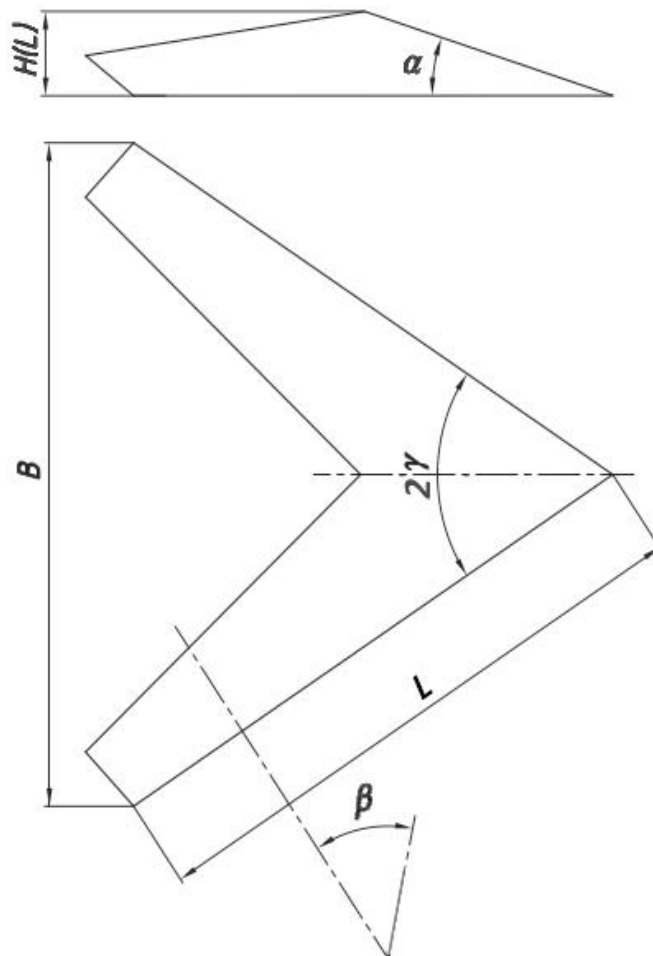


Рис. 3.54. Геометричні параметри лапи

Склад зазначених параметрів описується множиною

$$P_{СЛ} = (P_{СЛ_i})_1^{N_{P_{СЛ}}} = (P_{СЛ_i})_1^6 = (\alpha, \beta, 2\gamma, B, L, H(L)), \quad (3.99)$$

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

Згідно зі своїм призначенням опрацьовувані лапи поділяються на плоскорізальні (ПЛ) та універсальні (УЛ)

$$СЛ = (ПЛ, УЛ). \quad (3.100)$$

Наступні вирази визначають орієнтовні проміжки змінювання наведених у формулі (3.99) параметрів для плоскорізальних та універсальних лап

$$P_{ПЛ1} = \alpha = [5^0 \dots 9^0], P_{ПЛ2} = \beta = [10^0 \dots 22^0], P_{ПЛ3} = 2\gamma = [60^0 \dots 70^0], \\ P_{ПЛ4} = B = [140 \text{ мм} \dots 260 \text{ мм}], P_{ПЛ5} = L = [120 \text{ мм} \dots 210 \text{ мм}]; \quad (3.101)$$

$$P_{УЛ1} = \alpha = [11^0 \dots 18^0], P_{УЛ2} = \beta = [18^0 \dots 30^0], P_{УЛ3} = 2\gamma = [60^0 \dots 70^0], \\ P_{УЛ4} = B = [220 \text{ мм} \dots 410 \text{ мм}], P_{УЛ5} = L = [240 \text{ мм} \dots 350 \text{ мм}]. \quad (3.102)$$

Для покращення технологічних показників обробітку ґрунту крім стрілочастих лап із прямолінійними обводами за певних умов доцільно мати також і криволінійні контури. Відповідні різновиди проілюстровано на рис. 3.55 штриховими лініями.

Одним із шляхів геометричного моделювання робочих поверхонь поданих лап може бути запропонована в підрозділі 3.1 узагальнена модель формоутворення на засадах методу Кунса. Її використання для комп'ютерного варіантного моделювання відвалів плугів проілюстровано вище. Як і в попередньому випадку за належні обмежуючі лінії застосовуватимемо криві другого порядку (2.45), завдяки їхній гнучкості та прогнозованості, у векторному параметричному вигляді.

Проектні варіанти теоретичних поверхонь стрілочастих лап відтворюються множинами

$$ТП_{СЛ} = (ТП_{СЛ_n})_{n=1}^{N_{ТП_{СЛ}}}. \quad (3.103)$$

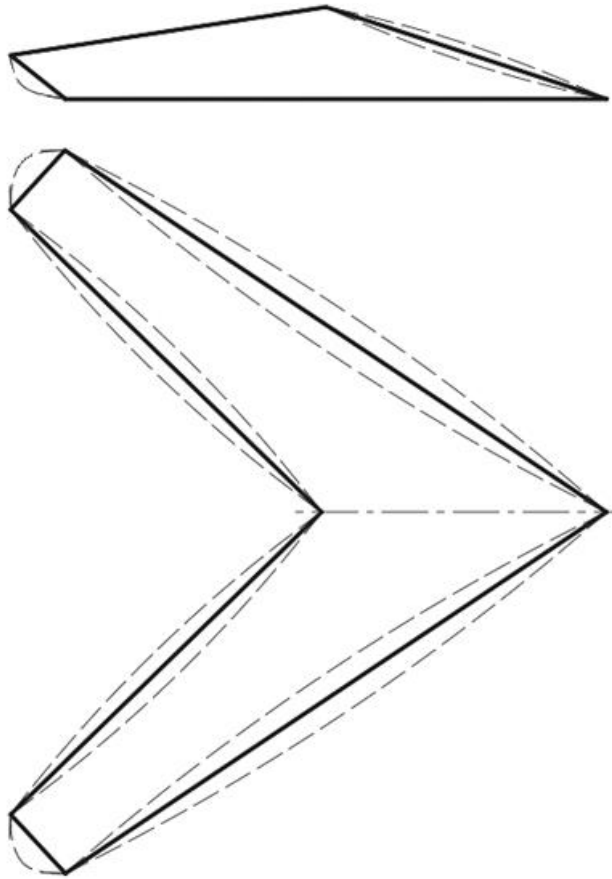


Рис. 3.55. Варіанти обводів стрілочастих лап

Оскільки лапи мають поздовжню вертикальну площину симетрії, то надалі математично описуватимемо тільки одну їхню сторону. Інша отримується операцією симетрії. Зауважимо, що в загальному випадку половина стрілчастої лапи подається кількома поверхнями Кунса

$$ТП_{СЛ_n} = (ТП_{СЛ_{n_k}})_{k=1}^{N_{ТП_{СЛ_n}}}, \quad (3.104)$$

де кожен елемент визначається виразом

$$\begin{aligned} ТП_{СЛ_{n_k}}(u, v) &= (1-v)\mathbf{r}_{i,j}(u) + v\mathbf{r}_{i,j+1}(u) + (1-u)\mathbf{r}_{i,j}(v) + u\mathbf{r}_{i+1,j}(v) - \\ &- (1-v)(1-u)\mathbf{r}_{i,j} - (1-v)u\mathbf{r}_{i+1,j} - v(1-u)\mathbf{r}_{i,j+1} - v u \mathbf{r}_{i+1,j+1}, \\ u &= [0, 1], \quad v = [0, 1], \quad i = 0 \dots N_i - 1, \quad j = N_j - 1, \end{aligned} \quad (3.105)$$

N_i та $N_j = 1$ – число сегментів Кунса вздовж довжини L та висоти H лапи,

$$\mathbf{r}_{n,m}(t) = \frac{(1-t)^2 \mathbf{r}_{0,n,m} + w_{1,n,m} 2u(1-t)\mathbf{r}_{1,n,m} + t^2 \mathbf{r}_{2,n,m}}{(1-t)^2 + w_{1,n,m} 2u(1-t) + t^2}, \quad (3.106)$$

де для параметрів u та v формули (3.105) застосовано узагальнене позначення t ;

$\mathbf{r}_{n,m}(t)$ – радіус-вектор точок кривої другого порядку;

$\mathbf{r}_{0n,m}$, $\mathbf{r}_{1n,m}$, $\mathbf{r}_{2n,m}$ – радіус-вектори вершин характеристичного трикутника;

$w_{1n,m} \geq 0$ – ваговий коефіцієнт;

$n=0 \dots N_i$, $m=0 \dots N_j$.

Для моделювання нижнього та верхнього обводів лап використовується спосіб узагальненого контуру, викладений у пункті 2.2.3 дисертації. Гладкість за дотичними поверхонь Кунса реалізується належним стикуванням кривих другого порядку.

На підставі залежностей (3.99) ... (3.106) розглянемо кілька прикладів варіантного формоутворення теоретичних поверхонь стрілчастих лап.

Рис. 3.56 ілюструє різновид плоскорізальної лапи, побудований на основі узагальненої геометричної моделі, див. рис. 3.1, співвідношення (3.1), (3.2). Нагадаємо, що для центральних характеристичних точок та їхніх вагових коефіцієнтів ліній $\mathbf{R}_0(u)$, $\mathbf{R}_1(u)$, $\mathbf{S}_0(v)$, $\mathbf{S}_1(v)$ вживаються відповідно позначення (\mathbf{P}_1, w_1) , (\mathbf{P}_2, w_2) , (\mathbf{P}_3, w_3) та (\mathbf{P}_4, w_4) .

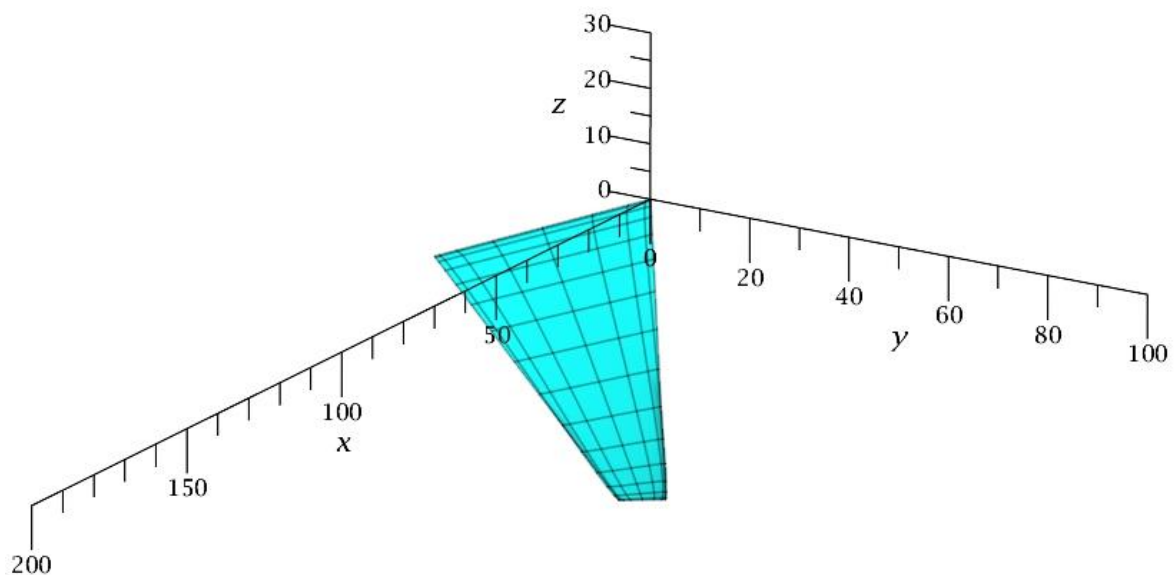


Рис. 3.56. Теоретична поверхня плоскорізальної лапи
на основі косої площини

При цьому застосовано наступні величини в міліметрах: $\mathbf{r}_{0,0}=(0; 0; 0)$, $\mathbf{r}_{0,1}=(140; 90; 0)$, $\mathbf{r}_{1,0}=(70; 0; 9)$, $\mathbf{r}_{1,1}=(155; 90; 4)$, $\mathbf{P}_1=(75; 100; 0)$, $\mathbf{P}_2=(150; 40; 5,25)$, $\mathbf{P}_3=(25; 0; 15)$, $\mathbf{P}_4=(200; 100; 15)$ та $w_1=w_2=w_3=w_4=0$, $u \in [0; 1]$, $v \in [0; 1]$.

Зазначимо, що оскільки всі вагові коефіцієнти дорівнюють нулю, то і вплив керуючих точок належний. Тому їхні координати обираються довільно. Комп'ютерну програму для вказаного формоутворення в системі математичних обчислень Maple подано в пункті А.2.2 додатків, приклад А.14.

Рівняння використаного гіперболічного параболоїда має вигляд

$$\mathbf{R}(u, v) = (1 - v)\mathbf{R}_0(u) + v\mathbf{R}_1(u). \quad (3.107)$$

Аналогічно викладкам (3.28) ... (3.31) із відмінністю тільки в тому, що замість паралельності твірних площині Oyz у цьому разі останні паралельні площині Oxz , отримуємо необхідну для цього вимогу

$$y_{1,0} = y_{0,0}; \quad y_{1,1} = y_{0,1}. \quad (3.108)$$

Умови (3.107) і (3.108) реалізовано наведеними вище даними. Проаналізуємо деякі аспекти відповідності побудованої поверхні обмеженням (3.101). Кут α входження у ґрунт дорівнює:

– у площині $y=0$ мм

$$\alpha = \arctg\left(\frac{z_{1,0} - z_{0,0}}{x_{1,0} - x_{0,0}}\right) \cdot 180/\pi^0 = \arctg\left(\frac{9-0}{70-0}\right) \cdot 180/\pi^0 \approx 7,33^0; \quad (3.109)$$

– у площині $y=90$ мм

$$\alpha = \arctg\left(\frac{z_{1,1} - z_{0,1}}{x_{1,1} - x_{0,1}}\right) \cdot 180/\pi^0 = \arctg\left(\frac{4-0}{155-140}\right) \cdot 180/\pi^0 \approx 14,93^0. \quad (3.110)$$

Подібним чином до розглянутого для відвалів плугів, див. пункт 3.2.2 дисертації, обчислюється змінювання кута α вздовж осі y . Це ж стосується й кута β кришення ґрунту, який більший за α . Кут 2γ розхилу лапи дорівнює

$$2\gamma = 2\arctg\left(\frac{y_{0,1} - y_{0,0}}{x_{0,1} - x_{0,0}}\right) \cdot 180/\pi^0 = 2\arctg\left(\frac{90-0}{140-1}\right) \cdot 180/\pi^0 \approx 65,47^0. \quad (3.111)$$

Ширина лапи

$$B = 2 \cdot y_{0,1} = 2 \cdot 90 \text{ мм} = 180 \text{ мм}. \quad (3.112)$$

Довжина ріжучого леза

$$L = \frac{x_{0,1}}{\cos \gamma} = \frac{140 \text{ мм}}{\cos 32,735^{\circ}} \approx 166,4 \text{ мм.} \quad (3.113)$$

Змінювання $H(L)$ висоти крила лапи в залежності від довжини ріжучого леза визначається аплікатами прямої, яка проходить через точки $\mathbf{r}_{1,0}$ та $\mathbf{r}_{1,1}$.

Отже, вирази (3.109) ... (3.113) свідчать, що умови (3.101) для плоскорізальної лапи, яка проектується, виконані. З рис. 3.56 і поданих співвідношень зрозуміле керування формою та розмірами проаналізованої фігури. Деякі відповідні різновиди показано на рис. 3.57.

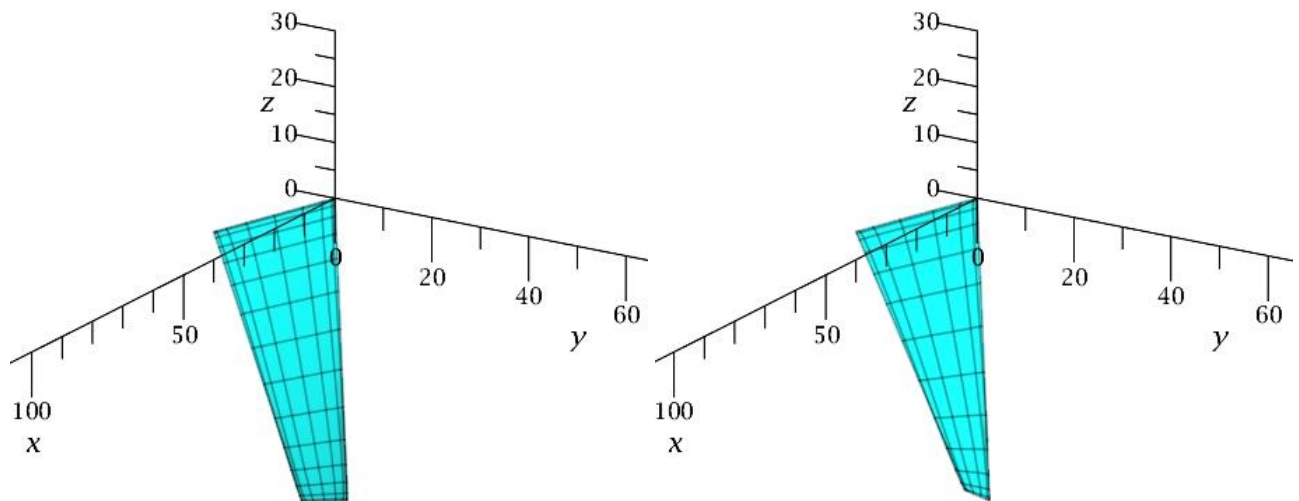


Рис. 3.57. Модифікації $\mathbf{r}_{1,0}=(40; 0; 5)$ та далі $\mathbf{r}_{1,1}=(140; 85; 1)$
поверхні плоскорізальної лапи

Програми системи Maple для створення цих поверхонь приведені в пункті А.2.2 додатків, приклад А.15 і приклад А.16.

Побудова універсальних лап (3.102) аналогічна викладеній вище для плоскорізальних. Деякі належні приклади ілюструє рис. 3.58. Перше зображення, сформоване програмою прикладу А.17 додатків, відображує параметри

$$\alpha \approx 14,04^{\circ} \text{ у площині } y = 0 \text{ мм; } 2\gamma \approx 64,94^{\circ};$$

$$B = 280 \text{ мм; } L \approx 260,8 \text{ мм; } \max H(L) = 25 \text{ мм.} \quad (3.114)$$

Друге, виконане програмою прикладу А.18 додатків, реалізує значення

$$\alpha \approx 14,04^0 \text{ у площині } y = 0 \text{ мм; } 2\gamma \approx 64,94^0;$$

$$B = 280 \text{ мм; } L \approx 260,8 \text{ мм; } \max H(L) = 20 \text{ мм.} \quad (3.115)$$

Також у цьому випадку, порівняно з попереднім, зменшено абсцису та збільшено аплікату точки $r_{1,1}$, що призводить до зростання кута β кришення ґрунту.

Як бачимо, величини (3.114) і (3.115) орієнтовані на дотримання вимог (3.102).

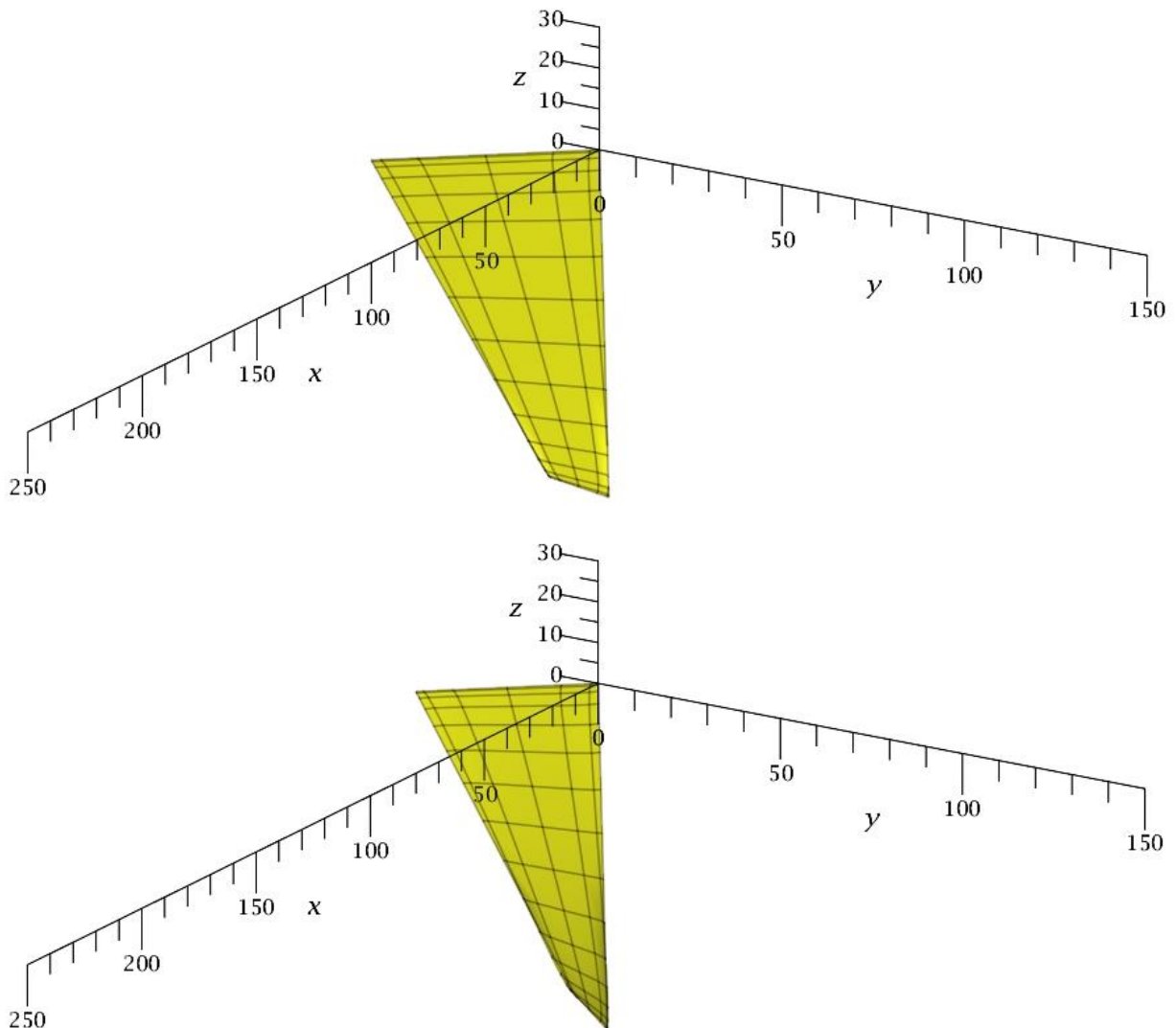


Рис. 3.58. Проектні різновиди теоретичних поверхонь універсальних лап

На рис. 3.59 показано варіанти плоскорізальних лап із криволінійними обводами. Їх створено відповідно за допомогою програм прикладів А.19 ... А.22 пункту А.2.2 додатків дисертації.

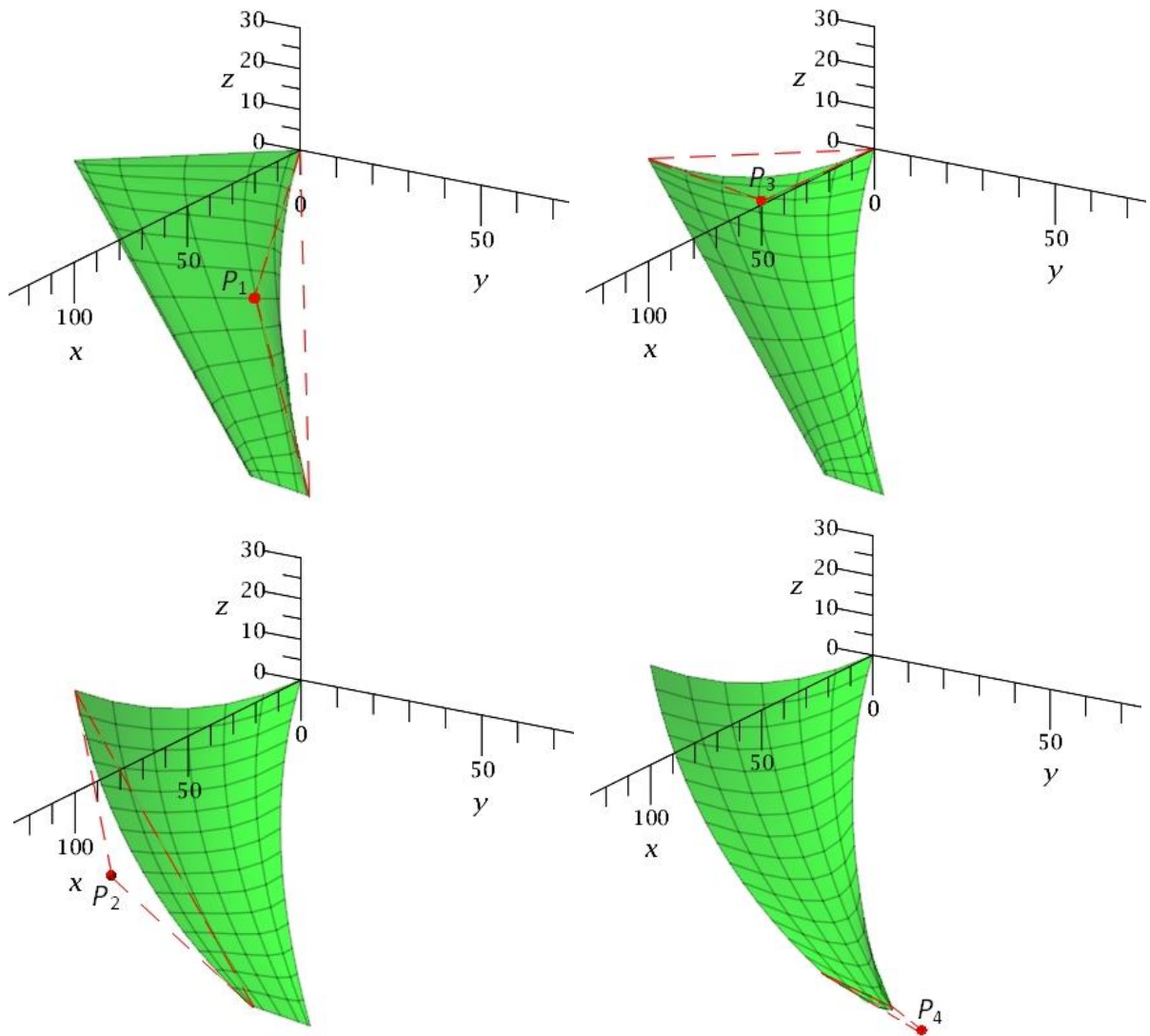


Рис. 3.59. Приклади лап із криволінійними обводами

Перше зображення відрізняється від відповідного рис. 3.58 модифікацією $P_1=(100; 50; 0)$, $w_1=1$. Для забезпечення наочності додатково штриховими лініями показано характеристичний трикутник застосованої кривої другого порядку. Керування кутами входження лапи у ґрунт та його сходження з неї доволі очевидне.

Друге зображення завдяки точці $P_3=(50; 0; 1)$ і $w_3=1$ забезпечує необхідне викривлення теоретичної поверхні лапи у її поздовжніх площинах. Два останні ілюструють відповідно подальші зміни $P_2=(180; 60; 12)$, $w_2=1$ та $P_4=(250; 170; 3)$, $w_4=1$. Отже, всі зовнішні обводи стали криволінійними. За потреби визначення характеру змінювання певних кутів уздовж необхідних напрямів використовується підхід, докладно викладений для відвалів плугів у пункті 3.2.2 дисертації.

3.3.2. Конструкційні моделі

Після дефініції для стрілочастих лап основних геометричних параметрів теоретичних поверхонь, які формують базові характеристики обробітку ґрунту, переходять до конструювання вказаних сільськогосподарських знарядь. За своєю суттю окреслені дії доволі схожі на докладно викладені в пункті 3.2.3 дисертації відомості щодо відвалів плугів. Зокрема, див. рис. 3.60, це стосується для відібраних перспективних проєктних варіантів побудови належних віртуальних твердотільних об'єктів шляхом надання обраним поверхням потрібної товщини.

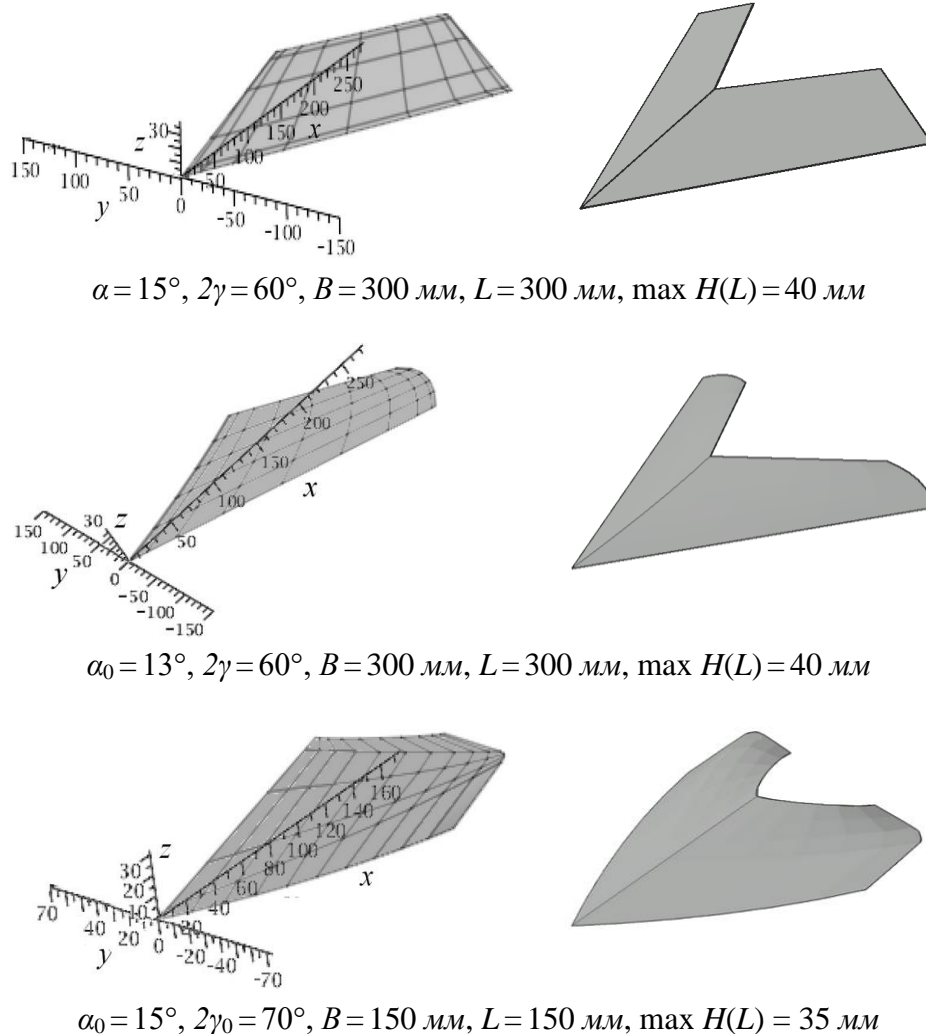


Рис. 3.60. Теоретичні поверхні, їхні параметри та відповідні комп'ютерні твердотільні моделі стрілочастих лап

У кожному рядку перше зображення відповідає теоретичній поверхні ґрунтообробного знаряддя, а друге – його твердотільній моделі. Початкова

лапа ілюструє використання прямолінійного обмежуючого контуру, далі – нижнього й верхнього обводів із відрізків прямих та з'єднання їх лініями другого порядку. Останній рядок подає випадок обмежуючого контуру повністю з криволінійних елементів. Нижній нульовий індекс показує, що величина кута обчислена в початковій точці криволінійного обводу.

Надалі обираються варіанти матеріалу, його товщини, виконуються різноманітні розрахунки (на міцність, експлуатаційні, економічні тощо), додаються необхідні конструктивні елементи, зокрема для кріплення лап до стояків, див. рис. 3.61.



Рис. 3.61. Елементи кріплення лап до стояків

Для дефініції раціональних проєктованих стрільчастих лап може бути застосований метод інтегрованих комплексних експертних оцінок, розглянутий у пункті 3.2.3 дисертації для відвалів плугів.

Ще одним способом оптимізації конструкції сільськогосподарських машин зі стрільчастими лапами є застосування СПГМ.

На засадах цього підходу визначається склад опрацьовуваного вузла, див. рис. 3.62,

$$BCL = (vsl_i)_{i=1}^{N_{vsl}} = (vsl_i)_{i=1}^3, \quad (3.116)$$

де $vsl_1 = CL$ – стрільчаста лапа, $vsl_2 = CT$ – стояк, $vsl_3 = KP$ – кріплення.

Кожен із компонентів (3.116) має певну множину проєктних варіантів

$$vsl_i = (vsl_{ij})_{j=1}^{N_{vsl_i}}, \quad (3.117)$$

де N_{vsl_i} – число різновидів vsl_i ,

та векторів параметрів

$$P_{ij} = (p_{ijk})_{k=1}^{Np_{ij}}, \quad (3.118)$$

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

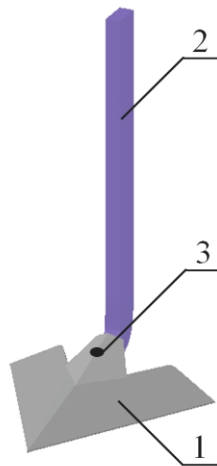


Рис. 3.62. Структура проектованого вузла:

1 – стрілочаста лапа; 2 – стояк; 3 – кріплення

Практичне використання виразів (3.116) ... (3.118) ілюструє рис. 3.63.

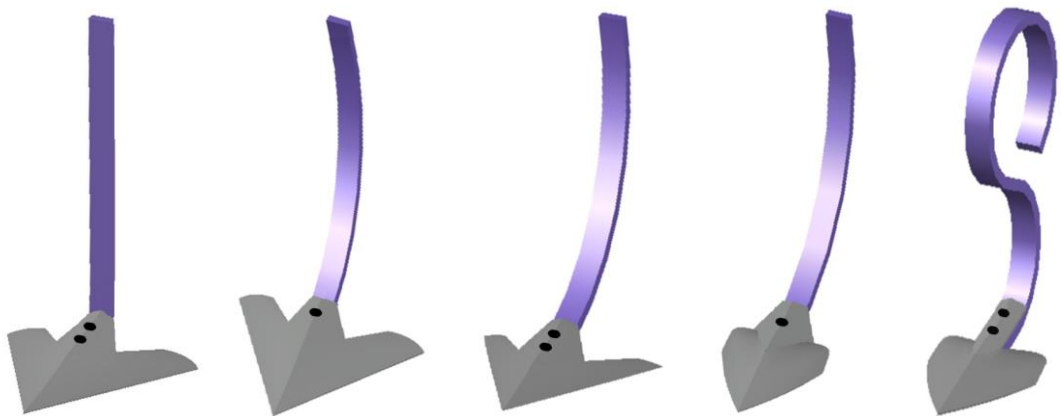


Рис. 3.63. Приклади конструкційних різновидів стрілоччастих лап зі стояками

Множина лап має вигляд

$$СЛ = (сл_i)_{i=1}^{N_{СЛ}}, \quad (3.119)$$

кортеж стояків

$$СТ = (ст_i)_{i=1}^{N_{СТ}}, \quad (3.120)$$

кріплення

$$КР = (кр_i)_{i=1}^{N_{КР}}. \quad (3.121)$$

Зв'язок між варіантами n -го та m -го елементів (3.119) ... (3.121) відтворюють матриці суміжності

$$C_{nm} = \|c_{n_r} c_{m_s}\|, \quad (3.122)$$

де r, s – натуральні числа; $r \in (1 \dots N_n), s \in (1 \dots N_m)$; N_n, N_m – число варіантів n -го й m -го елемента; $c_{n_r} c_{m_s} \neq 0$ при їхній взаємодії, інакше $c_{n_r} c_{m_s} = 0$.

Співвідношення (3.116) ... (3.122) дозволяють створити СПГМ, див. рис. 3.64, що забезпечує проведення комплексної оптимізації проектованого вузла конструкції.

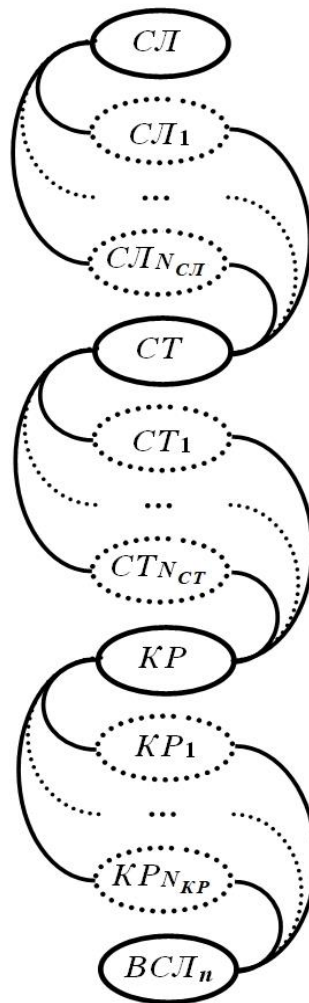


Рис. 3.64. СПГМ опрацьованого вузла стрілкової лапи

Наведена вище модель є мультиграфом, тобто її вершини $СЛ, СТ, КР$ поєднуються кратними ребрами, які відтворюють параметри й характеристики не тільки геометричні, а й різноманітні техніко-економічні тощо. Довжини вказаних ребер пропорційні зазначеним величинам. Це дозволяє в кожній вершині, починаючи з передостанньої, обчислити кортежі індексів, які відображують збільшення або зменшення певних наведених параметрів,

характеристик, їхніх усіляких комбінацій, наприклад з використанням методу вагових коефіцієнтів, у вигляді цільових функцій багатокритеріальної оптимізації.

Розглянутий граф забезпечує отримання множини варіантів конструкції вузла стрілкової лапи

$$BCL = (BCL_n)_{i=1}^{N_{BCL}}. \quad (3.123)$$

Кількість елементів кортежу (3.123) визначається змістом матриць (3.122).

На завершення даного пункту дисертації, присвяченого конструкції ґрунтообробних знарядь, покажемо, що проаналізований підхід структурно-параметричного моделювання доволі універсальний, поширюється також і на інші належні зразки сільськогосподарської техніки. Виконаємо це на прикладі лап-полиць, див. рис. 2.5, з, які застосовуються для підгортання аграрних культур. У зазначеному випадку використовуються ґрунтообробні поверхні, проаналізовані в підрозділі 3.2.

Спочатку визначається склад конструкції вузла, див. рис. 3.65,

$$VLP = (vlp_i)_{i=1}^{N_{vlp}} = (vlp_i)_{i=1}^3, \quad (3.124)$$

де $vlp_1 = ПЛ$ – полиця, $vlp_2 = СТ$ – стояк, $vlp_3 = КР$ – кріплення.

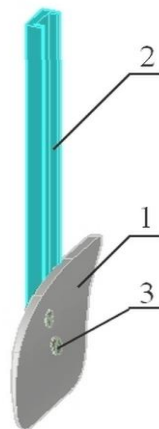


Рис. 3.65. Компоненти проєктованого вузла:

1 – полиця; 2 – стояк; 3 – кріплення

Далі опрацювання елементів (3.124) здійснюється аналогічно виразам (3.116) ... (3.123). Це стосується й показаної на рис. 3.64 СПГМ.

Деякі варіанти лап-полиць зображено на рис. 3.66.

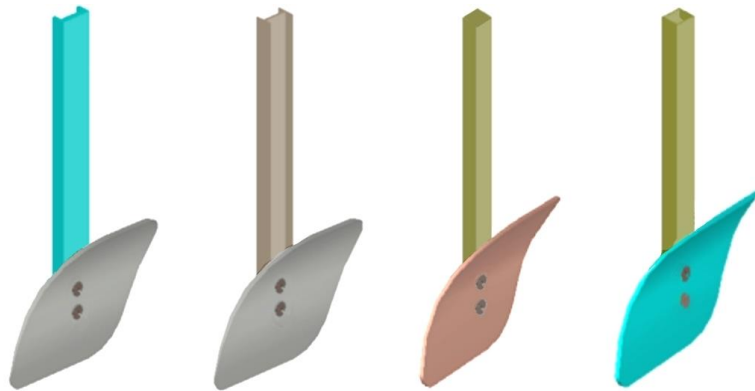


Рис. 3.66. Різновиди лап-полиць

Для забезпечення інтегрованого комплексного підходу під час автоматизованого проєктування ґрунтообробних знарядь у наступному пункті дисертації розглянуто питання створення математичної моделі для вдосконалення елементів конструкції лапового культиватора-сошника.

3.3.3. Удосконалення запобіжника лапового культиватора-сошника

Дані відомості слугують прикладом урахування при проєктуванні ґрунтообробних знарядь наявних умов їхньої експлуатації на прикладі лапового культиватора-сошника, див. рис. 3.67.

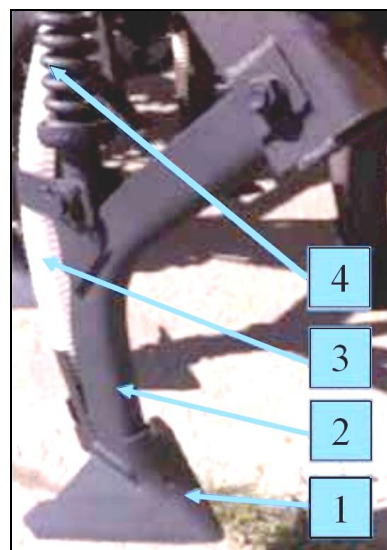


Рис. 3.67. Конструкція лапового культиватора-сошника [248]:

1 – лапа; 2 – стояк; 3 – насіннепровід; 4 – пружинний пристрій

Польові умови виконання технологічного процесу прямої сівби доволі складні. За них існує підвищений ризик наїзду робочих органів на тверді брили ґрунту, каміння і т. п. При цьому варто зазначити, що важливою особливістю конструкції приведених на рис. 3.67 сошників є шарнірне кріплення стояка 2 до рами сівалки за допомогою пружинного запобіжного пристрою. Коливання у вертикальній площині пружини 4, зафіксованої верхнім кінцем на рамі, дозволяють сошнику обминати перешкоди, самоочищатися та зменшувати тяговий опір ґрунтообробного знаряддя.

Як теоретичну модель застосовано коливання пружини, що закріплена одним кінцем на рамі та має на іншому умовний точковий вантаж m у вигляді сошника, який рухається у ґрунті. Це дає змогу визначати переміщення вантажу, тобто сошника, у вертикальній площині залежно від його маси (умовно сили опору ґрунту), початкової довжини h і жорсткості пружини k . Належну розрахункову схему показано на рис. 3.68.

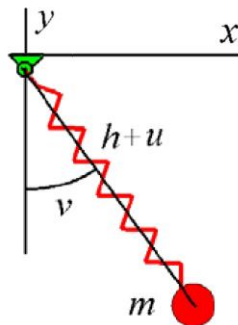


Рис. 3.68. Схема хитної пружини

За відомою послідовністю складання рівнянь Лагранжа другого роду в якості першої узагальненої координатної функції $v(t)$ обрано значення кута, який вісь пружини утворює з вертикальною віссю Oy . Другу узагальнену координатну функцію $u(t)$ пов'язано з подовженням пружини в часі t ; Величина h відповідає довжині пружини в ненавантаженому стані, тобто до зустрічі сошника з перешкодою. Тоді віртуальні координати рухомого точкового вантажу можна обчислити за формулами

$$x = (h+u)\sin v; \quad y = -(h+u)\cos v. \quad (3.125)$$

Лагранжіан визначаємо як різницю кінетичної та потенціальної енергій

$$L = 0,5m \left(\left(\frac{du}{dt} \right)^2 + (h+u) \left(\frac{dv}{dt} \right)^2 \right) - 0,5ku^2 - 9,81m(h+u)(1 - \cos v) - 9,81mu. \quad (3.126)$$

Для складання системи диференціальних рівнянь Лагранжа другого роду використаємо співвідношення

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{u}} \right) - \frac{\partial L}{\partial u} = 0; \quad \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{v}} \right) - \frac{\partial L}{\partial v} = 0, \quad (3.127)$$

де точкою над u та v позначено похідну по часу t .

У результаті систему рівнянь Лагранжа другого роду одержуємо у вигляді

$$\begin{cases} (u+h) \frac{d^2 v}{dt^2} + 2 \frac{dv}{dt} \frac{du}{dt} + 9,81 \sin v = 0; \\ \frac{d^2 u}{dt^2} - (u+h) \left(\frac{dv}{dt} \right)^2 + \frac{ku}{m} - 9,81 \cos v = 0. \end{cases} \quad (3.128)$$

При зустрічі сошника з перешкодою (випадок навантаженого стану) за умови поєднання хитної пружини з математичним маятником її віссю є цей маятник довжиною R , а сила опору ґрунту моделюється вантажем збільшеної маси M , див. рис. 3.69.

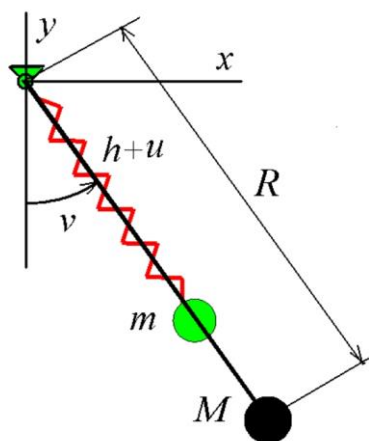


Рис. 3.69. Схема хитної пружини, поєднаної з маятником

Для визначення переміщення у вертикальній площині Oxy вантажу хитної пружини залежно від її параметрів у якості першої узагальненої координатної функції $v(t)$ обрано величину кута, який вісь хитної пружини утворює з

вертикальною віссю Oy . Другу узагальнену координатну функцію $u(t)$ пов'язано зі зміною довжини пружини h залежно від часу t . Тоді віртуальні координати рухомого точкового вантажу пружини можна розрахувати за приведеними вище формулами (3.125).

Лагранжіан системи в цьому випадку

$$L = 0.5MR^2\left(\frac{dv}{dt}\right)^2 + 0.5m\left[\left(\frac{du}{dt}\right)^2 + u^2\left(\frac{dv}{dt}\right)^2\right] + 9.81(mu + MR)\cos v - 0.5k(u - h)^2. \quad (3.129)$$

З використанням співвідношення (3.127) складаємо систему диференціальних рівнянь Лагранжа другого роду

$$\begin{cases} m\frac{d^2u}{dt^2} - mu\left(\frac{dv}{dt}\right)^2 - 9.81m\cos v + k(u - h) = 0; \\ (MR^2 + mu^2)\frac{d^2v}{dt^2} + 2mu\frac{dv}{dt}\frac{du}{dt} + 9.81\sin v(MR + mu) = 0. \end{cases} \quad (3.130)$$

Математична модель (3.125) ... (3.130) 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. Цю інформацію варто брати до уваги при конструюванні проаналізованих сільськогосподарських знарядь.

Таким чином, у даному розділі дисертації подано автоматизоване формоутворення полицевих і чизельних робочих органів на основі запропонованої узагальненої геометричної моделі. Розглянуто питання варіантних побудов теоретичних поверхонь, визначення їхніх важливих агротехнічних характеристик, комп'ютерного конструювання, проведення належної комплексної оптимізації.

Висновки до розділу 3

Матеріали даної частини виконаного дослідження висвітлюють практичну реалізацію напрацьованих у попередньому розділі дисертації теоретичних положень, методології та інструментарію на прикладі геометричного моделювання робочих органів полицевих і чизельних сільськогосподарських знарядь.

Отримано наступні нові наукові результати.

1. На засадах запропонованого принципу інтеграції розроблено узагальнену модель для формоутворення полицевих та чизельних знарядь, орієнтовану на ефективне використання сучасної комп'ютерної техніки.

Чим ширшу й багатоманітну номенклатуру охоплюють певні засоби геометричного моделювання, тим легше та продуктивніше реалізовувати процеси проектування промислової продукції, проводити її комплексну оптимізацію. Застосування способу інтегрованих класифікацій для формоутворення груп технічних об'єктів дозволило поєднати, шляхом узагальнення, однією геометричною моделлю доволі різні з точки зору обробітку ґрунту сільськогосподарські знаряддя для належного їхнього опрацювання. Пристосованість останньої до гнучкої генерації великого числа варіантів поверхонь згідно з багатоманітними наявними вимогами (теоретичного та експериментального плану) забезпечує успішну адаптацію до них відповідних проєктованих робочих органів сільськогосподарських ґрунтообробних машин. Універсальність розробленого математичного апарату сприяє його впровадженню в середовищі CAD/CAM/CAE систем. Наведені вище переваги проілюстровано на прикладах побудови циліндроїдальних, коноїдальних, гелікоїдальних та інших поверхонь відвалів плугів і стрілчастих лап.

2. Виконано аналітичний аналіз характеру змінювання таких важливих для досягнення високих агротехнічних та економіко-екологічних показників сільськогосподарських знарядь характеристик, як кути розпушення, обертання та зсуву ґрунту вздовж робочих поверхонь.

Створено універсальний узагальнений підхід до опрацювання відповідних розрахункових даних від окремих точок у проєктному комплексному інтегрованому просторі, який охоплює фізичну геометрію ґрунтообробних знарядь та певні їхні досліджувані функціональні характеристики, до належних ліній, поверхонь, тіл і багатовимірних фігур. Зазначеним чином формується узагальнена область можливих проєктних

розв'язків. Діалектичне подальше її застосування полягає у використанні запропонованого способу зменшення цієї області для раціональної дефініції конкретних необхідних розрахункових величин ґрунтообробних знарядь. Подана методика пристосована для реалізації в середовищі сучасних комп'ютерних інформаційних технологій, орієнтована на інтегроване комплексне використання іншими дисциплінами, наприклад ґрунтообробною механікою. Акцентовано важливий для теорії та практики, особливо в суміжних із геометрією прикладних спеціалізованих науках, наступний момент стосовно автоматизованого опрацювання технічної продукції взагалі та ґрунтообробних знарядь зокрема. Маючи математичний об'єкт відносно великої вимірності, з нього можна отримати бажану аналітичну інформацію накладанням потрібних обмежень. У дисертації це продемонстровано на кутах обертання ґрунту робочими поверхнями.

3. Розроблено конструкційні структурно-параметричні варіантні геометричні моделі полицевих і чизельних сільськогосподарських знарядь. На їхньому прикладі також проілюстровано інтегрований комплексний характер запропонованого підходу до автоматизованого формоутворення технічних об'єктів.

Показано, що обрані перспективні різновиди теоретичних поверхонь робочих органів ґрунтообробних знарядь слугують основою для проведення додаткових розрахунків, комп'ютерних і натурних експериментів. У результаті створюються належні конструкційні комп'ютерні твердотільні моделі. З метою обрання серед них остаточних найкращих варіантів застосовується метод експертних оцінок техніко-економічних та інших показників опрацьовуваних об'єктів і графова структурно-параметрична оптимізація.

4. Розроблено математичну модель для вдосконалення конструкції пружинного запобіжника лапового культиватора-сошника, яка під час проєктування ґрунтообробних знарядь бере до уваги наявні польові умови їхньої експлуатації.

Даний приклад теж демонструє практичну реалізацію запропонованого інтегрованого комплексного підходу до формоутворення промислової продукції.

Таким чином, матеріали третього розділу дисертації мають наведену вище науково-практичну значущість, яка забезпечує подальше вдосконалення та підвищення якості сільськогосподарської техніки.

Публікації автора з розглянутих питань: [248, 250, 259, 271–273, 275, 281, 284, 287, 362, 363, 365, 366].

Список публікацій здобувача за матеріалами розділу 3

1. 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.

2. 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. Особистий внесок здобувача: виконано аналіз різноманітних сошників для прямої сівби просапних культур.

3. 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. Особистий внесок здобувача: запропоновано методику комп'ютерного геометричного моделювання ґрунтообробних знарядь, яку проілюстровано на прикладі лап-полиць культиваторів.

4. 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. Особистий внесок здобувача: розроблено інтегровану структурно-параметричну варіантну комп'ютерну геометричну модель лапи-полиці з метою проведення її комплексної оптимізації.

5. 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. Особистий внесок здобувача: розроблено узагальнені геометричні моделі стрілчастих лап на основі поверхонь Кунса.

6. 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. Особистий внесок здобувача: запропоновано інтегровану методику комп'ютерного геометричного моделювання, яка поєднує етап варіантного опрацювання робочих поверхонь і стадію автоматизованого конструювання стрілчастих лап.

7. 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. Особистий внесок здобувача: визначено засади запропонованого комп'ютерного варіантного геометричного моделювання відвалів полицевих плугів.

8. Яблонський П.М., Григорович О.О., Юрчук В.П., Мазуренко П.Т., Огороднік Б.М. Геометричне конструювання пірамідальної робочої поверхні зубів землерийних машин. *Тези доповідей I конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Прикладна геометрія, дизайн та інноваційна діяльність»*. Київ: НТУУ «КПІ», 2012. С. 20–22. Особистий внесок здобувача: розроблено нову поверхню для зубів землерийних машин, яка дозволяє знижувати енергоємність процесу різання ґрунту.

9. Яблонський П.М., Жищинський В.П., Ковалюк Т.В. Графоаналітичне моделювання поверхні зуба землерийної машини. *Матеріали II міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Прикладна геометрія, дизайн та об'єкти інтелектуальної власності»*. Київ:

ДІЯ, 2013. С. 64–65. Особистий внесок здобувача: запропоновано зміну геометричної форми робочих граней зуба землерийної машини.

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. Особистий внесок здобувача: обґрунтовано необхідність та ефективність використання нових методів геометричного моделювання поверхонь робочих органів сільськогосподарських машин.

11. 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. Особистий внесок здобувача: запропоновано опрацювати з розглянутих теоретичних позицій конкретні приклади задач техніки, зокрема механічних пристроїв, де пружини впливають на траєкторії коливання їхніх вантажів.

12. 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. Особистий внесок здобувача: запропоновано використання хитних пружин в якості механічної моделі для аналізу сучасних технологічних процесів як динамічних систем.

13. 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. Особистий внесок здобувача: розроблено математичний апарат комп'ютерного варіантного геометричного моделювання відвалів плугів.

14. Yablonskyi P.M., Virchenko G.A, Voloha M.P, Lazarchuk-Vorobiova Y.V., Hrubykh M.V. Structural-parametric shaping of soil tillage tools. *Прикладна геометрія та інженерна графіка*. Київ: КНУБА, 2024. Вип. 106. С. 17–26. Особистий внесок здобувача: узагальнено існуючі напрацювання наукової школи прикладної геометрії КПІ ім. Ігоря Сікорського стосовно ґрунтообробних знарядь, визначено подальші перспективні напрямки досліджень.

РОЗДІЛ 4

ІНТЕГРОВАНЕ КОМПЛЕКСНЕ ГЕОМЕТРИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДИСКОВИХ РОБОЧИХ ОРГАНІВ

Дану частину дослідження присвячено опрацюванню формоутворення сільськогосподарських дисків. Це обумовлено тим, що відповідно до виконаної в підпункті 2.2.1.2 систематизації знарядь для основного обробітку ґрунту, див. множини (2.26), нами ще не розглянуто саме ці робочі органи. Для виключення повторень головну увагу зосереджено на непроаналізованих моментах запропонованого інтегрованого комплексного геометричного моделювання. Маються на увазі такі аспекти, як методика раціонального вибору типу ґрунтообробних знарядь, докладна класифікація сільськогосподарських дисків, геометричне моделювання цих робочих органів, відтворення технологічних операцій їхнього виготовлення. Зазначені питання подано далі у відповідних підрозділах дисертації.

4.1. Раціональний вибір типу ґрунтообробних знарядь на прикладі ротаційних органів

Доволі важливим моментом проектування технічних об'єктів є обрання принципової їхньої схеми, певного базового різновиду, типу тощо. Це обумовлено тим, що здійсненні на даному етапі помилки та неточності надалі досить важко або навіть неможливо виправити. Проілюструємо окреслену задачу на прикладі ротаційних робочих органів. У публікації [87] наводиться наступна інформація, див. табл. 4.1. Зауважимо, в даному випадку показники робочих органів згідно з ОСТ 23.2.147-85 обрані для порівняння за 1.

На наш погляд, виконувати належний аналіз доцільності застосування та технічних перспектив зазначених типів знарядь, що особливо важливо на початковому етапі їхнього проектування, за наведеним форматом не достатньо наочно.

Порівняльна оцінка ротаційних робочих органів Таблиця 4.1

| Основні показники | Суцільний диск (відповідний ОСТ 23.2.147-85) | Кільцевий (пасивного типу) | Голчастий (пасивного типу) | Кільцевий (активного типу) | Голчастий (активного типу) |
|---|--|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Якість обробітку за інтенсивністю руйнування структури ґрунту | 1,0 | 1,5 | 1,3 | 1,3 | 1,5 |
| Агротехнологічна якість виконання технологічного процесу | 1,0 | 1,0 | 0,8 | 1,1 | 0,8 |
| Рівень енергозбереження робочого процесу | 1,0 | 1,5 | 1,3 | 0,6 | 0,8 |
| Узагальнена технологічність виготовлення робочого органу | 1,0 | 1,1 | 0,9 | 1,2 | 1,1 |
| Експлуатаційна технологічність ґрунтообробного знаряддя | 1,0 | 0,9 | 1,0 | 0,2 | 0,2 |
| Узагальнена оцінка | 1,0 | 1,18 | 1,06 | 0,88 | 0,84 |

Полегшується вказане завдання завдяки відповідній властивості геометричних моделей, див. рис. 4.1 ... 4.5, чим забезпечується обрання правильного напрямку дослідження ґрунтообробних знарядь. Запропонована математична модель комплексного інтегрованого оцінювання показників технічних об'єктів у даному разі має наступний вигляд.

Опрацьовувані ротаційні робочі органи

$$\begin{aligned}
 PPO &= (PPO_i)_{i=1}^{N_{PPO}} = (PPO_i)_{i=1}^5 = \\
 &= (\text{Суцільний диск, Кільцевий пасивний, Голчастий пасивний,} \\
 &\quad \text{Кільцевий активний, Голчастий активний}). \quad (4.1)
 \end{aligned}$$

Множина оцінок

$$\begin{aligned}
 OC &= (OC_j)_{j=1}^{N_{OC}} = (OC_j)_{j=1}^5 = \\
 &= (\text{Якість обробітку, Агротехнологічна якість, Рівень енергозбереження,} \\
 &\quad \text{Узагальнена технологічність, Експлуатаційна технологічність}). \quad (4.2)
 \end{aligned}$$

Матриця величин оцінок

$$o_{ij} = \|o_{ij}\|, \quad (4.3)$$

де i, j – номер ротаційного робочого органа та оцінки.

Значення елементів (4.3) беруться з табл. 4.1. На графічних діаграмах рис. 4.1 ... 4.5 площа j -го трикутника ($j \in 1, \dots, N_{OЦ}$) i -го ротаційного робочого органа ($i \in 1, \dots, N_{PPO}$) обчислюється за формулою

$$S_{i,j} = 0,5 \cdot o_{ij} \cdot o_{i,j+1} \cdot \sin(\alpha_j), \quad (4.4)$$

де для $j=N_{OЦ}$ $o_{i,j+1}=o_{i,1}$, α_j – кут між осями оцінок j -го трикутника, $\max(\alpha_j)=90^0$.

Кожен i -й орган характеризується сумарною площею за всіма оцінками

$$S_i = \sum_{j=1}^{N_{OЦ}} S_{i,j} \quad (4.5)$$

та відносною їхньою вагою

$$\bar{S}_{i,j} = \frac{S_{i,j}}{S_i}. \quad (4.6)$$

де $j \in 1, \dots, N_{OЦ}=5$.

Згідно з виразами (4.1) ... (4.6) маємо для ротаційного робочого органа:

– суцільного диска

$$S_1 = 2,38; \quad \bar{S}_{1,j} = 0,2; \quad j = 1, \dots, 5; \quad (4.7)$$

– кільцевого пасивного типу

$$S_2 = 3,32; \quad \bar{S}_{2,1} = 0,215; \quad \bar{S}_{2,2} = 0,215; \quad \bar{S}_{2,3} = 0,236; \\ \bar{S}_{2,4} = 0,142; \quad \bar{S}_{2,5} = 0,193; \quad S_2 / S_1 = 1,4; \quad (4.8)$$

– голчастого пасивного типу

$$S_3 = 2,59; \quad \bar{S}_{3,1} = 0,191; \quad \bar{S}_{3,2} = 0,191; \quad \bar{S}_{3,3} = 0,215; \\ \bar{S}_{3,4} = 0,165; \quad \bar{S}_{3,5} = 0,239; \quad S_3 / S_1 = 1,09; \quad (4.9)$$

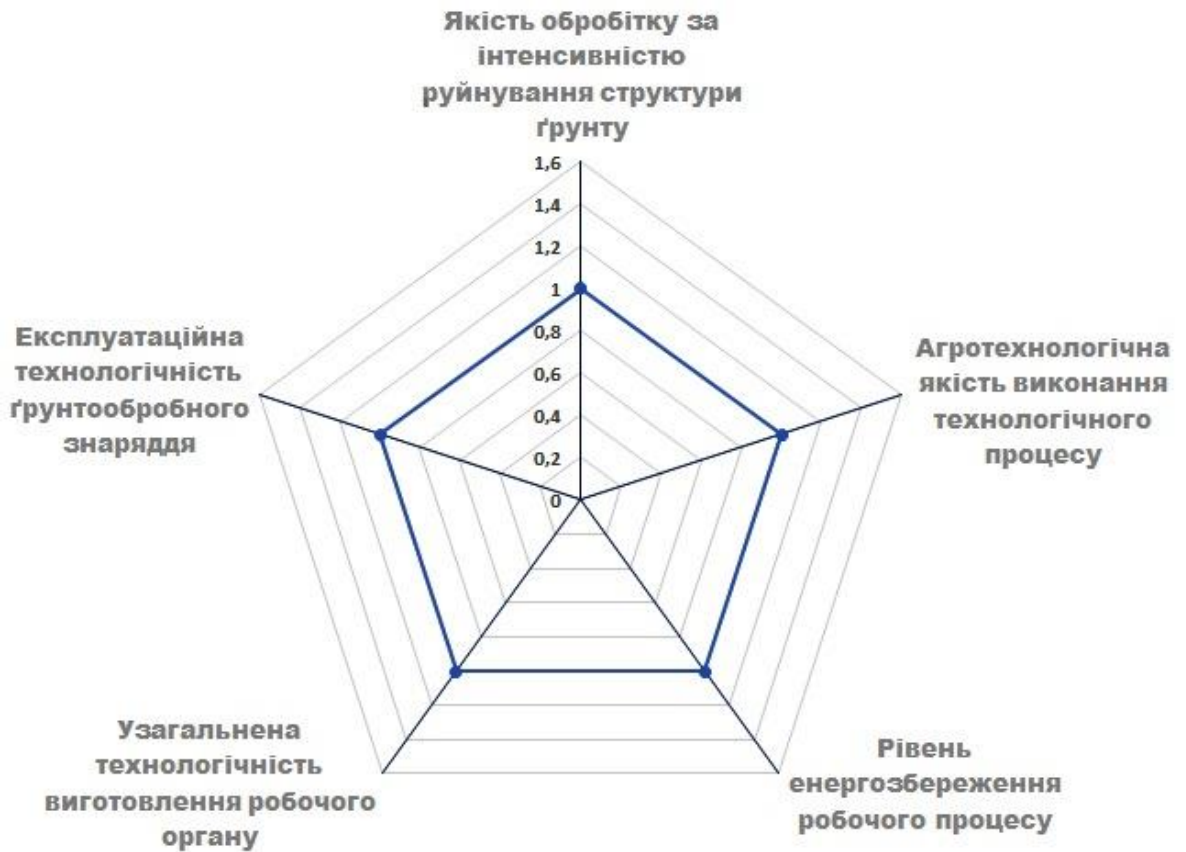


Рис. 4.1. Суцільний диск

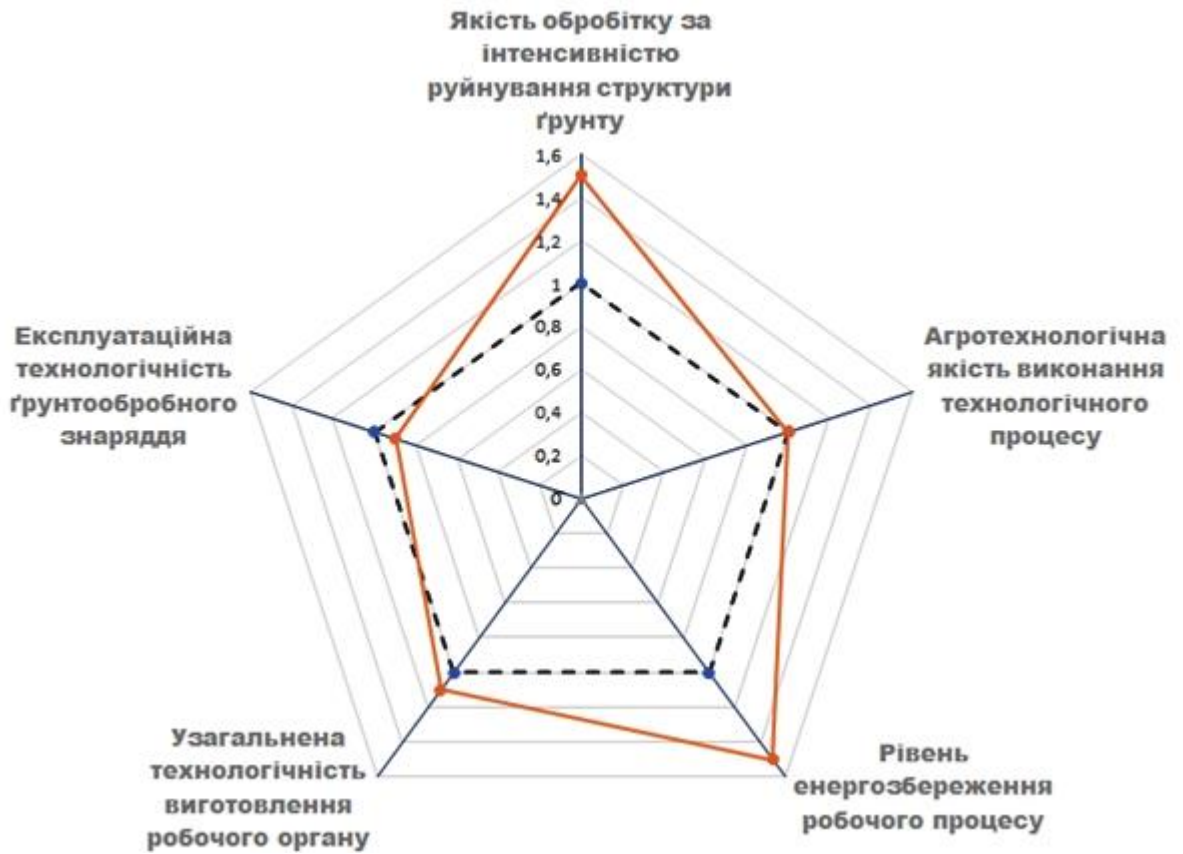


Рис. 4.2. Кільцевий пасивного типу

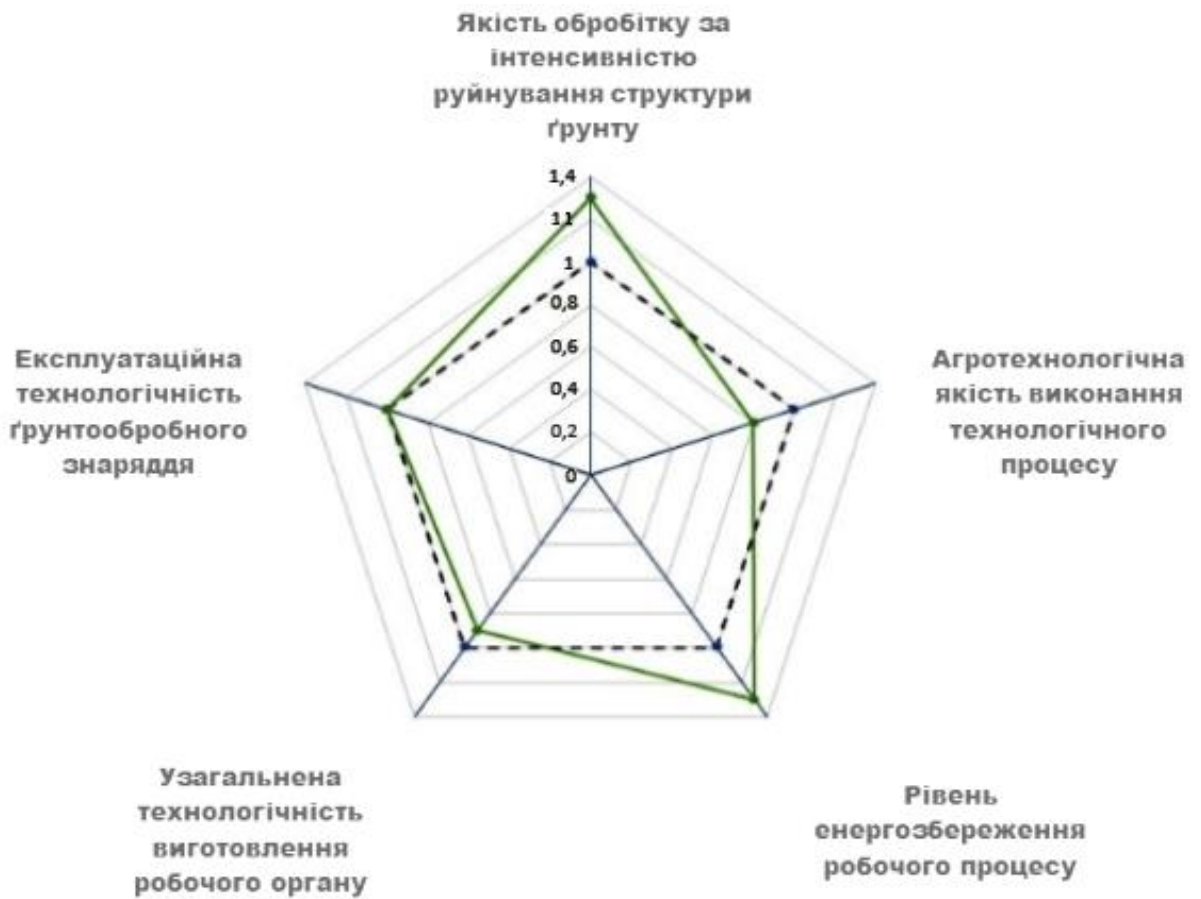


Рис. 4.3. Голчастий пасивного типу

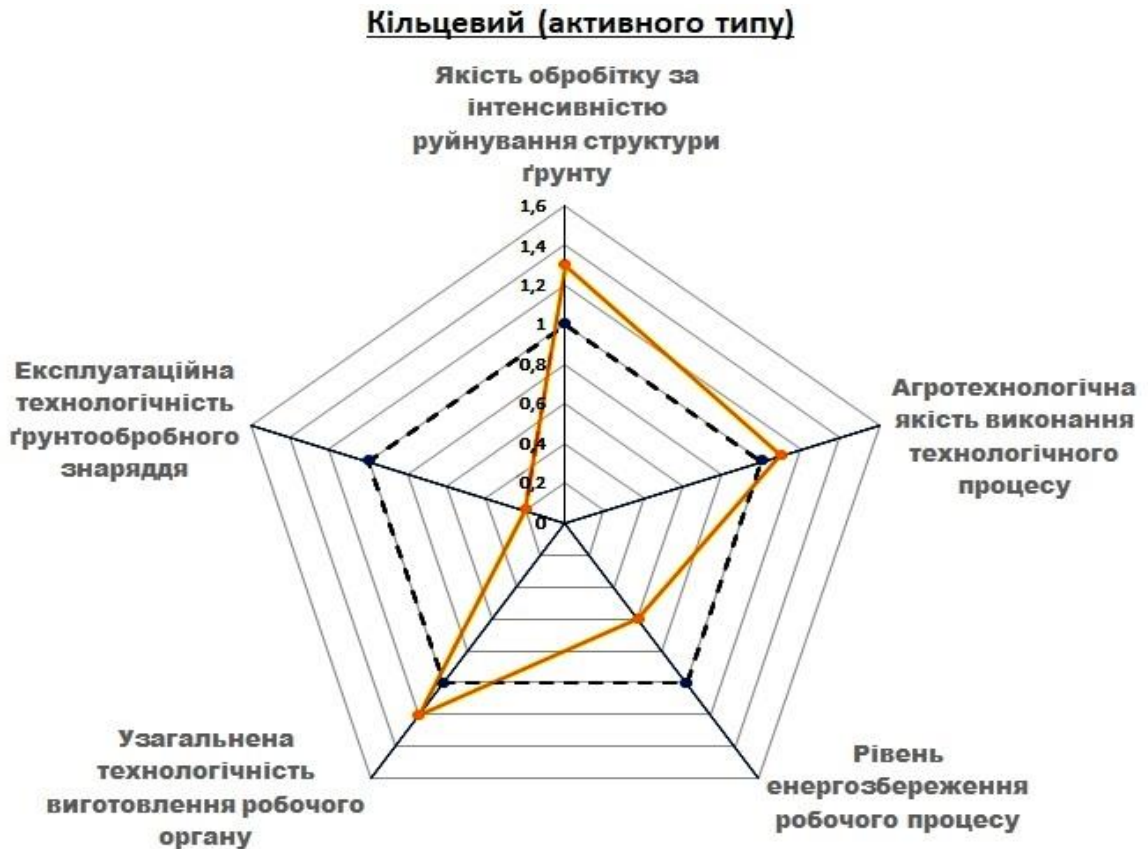


Рис. 4.4. Кільцевий активного типу

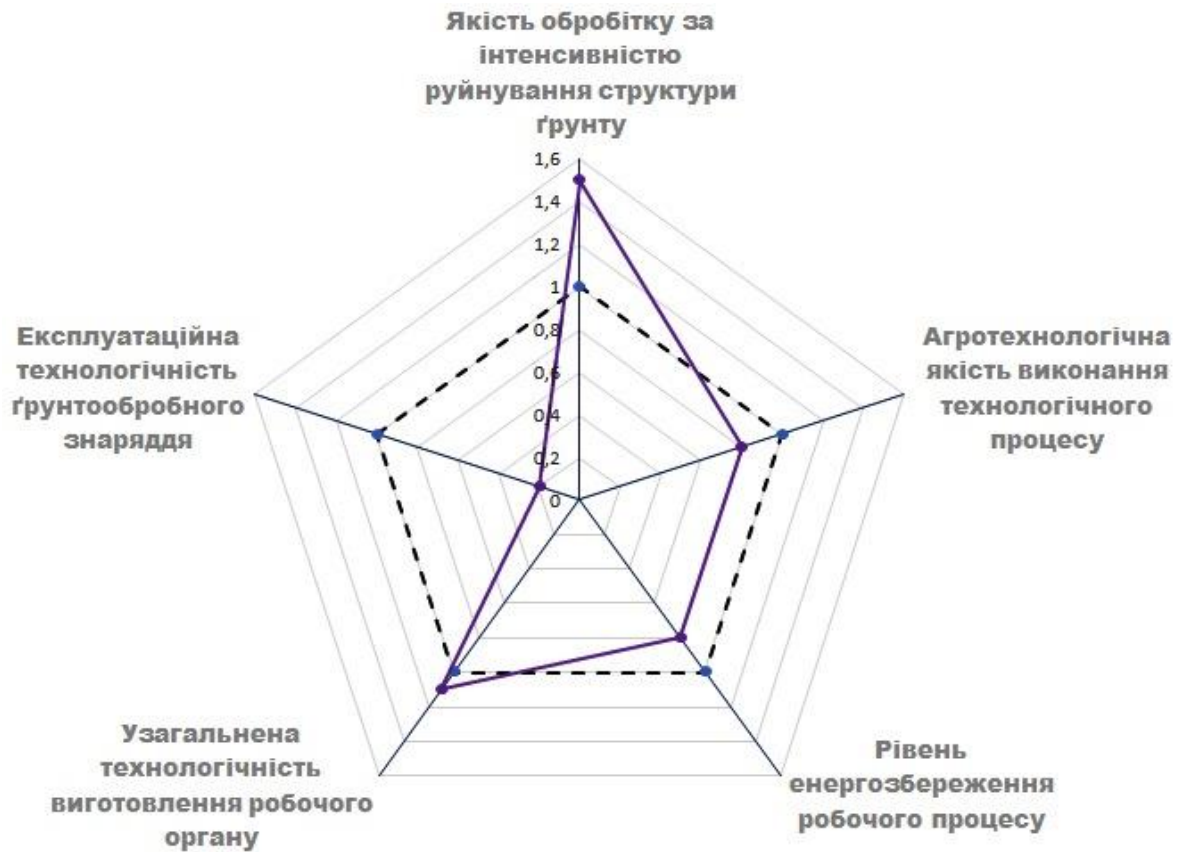


Рис. 4.5. Голчастий активного типу

– кільцевого активного типу

$$S_4 = 1,57; \bar{S}_{4,1} = 0,432; \bar{S}_{4,2} = 0,199; \bar{S}_{4,3} = 0,218;$$

$$\bar{S}_{4,4} = 0,073; \bar{S}_{4,5} = 0,079; S_4 / S_1 = 0,66; \quad (4.10)$$

– голчастого активного типу

$$S_5 = 1,54; \bar{S}_{5,1} = 0,37; \bar{S}_{5,2} = 0,198; \bar{S}_{5,3} = 0,272;$$

$$\bar{S}_{5,4} = 0,068; \bar{S}_{5,5} = 0,093; S_5 / S_1 = 0,65. \quad (4.11)$$

Співвідношення (4.7) ... (4.11) додатково до наочних зображень рис. 4.1 ... 4.5 надають належну кількісну інформацію стосовно застосованих оцінок, їхнього вкладу в сумарні показники певного ротаційного робочого органу, визначають для останнього інтегральний якісний критерій порівняно з суцільним диском тощо.

Важливим є також динамічне комплексне варіювання в наведених графоаналітичних моделях досліджуваних оцінок, наприклад, послідовності

їхнього використання, змінювання ваги впливу (див. пункт А.3.1 додатків), величин і т. д. Це дозволяє гнучко враховувати наявні поточні потреби проєктування та перспективи подальшого вдосконалення даних знарядь.

У зв'язку з обмеженим обсягом дисертації розглянемо ще тільки наступний приклад. Аналіз рис. 4.1 ... 4.5 показує, що по всім оцінкам, крім експлуатаційної технологічності, кільцеві ротаційні органи пасивного типу перевищують суцільні диски. При забезпеченні, зокрема, показника

$$o_{ц,5} = 1 \quad (4.12)$$

будемо мати

$$\begin{aligned} S_2 = 3,45; \bar{S}_{2,1} = 0,207; \bar{S}_{2,2} = 0,207; \bar{S}_{2,3} = 0,228; \\ \bar{S}_{2,4} = 0,152; \bar{S}_{2,5} = 0,207; S_2 / S_1 = 1,45. \end{aligned} \quad (4.13)$$

Подібними до (4.12) і (4.13) прийомами визначаються напрямки для покращення сільськогосподарської техніки та обчислюються їхні кількісні характеристики. Цікавий з точки теорії і практики розрахунок інтегральних багатофакторних показників, які можна отримати, внаслідок узагальнення, для наявних оцінок шляхом різноманітного їхнього поєднання. У наведеному випадку максимальне число варіантів становить

$$N_{ВАР} = N_{ОЦ}! = 5! = 120.$$

Окреслені задачі виходять за рамки даних наукових розвідок. Однак, варті бути предметом інших досліджень.

4.2. Класифікація сільськогосподарських дисків

Під час розгляду в попередньому розділі питань геометричного моделювання таких знарядь, як полицеві та чизельні робочі органи, головну увагу було приділено запропонованій узагальненій моделі їхнього комп'ютерного формоутворення. Універсальність напрацьованого математичного апарату дозволила надалі охопити доволі широку номенклатуру зазначених 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. Продемонструємо це на прикладі сільськогосподарських дисків.

Основу для систематизації цих робочих органів, див. вираз (2.28), становлять такі їхні геометричні властивості:

- форма базової поверхні (*ФБП*), яка визначає тип диска;
- вирізи (*ВРЗ*);
- отвори (*ОТВ*) під вісь та кріплення.

З використанням структурно-параметричного підходу наведені аспекти класифікації описуються, зокрема, наступним чином.

Форма базової поверхні подається множиною

$$\text{ФБП} = (\text{ФБП}_i)_{i=1}^{N_{\text{ФБП}}} = (\text{ФБП}_i)_{i=1}^4, \quad (4.14)$$

де ФБП_1 – плоска, ФБП_2 – конічна, ФБП_3 – сферична, ФБП_4 – комбінована.

Для останнього варіанта можливі різновиди

$$\text{ФБП}_4 = (\text{ФБП}_{4_j})_{j=1}^{N_{\text{ФБП}_4}} = (\text{ФБП}_{4_j})_{j=1}^4, \quad (4.15)$$

де ФБП_{4_1} – плоско-конічна, ФБП_{4_2} – плоско-сферична, ФБП_{4_3} – з двох конічних, ФБП_{4_4} – з двох сферичних.

Застосовані вирізи визначаються кортежем

$$\text{ВРЗ} = (\text{ВРЗ}_i)_{i=1}^{N_{\text{ВРЗ}}} = (\text{ВРЗ}_i)_{i=1}^5, \quad (4.16)$$

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

Другий елемент множини (4.16)

$$\text{ВРЗ}_2 = (\text{ВРЗ}_{2_j})_{j=1}^{N_{\text{ВРЗ}_2}} = (\text{ВРЗ}_{2_j})_{j=1}^2, \quad (4.17)$$

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

четвертий

$$BPZ_4 = (BPZ_{4j})_{j=1}^{N_{BPZ4}} = (BPZ_{4j})_{j=1}^2, \quad (4.18)$$

де BPZ_{41} – циклоїдальні, BPZ_{42} – синусоїдальні.

Отвори подаються кортежем

$$OTB = (OTB_i)_{i=1}^{N_{OTB}} = (OTB_i)_{i=1}^3, \quad (4.19)$$

де OTB_1 – круглі, OTB_2 – некруглі, OTB_3 – комбіновані.

Другий елемент множини (4.19)

$$OTB_2 = (OTB_{2j})_{j=1}^{N_{OTB2}} = (OTB_{2j})_{j=1}^2, \quad (4.20)$$

де OTB_{21} – квадратні, OTB_{22} – шестигранні,

третій

$$OTB_3 = (OTB_{3j})_{j=1}^{N_{OTB3}} = (OTB_{3j})_{j=1}^2, \quad (4.21)$$

де OTB_{31} – круглі та квадратні, OTB_{32} – круглі та шестигранні.

Зауважимо, що склад кортежів (4.14) ... (4.21) коригується відповідно до наявних умов формоутворення проаналізованих технічних об'єктів.

4.3. Геометричне моделювання дискових робочих органів

Визначену на підставі залежностей попереднього підрозділу СПГМ для варіантних комп'ютерних побудов розглянутих ґрунтообробних дисків показано на рис. 4.6. З нього видно, що згідно з правилом суми та добутку комбінаторики загальна кількість структурних різновидів становить

$$\begin{aligned} N_{CBAР} &= (N_{ФБП} - 1 + N_{ФБП4}) \cdot (N_{BPZ} - 2 + N_{BPZ2} + N_{BPZ4}) \times \\ &\quad \times (N_{OTB} - 2 + N_{OTB2} + N_{OTB3}) = \\ &= (4 - 1 + 4) \cdot (5 - 2 + 2 + 2) \cdot (3 - 2 + 2 + 2) = 245. \end{aligned} \quad (4.22)$$

Зауважимо, що кожен з останніх здатний мати також доволі велике число параметричних варіантів.

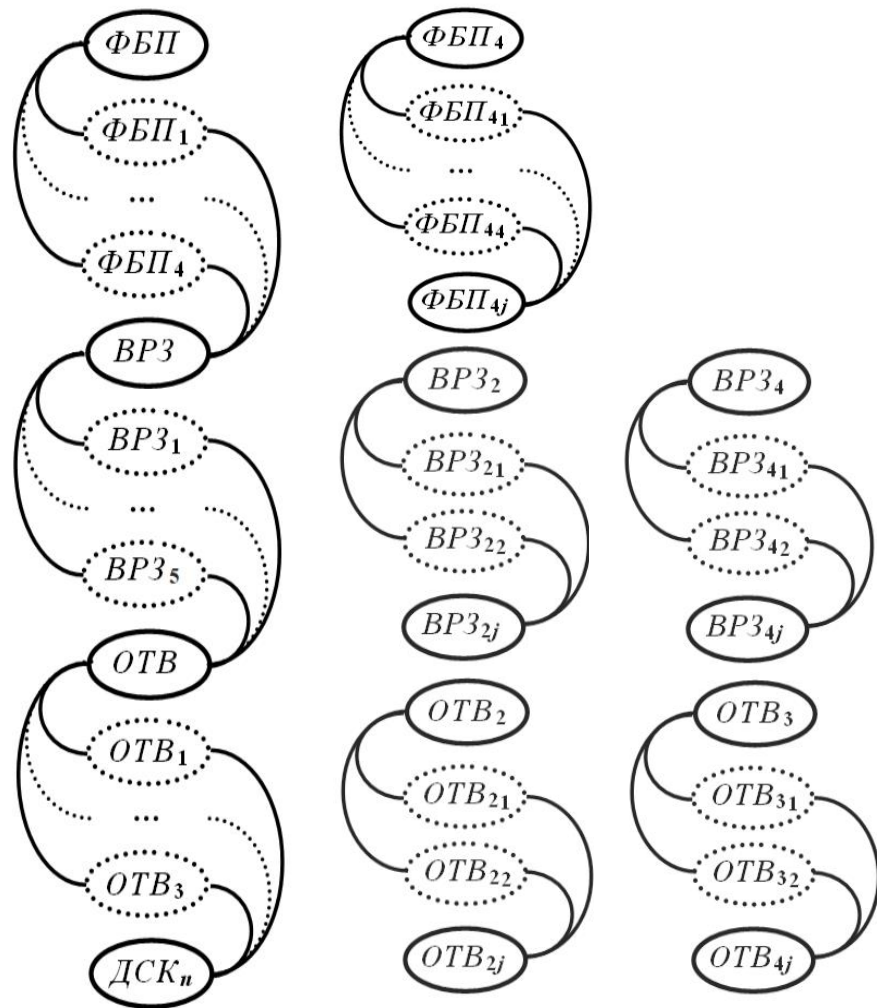


Рис. 4.6. СІГМ конструювання дисків

Формування та застосування поданої моделі аналогічне викладеному для випадку рис. 3.64. Деяка відмінність полягає у відсутності матриць суміжності вигляду (3.122). Це означає, що на взаємодію варіантів вершин наведеного графа немає обмежень. При їхній наявності кількість структурних варіантів (4.22) зменшується.

Приклади комп'ютерних твердотільних моделей ґрунтообробних дисків зображені на рис. 4.7 ... 4.10, де використано відповідно, див. кортеж (4.14) і (4.15), плоску, конічну, сферичну та комбіновану плоско-сферичну базову поверхню. При цьому вжито конструкцію, див. множини (4.16) ... (4.18), без вирізів, з V-подібними, коловими, циклоїдальними й асиметричними вирізами. У наведених різновидів один центральний квадратний отвір. Для забезпечення цілісного уявлення про досліджувані варіанти дисків у додатках А.3.2 подано їхні різновиди з круглими та квадратними отворами.

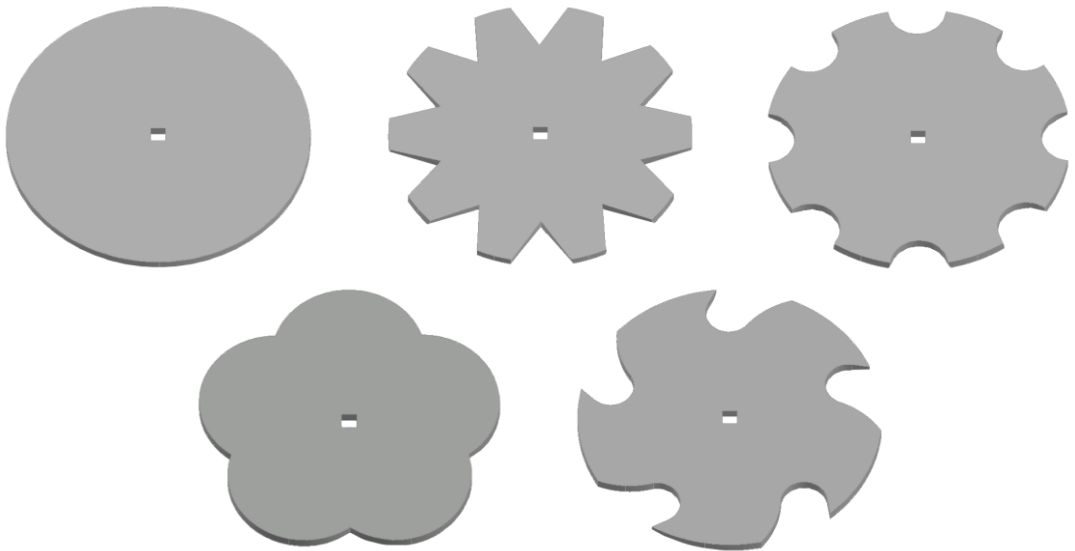


Рис. 4.7. Плоска базова поверхня

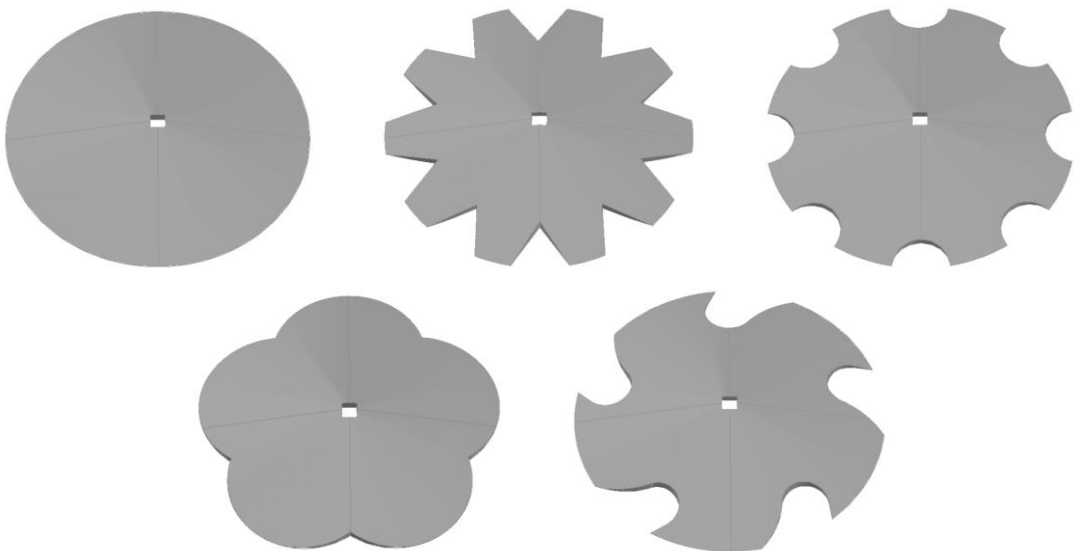


Рис. 4.8. Конічна базова поверхня

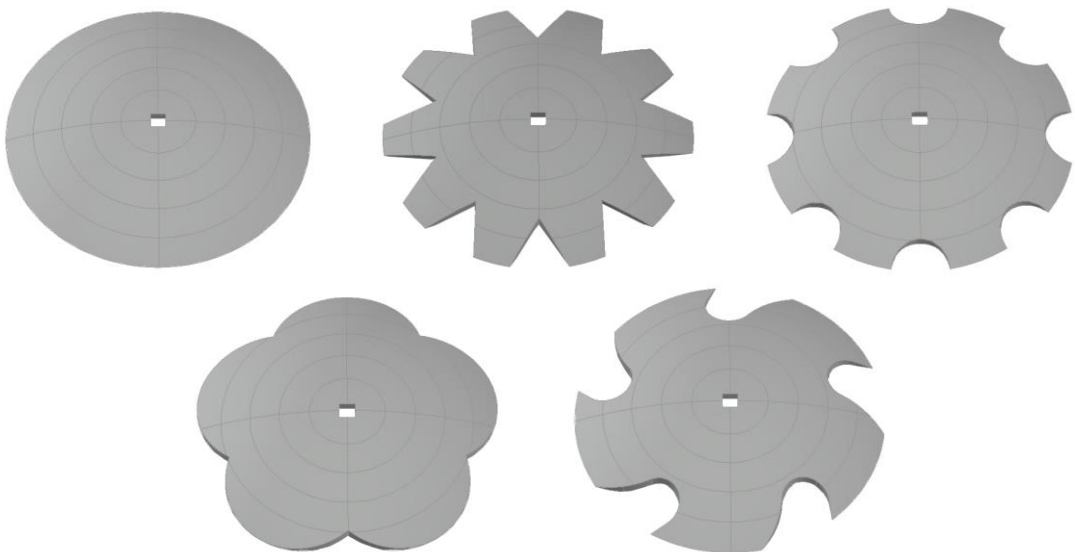


Рис. 4.9. Сферична базова поверхня

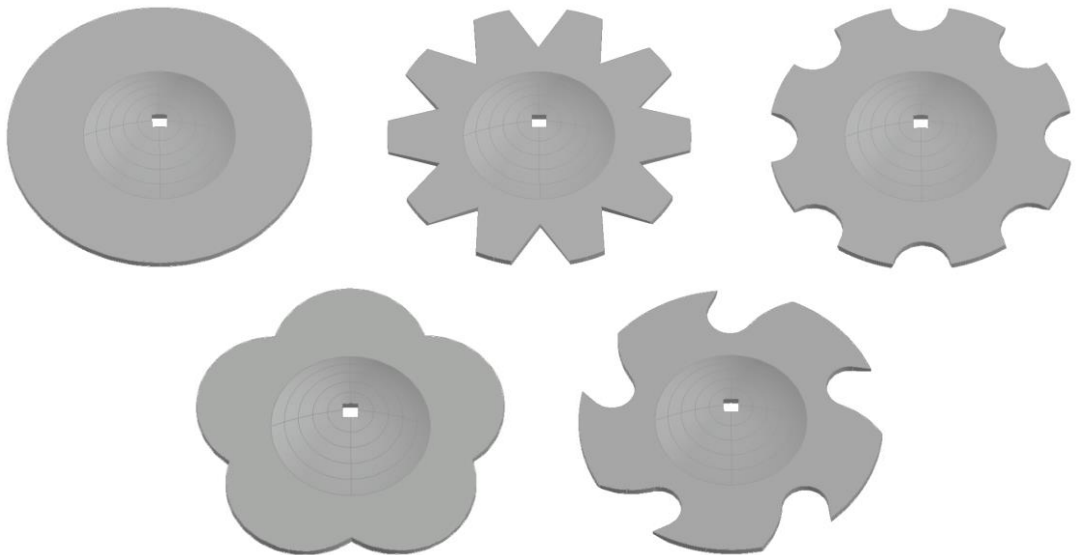


Рис. 4.10. Комбінована базова поверхня

Популярність сільськогосподарських дисків обумовлена сучасними прогресивними тенденціями стосовно мінімальної обробки землі. Порівняно з плугами зазначені технології забезпечують зменшення витрат пального, сприяють збереженню вологи у ґрунті, його структури, зміцнюють протиерозійні фактори тощо. Велике розмаїття обставин використання вказаних знарядь спричинило належні їхні чисельні різновиди. Проведення відповідного агротехнологічного аналізу ґрунтообробних дисків виходить за рамки тематики даного наукового дослідження. Нами тільки акцентується здатність запропонованого підходу до автоматизованого формоутворення опрацьовуваних сільськогосподарських знарядь гнучко і продуктивно адаптуватися до змінних вимог їхнього проектування.

Як видно з класифікації попереднього підрозділу дисертації, розрізняють плоскі, конічні, сферичні та комбіновані типи ґрунтообробних дисків із суцільним лезом або вирізні. Найпоширенішими на практиці є сферичні, див. рис. 4.11.

Плоскі застосовуються у вигляді подрібнювачів, загортачів, ножів на плугах, у луцильниках і т. д. Конічні легко проникають у ґрунт, але кришать його недостатньо. Тому працюють, зазвичай, разом із робочими органами, які реалізують інтенсивне подрібнення. Комбіновані засоби поєднують переваги окремих своїх компонентів.

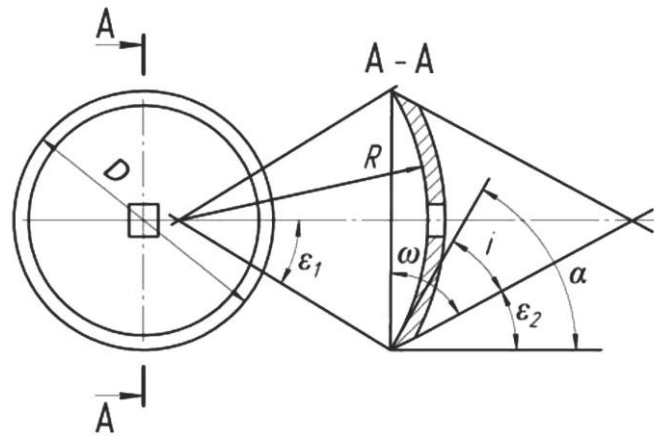


Рис. 4.11. Геометричні параметри сферичного диска [108]

Дискові знаряддя можна розглядати, за аналогією з полицевими, як такі, що мають кут кришення, обертання та зсуву ґрунту. Але додатково існують ще ряд вимог, наприклад, стосовно луцнення, змішування рослинних залишків і т. д. Сферичний суцільний диск здійснює підрізання, кришення, обертання та зсув ґрунту, але у відносно легких агротехнічних умовах. Ці знаряддя з діаметром 500 ... 800 мм використовуються при обробітку на глибину до 14 см. Менші здійснюють луцнення на глибину 3 ... 6 см. Наявність вирізів уздовж периметра підвищує тиск на землю, що забезпечує краще заглиблення диска та захоплення ним рослинних рештків. Вирізи до 40 мм реалізують надійний контакт знаряддя з дном борозни, а більші додатково також якісне подрібнення грубих залишків рослин. Ще краще це роблять асиметричні вирізи.

Дамо короткий опис параметрів, зображених на рис. 4.11. Діаметр D визначається максимальною глибиною a обробітку ґрунту. За матеріалами [87, 108, 228] маємо

$$D \approx (3 \dots 6) \cdot a. \quad (4.23)$$

Радіус кривини R впливає на розпушування та обертання ґрунту. Його зменшення підвищує вказані характеристики. На енергоємність процесу підрізання має суттєвий вплив кут ε_2 . Кут заточування

$$i = 10^0 \dots 20^0. \quad (4.24)$$

З рис. 4.11 видно, що кут різання

$$\alpha = i + \varepsilon_2. \quad (4.25)$$

Належне розпушування ґрунту забезпечується величинами

$$R = 600 \dots 1000 \text{ мм.} \quad (4.26)$$

Рекомендовані співвідношення

$$R/D = 1 \dots 2. \quad (4.27)$$

Отже, геометрію розглянутого сферичного ґрунтообробного диска визначають параметри

$$ДСК = (D, R, \omega, \delta), \quad (4.28)$$

де δ – непоказана на рис. 4.11 його товщина в мм.

Передній кут обчислюється згідно з виразом

$$\varepsilon_1 = \arcsin\left(\frac{D}{2R}\right) \cdot 180/\pi \text{ } ^\circ. \quad (4.29)$$

Крім параметрів (4.23) ... (4.29) важливе встановлення дисків у робоче положення. Тобто дефініція кута атаки γ , що утворює вектор напрямку руху агрегату з дисковим діаметром, який паралельний горизонтальній площині. Цей кут суттєво впливає на розпушування ґрунту, його рекомендується [87] обирати з діапазону

$$\gamma = 30^\circ \dots 50^\circ. \quad (4.30)$$

На базовій рамі ґрунтообробного агрегату суміжні ряди дисків мають орієнтовані в різні сторони відносно напрямку руху кути атаки. Збільшення останніх зменшує висоти гребенів дна борозни, поліпшує підрізання та перемішування ґрунту. Однак, надмірні такі величини обумовлюють забивання дисків. Мінімальний питомий робочий опір реалізується [87] значеннями

$$\gamma = 25^\circ \dots 35^\circ. \quad (4.31)$$

Відхилення диска від вертикальної площини на кут β знижує робочий опір завдяки більш плавному переміщенню ґрунту, а зменшення радіуса R кривини, навпаки, збільшує вказаний опір.

Приклади креслеників дисків подано в пункті А.3.3 додатків дисертації. Це стосується сферичного без вирізів та з вирізами дугами кіл. Решта основних геометричних параметрів для обох знарядь однакові

$$ДСК_1 = ДСК_2 = (D, R, \omega, \delta) = (700 \text{ мм}, 750 \text{ мм}, 60^0, 10 \text{ мм}). \quad (4.32)$$

Тоді, відповідно до наведених формул (4.23) ... (4.32), будемо мати:

– максимальну глибину обробітку ґрунту

$$a \approx \frac{D}{3 \dots 6} = \frac{700 \text{ мм}}{3 \dots 6} \approx 11,5 \dots 23 \text{ см}; \quad (4.33)$$

– задній кут

$$\varepsilon_2 = 90^0 - \omega - \beta = 90^0 - 60^0 - \beta = 30^0 - \beta; \quad (4.34)$$

– кут різання

$$\alpha = i + \varepsilon_2 = 10^0 \dots 20^0 + 30^0 - \beta = 40^0 \dots 50^0 - \beta; \quad (4.35)$$

– передній кут

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= \arcsin\left(\frac{D}{2R}\right) \cdot 180/\pi^0 \approx \\ &\approx \arcsin\left(\frac{700 \text{ мм}}{2 \cdot 750 \text{ мм}}\right) \cdot 180/3,1416^0 \approx 27,82^0. \end{aligned} \quad (4.36)$$

– співвідношення

$$R/D = \frac{750 \text{ мм}}{700 \text{ мм}} \approx 1,07. \quad (4.37)$$

Вирази (4.33) ... (4.37) описують конкретні величини параметрів наведених дисків (4.32). З метою загальної варіантної комплексної оптимізації зазначених ґрунтообробних знарядь, наприклад зображеної на рис. 4.8 ... 4.10 номенклатури, може бути застосований за аналогією викладений у пункті 3.2.3 метод експертного оцінювання техніко-економічних та інших показників опрацьовуваних об'єктів.

Коротко зупинимось на такому, ще не розглянутому моменті автоматизованого проєктування, як використання побудованих комп'ютерних

твердотільних моделей для виконання розрахунків на міцність, зокрема, методом скінченних елементів у САЕ системах. Його головна ідея полягає в поділі вихідного об'єкта на окремі пов'язані між собою дрібні складові, наприклад, тетраедри. Це здійснюється за допомогою такої процедури, як формування сітки. Параметрами останньої є середній та мінімальний розмір застосованих елементів, коефіцієнт їхньої різномірності тощо. Зменшення зазначених компонентів підвищує точність обчислень, але призводить до збільшення витрат ресурсів у вигляді необхідної комп'ютерної пам'яті та часу розрахунків.

На поданому нижче рисунку показано вихідну твердотільну геометричну модель опрацьованого різновиду ґрунтообробного диска, її заміну на множини взаємопов'язаних скінченних елементів, проілюстровано результати обчислень у вигляді належної кольорової гами діючих напружень. Здійснювати розбиття тіл на дрібні частинки можна за методикою, викладеною в докторській дисертації [61]. При цьому головна ідея полягає у триангуляції спочатку зовнішніх поверхонь тривимірної фігури, а потім заповнення її внутрішніх об'ємів потрібними тетраедрами.

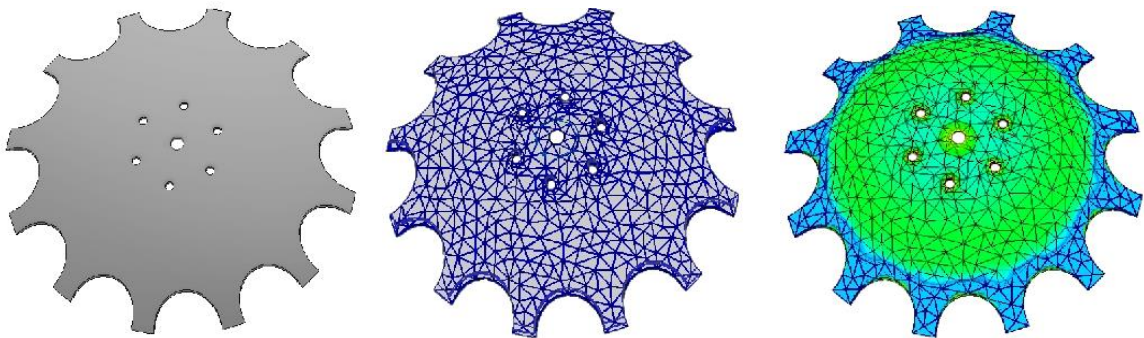


Рис. 4.12. Розрахунки на міцність методом скінченних елементів

Отримана сітка характеризується певним числом елементів і вузлів. Оскільки міцність не становлять предмет даних наукових досліджень, то такі аспекти, як обрання конкретних конструкційних матеріалів, їхні механічні властивості, дефініція діючих навантажень, умов закріплення дисків, отримані деформації, змінювання останніх у часі і т. д. виходять за рамки тематики дисертації. Проте, для забезпечення цілісного уявлення про сучасне

автоматизоване формоутворення технічних об'єктів взагалі та сільсько-господарських знарядь зокрема, було виконано наведені вище коментарі. Це також стосується й наступного підрозділу, який присвячено виготовленню ґрунтообробних дисків.

Зауважимо, що для оптимізації геометрії вказаних засобів їхнє визначення з точки зору агротехнічних вимог обов'язково треба поєднувати з інженерними розрахунками на міцність, питаннями технології виробництва, експлуатації, економічними, екологічними та ін. Акцентований підхід червоною ниткою проходить через усю дану наукову працю. Окреслені обставини обумовлюють відповідний ітераційний інтегрований комплексний характер сучасного автоматизованого проектування.

4.4. Відтворення технологічних операцій виготовлення дисків

Для нинішніх комп'ютерних технологій в аспекті реалістичного відображення життєвого циклу промислової продукції важливе належне моделювання виробничих процесів. Виготовлення дисків (4.14) ... (4.21) включає послідовність таких технологічних операцій

$$TO = (TO_i)_{i=1}^{N_{TO}} = (TO_i)_{i=1}^4, \quad (4.38)$$

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

Дії (4.38) виконуються фрезеруванням, свердлінням, лазерним променем, штампуванням тощо. Зазначені операції стосуються, зокрема, комп'ютерного твердотілого формоутворення з використанням розглянутих у підпункті 2.2.3.1 таких інструментів, як фрези, свердла і т. д. Для реалізації вказаних динамічних процесів, які в загальному вигляді визначаються виразом (2.2), застосовуються викладені в дисертації [69] способи, прийоми, алгоритми та методики. Наведені засоби, крім оброблення різанням, також цілком підходять для відтворення й лазерного променя.

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

$$\mathbf{r}(u, v, w) = (vr_x(u), vr_y(u), wH), \quad (4.39)$$

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 (4.39) відповідає поданому в підпункті 2.2.1.1 дисертації геометричному засобу $ГС_{112}$, тобто кінематичному способу створення тіла за допомогою поверхні (належного поперечного перерізу інструмента). Це ж стосується й розглянутих у підпункті 2.2.3.1 фрез, свердел тощо. Але в останньому випадку, на відміну від попереднього, в якості напрямної вжито не відрізок прямої лінії, а коло.

Для виготовлення проаналізованих у підрозділі 4.3 дисків із неплюскою базовою поверхнею застосовуються всі чотири технологічні операції (4.38), а для плоских – тільки перші дві або три. Під час автоматизованого комп'ютерного формоутворення дії $ТО_1$, $ТО_2$ та $ТО_3$ можуть бути реалізовані геометричними способами модифікації $ГС_{231}$, див. вираз (2.23), тобто у вигляді віднімання від опрацьовуваного виробу потрібних точок відповідного інструмента. Даний процес моделюється як миттєвий або динамічний (у часі), наприклад, згідно з поданими в дослідженні [69] методиками. Для операції $ТО_4$ підходить спосіб $ГС_{222}$, див. кортеж (2.22), з урахуванням конкретних наявних умов.

СПГМ виготовлення дисків показано на рис. 4.13. Беручи до уваги пояснення, виконані у третьому розділі дисертації до рис. 3.64 стосовно інтегрованого комплексного характеру відтворення такими мультіграфами різноманітних властивостей опрацьовуваних об'єктів, цей засіб автоматизованого проєктування варто також вважати належною ІКГМ.

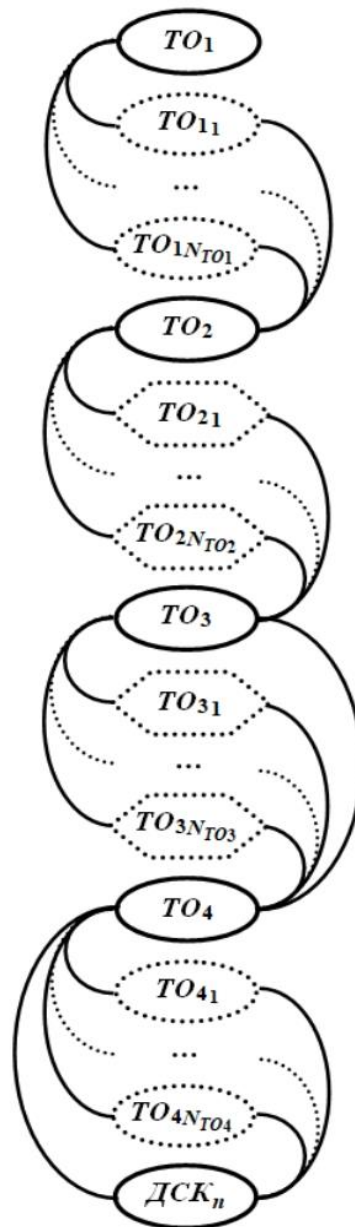


Рис. 4.13. СПГМ виготовлення дисків

До складу цієї моделі входять множини варіантів виконання технологічних операцій (4.38)

$$\begin{aligned}
 TO_1 &= (TO_{1j})_{j=1}^{N_{TO_1}}, & TO_2 &= (TO_{2j})_{j=1}^{N_{TO_2}}, & TO_3 &= (TO_{3j})_{j=1}^{N_{TO_3}}, \\
 TO_4 &= (TO_{4j})_{j=1}^{N_{TO_4}}. & & & & & (4.40)
 \end{aligned}$$

У кортежах (4.40) друга та третя операція формоутворення є циклічно повторюваною (побудова отворів та вирізів), див. належні зображення у вигляді шестикутників на рис. 4.13. Також бачимо, що дії TO_3 та TO_4 є необов'язковими.

Рис. 4.14 ілюструє наведену вище технологію виробництва проаналізованих сільськогосподарських знарядь.

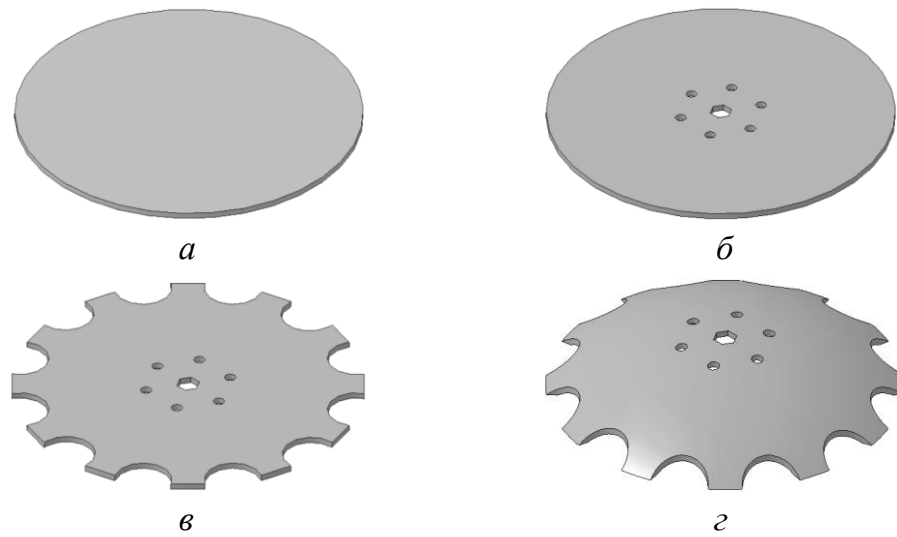


Рис. 4.14. Комп'ютерні моделі послідовності виготовлення дисків:
а – плоска заготовка після обрізання зовнішнього контуру (TO_1);
б – сформовані отвори (TO_2); *в* – зроблені вирізи (TO_3);
г – отримана сферична поверхня (TO_4)

Коли не виконувати третю та четверту операції, то одержимо плоский диск без вирізів. Не здійснювати третю – матимемо такий же непловкий диск. Без останньої – плоский із вирізами. Зрозуміло, що в описаних випадках базові поверхні, вирізи та отвори здатні бути довільними з множин (4.14) ... (4.21).

Розглянемо математичну модель деформації вихідної заготовки у вигляді диска (прямого кругового циліндра з висотою, тобто товщиною δ , 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 .

Візьмемо для прикладу диск 1 із додатків А.3.3, див. також вираз (4.32). Нехай технологічний процес реалізується листовим штампуванням без потоншення матеріалу. Тоді умова сталості об'єму заготовки та деталі еквівалентна рівності площ їхніх серединних поверхонь, тобто

$$A_3 = A_d, \quad (4.41)$$

де площа заготовки

$$A_3 = \frac{\pi D_3^2}{4}, \quad (4.42)$$

площа деталі (диска)

$$A_D = 2\pi RH. \quad (4.43)$$

У нашому випадку, див. рис. 4.11, рис. А.15 та кортеж (4.32),

$$\begin{aligned} H &= R - \sqrt{R^2 - \left(\frac{D}{2}\right)^2} = \\ &= 750 \text{ мм} - \sqrt{(750 \text{ мм})^2 - \left(\frac{700 \text{ мм}}{2}\right)^2} \approx 86,675 \text{ мм}. \end{aligned} \quad (4.44)$$

На підставі виразів (4.43), (4.44)

$$A_D = 2 \cdot 3,1416 \cdot 750 \text{ мм} \cdot 86,675 \text{ мм} \approx 408447 \text{ мм}^2. \quad (4.45)$$

Зі співвідношень (4.41), (4.42), (4.45) маємо

$$D_3 = \sqrt{\frac{4A_D}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 408447 \text{ мм}^2}{3,1416}} \approx 721,15 \text{ мм}. \quad (4.46)$$

З формул (4.41) ... (4.43) отримуємо

$$R = \frac{D_3^2}{8H}. \quad (4.47)$$

Графіки залежності (4.47) для величини (4.46) та змінювання висоти сферичного сегмента від нуля до значення (4.44) ілюструє рис. 4.15. 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. Друге зображення більшого масштабу підтверджує, що остаточний радіус серединної сферичної поверхні опрацьовуваного диска дорівнює 750 мм.

Рис. 4.16 наочно демонструє формоутворення досліджуваного виробу в моменти часу, які відповідають наведеним висотам деформації. Додатково подано також довжину L вказаних дуг.

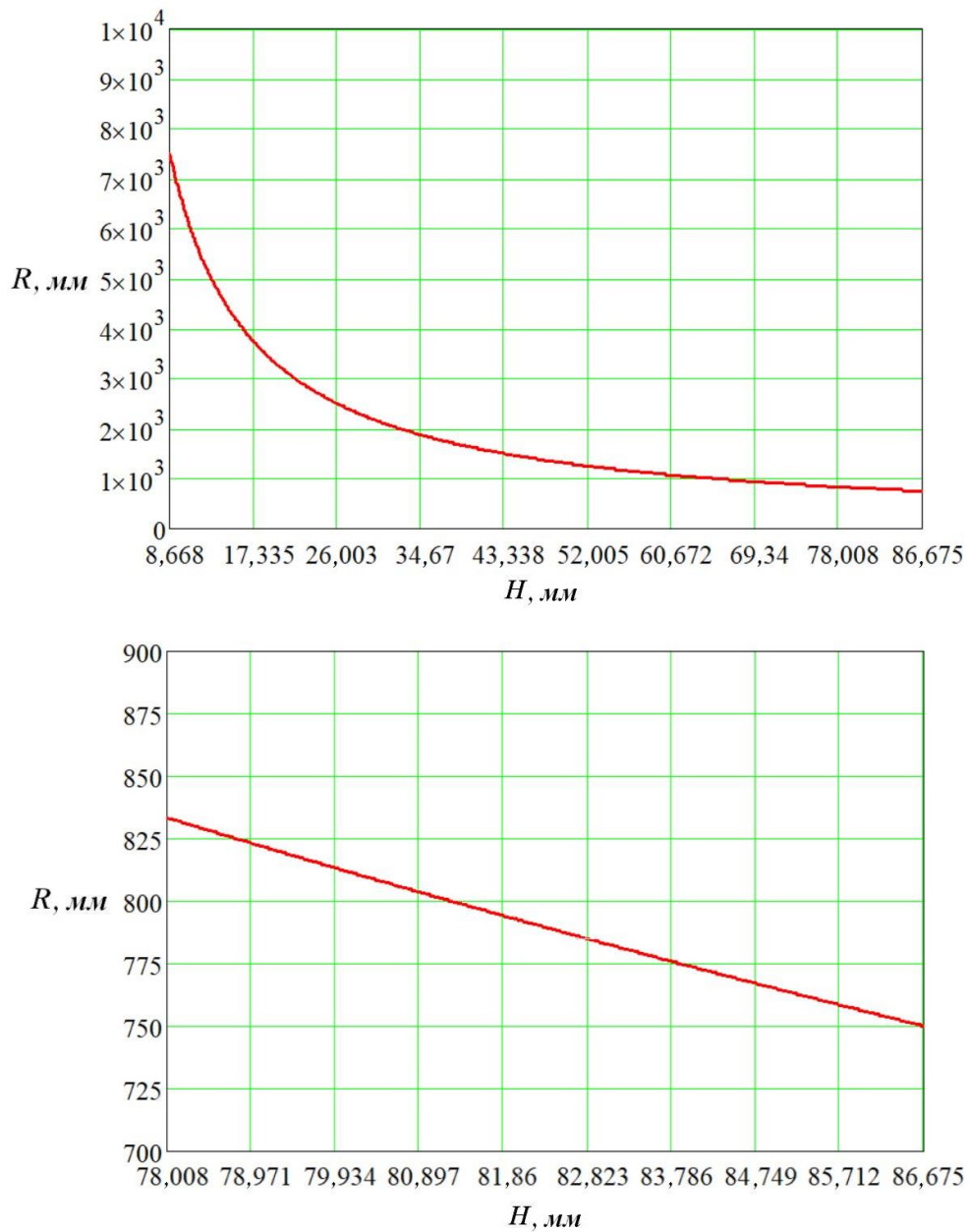


Рис. 4.15. Характер деформації вихідної заготовки

Виконані контрольні обчислення площ сферичних сегментів підтвердили збереження площі вихідної заготовки. Отже й об'єм диска залишається сталим, який у даному випадку дорівнює

$$V_D = A_D \cdot \delta = 408447 \text{ мм}^2 \cdot 10 \text{ мм} = 4,08447 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3. \quad (4.48)$$

При застосуванні конструкційного матеріалу сталі з густиною

$$\rho = 7850 \text{ кг/м}^3 \quad (4.49)$$

на підставі виразів (4.48) і (4.49) будемо мати наступну орієнтовну масу

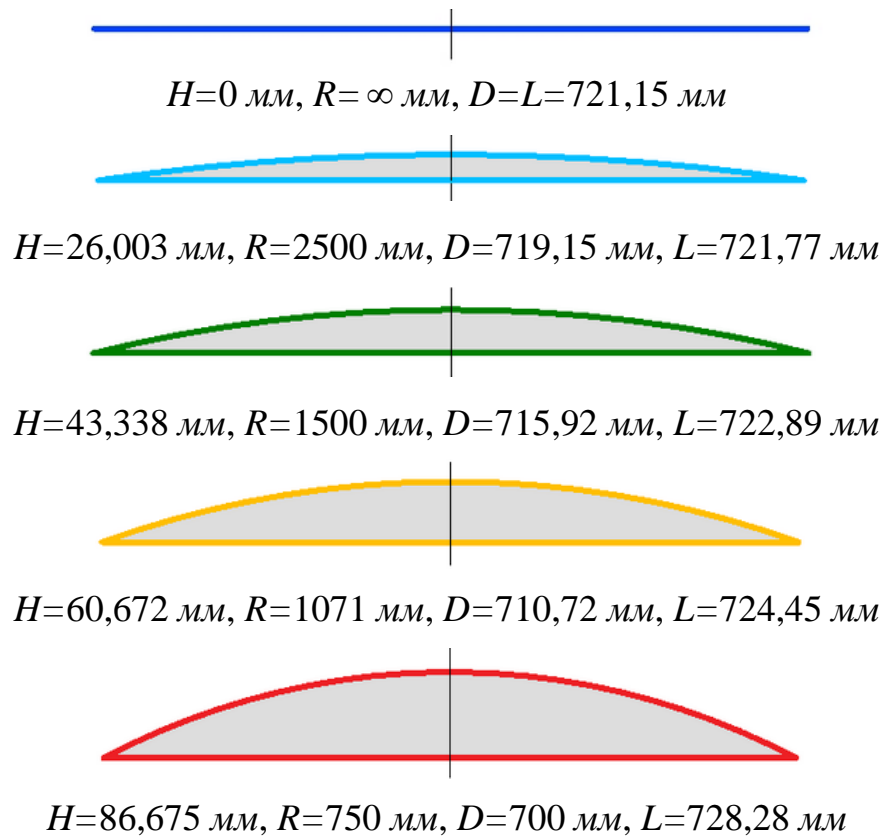


Рис. 4.16. Динаміка формування диска

грунтообробного диска

$$m_D = V_D \cdot \rho = 4,08447 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 \cdot 7850 \text{ кг/м}^3 \approx 32,063 \text{ кг}. \quad (4.50)$$

Обчислена величина (4.50) важлива не тільки в аспекті виготовлення розглянутого технічного об'єкта, а й подальшої його експлуатації.

Отже, в цьому підрозділі нами проаналізовано деякі аспекти відтворення технології виробництва сільськогосподарських дисків. Головна мета полягала у практичному підтвердженні інтегрованого комплексного впливу геометричних параметрів та характеристик також і на зазначені процеси.

Висновки до розділу 4

У цьому розділі дисертації на прикладі ґрунтообробних дисків висвітлено деякі додаткові, ще не розглянуті питання інтегрованого комплексного геометричного моделювання технічних об'єктів. Наведені матеріали належним чином доповнюють подані вище відомості стосовно полицевих і чизельних сільськогосподарських знарядь.

Отримано наступні нові науково-практичні результати.

1. Напрацьовано методику раціонального вибору типу ґрунтообробних знарядь, яка базується на застосуванні запропонованих комп'ютерних графоаналітичних моделей, проілюстровано її використання для ротаційних органів.

Акцентоване завдання доволі важливе на початковому етапі проектування різноманітних технічних об'єктів, полягає у визначенні їхнього базового типу, загальної будови, головних принципів функціонування і т. д. Особлива відповідальність цієї задачі обумовлена тим, що здійсненні на даному етапі помилки та неточності надалі досить важко або навіть неможливо виправити. Незважаючи на те, що окреслене питання безпосередньо не стосується геометричного моделювання ґрунтообробних знарядь, дотичне до нього, але в аспекті інтегрованого комплексного формоутворення промислової продукції достатньо відповідальне.

2. Виконано структурно-параметричну класифікацію ґрунтообробних дисків, що забезпечило розроблення належних геометричних моделей для продуктивних автоматизованих побудов зазначеної групи технічних об'єктів.

В основу систематизації даних сільськогосподарських знарядь покладено форму їхньої базової поверхні, вирізи та отвори. Ефективне комп'ютерне генерування потрібних комбінацій вказаних характеристик дозволяє в багатоманітних аспектах аналізувати необхідні властивості ґрунтообробних дисків.

3. Здійснено автоматизоване варіантне формоутворення дискових робочих органів, яке здатне гнучко адаптуватися до наявних суперечливих вимог проектування.

Для реалізації інтегрованого комплексного підходу рекомендовано застосовувати метод експертних оцінок та методологію структурно-параметричної оптимізації. Розглянуто напрямок використання побудованих моделей ґрунтообробних дисків для виконання розрахунків їхньої міцності методом скінченних елементів.

4. Виконано геометричне моделювання деяких технологічних процесів формоутворення сільськогосподарських дисків, показано важливість урахування розглянутих та інших подібних факторів для забезпечення цілісного інтегрованого комплексного підходу до автоматизованого проєктування промислової продукції.

Підкреслено, що для підвищення продуктивності праці необхідно однією комп'ютерною моделлю прагнути охоплювати, звісно без її невиправданого ускладнення, якомога більшу кількість опрацьовуваних технологічних варіантів, тобто застосовувати належні узагальнені моделі. Це сприяє успішній реалізації на практиці інтегрованого комплексного підходу до геометричного моделювання технічних об'єктів.

Отже, матеріали четвертого розділу дисертаційного дослідження характеризуються поданою вище науково-практичною цінністю, яка сприяє покращенню якості ґрунтообробних сільськогосподарських знарядь.

Публікації автора з розглянутих питань: [243, 251, 252, 255, 258, 264, 267, 279, 280, 282, 286, 288, 289, 291–297].

Список публікацій здобувача за матеріалами розділу 4

1. Яблонський П.М. Деякі аспекти проєктування ґрунтообробних дисків. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. Прикладна геометрія та інженерна графіка*. Мелітополь: ТДАТУ, 2013. Вип. 4. Т. 56. С. 258–262.

2. 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. Особистий внесок здобувача: запропоновано спосіб класифікації дискових робочих органів ґрунтообробних знарядь на базі структурно-параметричного підходу до формоутворення.

3. 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. Особистий внесок здобувача: розроблено теоретичні основи автоматизованого геометричного моделювання групи технічних об'єктів на прикладі дискових ґрунтообробних знарядь шляхом узагальнення засобів комп'ютерного формоутворення на засадах використання принципу інтеграції.

4. 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. Особистий внесок здобувача: запропоновано методикау автоматизованого геометричного моделювання групи технічних об'єктів на прикладі дискових ґрунтообробних знарядь.

5. 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. Особистий внесок здобувача: опрацьовано питання використання поданих методів, способів, прийомів та алгоритмів геометричного моделювання в інших, ніж машинобудування, галузях промисловості, зокрема для автоматизованого проєктування ґрунтообробних знарядь.

6. 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. Особистий внесок здобувача: в ротаційному ґрунтообробному плузі з привідним барабаном на горизонтальній осі та радіально закріпленими на ньому ножами П-подібної форми запропоновано поділяти останні на окремі частини.

7. Яблонський П.М., Ванін В.В., Вірченко Г.А., Юрчук В.П. Інтегрований комплексний підхід до геометричного моделювання дискових робочих органів ґрунтообробних знарядь. *Сучасні проблеми моделювання*. Мелітополь: МДПУ, 2020. Вип. 18. С. 52–60. Особистий внесок здобувача: розроблено засади інтегрованого комплексного геометричного моделювання технічних об'єктів на прикладі дискових робочих органів ґрунтообробних знарядь.

8. 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. Особистий внесок здобувача: розроблено геометричний підхід до моделювання робочої поверхні дискової борони, яка містить щілини з різальними ножами.

9. 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. Особистий внесок здобувача: вдосконалено конструкцію корнезбиральних пристроїв, визначення їхніх раціональних параметрів.

10. Яблонський П.М., Гумен О.М. Геометричне моделювання робочого органу ґрунтообробної фрези. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. Прикладна геометрія та інженерна графіка*. Мелітополь: ТДАТУ, 2012. Вип. 4. Т. 54. С. 43–47. Особистий внесок здобувача: удосконалено робочі органи ґрунтообробних фрез шляхом використання їхніх раціональних конструктивних параметрів із метою підвищення ефективності кришіння ґрунту та зниження енергоємності застосовуваних процесів.

11. 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. Особистий внесок здобувача: розроблено комп'ютерну тривимірну геометричну модель сферичного ґрунтообробного диска.

12. 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. Особистий внесок здобувача: обґрунтовано необхідність напрацювання нових методів геометричного моделювання робочих органів сільськогосподарських машин.

13. Яблонський П.М., Подкоритов А.М., Юрчук В.П. Використання теорії спряжених поверхонь під час конструювання робочих органів корене-биральних машин. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 368 с. Особистий внесок здобувача: досліджено зв'язок геометричної форми вирізу на ободі сферичного диска ґрунтообробного знаряддя з процесом виникнення явища інтерференції під час обробітку ґрунту, сформульовано рекомендації щодо визначення раціональної геометричної форми. Запропоновано алгоритм визначення конструктивних параметрів ґрунтообробного диска. Розроблено нові комп'ютерні геометричні моделі сферичних дисків ґрунтообробних знарядь, які дозволяють зменшити кількість проведених натурних експериментів.

14. 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. Особистий внесок здобувача: запропоновано застосування методу спряження поверхонь для геометричного моделюванні робочих органів ґрунтообробних знарядь.

15. 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. Особистий внесок здобувача: обґрунтовано необхідність напрацювання нових методів геометричного моделювання робочих органів сільськогосподарських машин.

16. Яблонський П.М., Юрчук В.П., Вознюк Т.А., Святиня М.А., Изволенська А.Є., Глінський Є.М. Дискава борона. Патент на корисну модель № 85964. Номер заявки u201306664. Дата заявки 28.05.2013. Патент опубліковано 10.12.2013. Бюл. № 23. 2 с. Особистий внесок здобувача: розроблено борону, що містить диски з щілинами, змонтовані різальні ножі, розміщені вздовж циклоїд.

17. 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. Особистий внесок здобувача: отримано

залежність граничного радіуса вирізу круглої форми від діаметра ґрунтообробного диска при якому відсутнє явище інтерференції.

18. Яблонський П.М., Юрчук В.П., Карпюк В.В., Бакалова В.М., Святиня 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. Особистий внесок здобувача: запропоновано збільшення виконання русла стискання та розтягування у вигляді двох сферичних поясів, які забезпечують значне руйнування внутрішньо-ґрунтових зв'язків між собою.

19. Яблонський П.М., Юрчук В.П., Карпюк В.В., Макаров В.І., Святиня 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. Особистий внесок здобувача: запропоновано покращення руйнування та сепарації пласта землі за рахунок дисків, які створюють русло стискання пласта, а потім його розширення.

20. 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. Особистий внесок здобувача: розглянуто питання формалізації зв'язків агротехнологічних вимог з апаратом геометричного моделювання робочих поверхонь сільськогосподарських машин.

РОЗДІЛ 5

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ОБРОБІТКУ ҐРУНТУ

Дану частину дослідження присвячено математичному опису процесів обробітку ґрунту з використанням сільськогосподарських знарядь, розглянутих у попередніх розділах 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. У зв'язку з нинішньою великою популярністю й перспективністю ґрунтообробних дисків завдяки їхній універсальності, економічності, екологічності та іншим перевагам, а також із метою виключення дублювання відомостей, які подаються, один з основних акцентів здійснено саме на цих знаряддях. Також проілюстровано проектування культиваторів суцільного обробітку ґрунту, побудову комп'ютерних твердотільних геометричних моделей їхньої конструкції. Наведені матеріали цього розділу певним чином підсумовують й узагальнюють отримані науково-практичні результати.

5.1. Траєкторії руху в технологічних процесах

Під час експлуатації різноманітних сільськогосподарських агрегатів через вплив багатьох факторів доволі часто спостерігається недотримання визначених напрямів руху. Це 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.

Публікацією [113] вказується, що при дослідженнях руху сільськогосподарських знарядь із коливаннями у вертикальній та горизонтальній площині застосовують опрацьовувану траєкторію у вигляді певної синусоїди, див., зокрема, рис. 5.1.

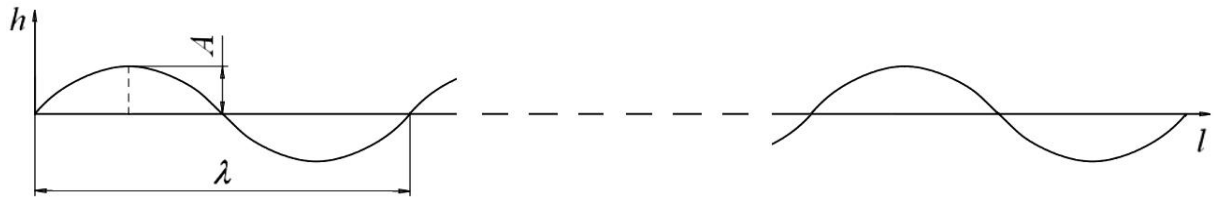


Рис. 5.1. Математична модель поздовжнього профілю поля у вертикальній площині

На наведеному зображенні l – це горизонтальна відстань переміщення вздовж поля, h – висота, A та λ – амплітуда й довжина хвилі коливань. Згідно з останньою величиною розрізняють: до 1,4 м – малі; від 1,4 м до 20 м – середні; більші за 20 м – великі хвилі. Стосовно висоти нерівностей A : до 0,1 м – малі відхилення; від 0,1 м до 0,2 м – середні; більші за 0,2 м – великі. Рух по синусоїді, замість прямої, порушує потрібну швидкість обробітку ґрунту, зростає приблизно на 5 % необхідна потужність трактора, а також витрати пального внаслідок довшого пройденого шляху L сільськогосподарським знаряддям.

За відомою формулою маємо

$$L = \int_0^l \sqrt{1 + h'(l)^2} dl. \quad (5.1)$$

У нашому випадку

$$h(l) = A \sin(2\pi l / \lambda), \quad h'(l) = A \frac{2\pi}{\lambda} \cos(2\pi l / \lambda). \quad (5.2)$$

Тоді, на підставі залежностей (5.1) і (5.2), отримуємо

$$L = 4 \cdot \int_0^{l/4} \sqrt{1 + \left(A \frac{2\pi}{\lambda} \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} l\right)\right)^2} dl. \quad (5.3)$$

Вираз (5.3) не можна визначити в кінцевому вигляді без використання таблиць інтегралів. У виданні [113] для виконання дослідження впливу таких геометричних параметрів, як амплітуда A та довжина λ хвиль коливань застосовується розкладання наведеної кореневої функції в ряд Маклорена й подальше спрощення даного інтеграла. При цьому не береться до уваги те, що зазначений ряд розходиться. Останнє призводить до суттєвих похибок в аналізі опрацьовуваних геометричних факторів.

Проілюструємо розглянутим прикладом запропонований на засадах структурно-параметричної методології порядок вирішення подібних питань. Покажемо, що це забезпечує значно кращу точність обчислення потрібних геометричних характеристик, ніж поданих у зазначеній публікації.

Нехай необхідно проаналізувати наступні проміжки

$$A = [0,05 \text{ м} \dots 0,3 \text{ м}], \lambda = [0,5 \text{ м} \dots 50 \text{ м}]. \quad (5.4)$$

Представимо їх дискретними множинами, для амплітуди з кроком 0,5 м, а для довжин хвиль спочатку описаними вище діапазонами. Тоді будемо мати

$$A = (0,05 \text{ м}; 0,1 \text{ м}; 0,15 \text{ м}; 0,2 \text{ м}; 0,25 \text{ м}; 0,3 \text{ м}), \\ \lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3), \quad (5.5)$$

де

$$\lambda_1 \leq 1,4 \text{ м}; 1,4 \text{ м} < \lambda_2 \leq 20 \text{ м}; \lambda_3 > 20 \text{ м} \quad (5.6)$$

відповідно малі, середні та великі хвилі.

Потім

$$\lambda_1 = (0,5 \text{ м}; 1 \text{ м}; 1,4 \text{ м}), \\ \lambda_2 = (2 \text{ м}; 5 \text{ м}; 10 \text{ м}; 15 \text{ м}; 20 \text{ м}), \\ \lambda_3 = (25 \text{ м}; 30 \text{ м}; 40 \text{ м}; 50 \text{ м}). \quad (5.7)$$

Компоненти $t_{i,j}$ декартового добутку дискретних множин (5.5) і (5.7)

$$T = A \times \lambda = [t_{i,j}]_{6 \times 12} \quad (5.8)$$

заповнюємо належними величинами L наведеного вище інтеграла (5.3), розрахованого чисельними методами.

Далі для кожного елемента (5.8) застосовуємо формулу коефіцієнта збільшення довжини шляху робочого органа

$$K_3 = \frac{L}{l} \quad (5.9)$$

й отриманий результат заносимо в табл. 5.1.

Зростання довжини шляху робочих органів

Таблиця 5.1

| Коефіцієнт K_3 збільшення довжини шляху робочого органу | | | | | | | | | | | | |
|---|----------------|-------|-------|----------------|-------|-------|-------|-------|----------------|-------|-------|-------|
| | $\lambda_1, м$ | | | $\lambda_2, м$ | | | | | $\lambda_3, м$ | | | |
| $A, м$ | 0,5 | 1 | 1,4 | 2 | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 40 | 50 |
| 0,05 | 1,092 | 1,024 | 1,012 | 1,006 | 1,001 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 |
| 0,10 | 1,321 | 1,092 | 1,049 | 1,024 | 1,004 | 1,001 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 |
| 0,15 | 1,619 | 1,194 | 1,105 | 1,053 | 1,009 | 1,002 | 1,001 | 1,001 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 |
| 0,20 | 1,952 | 1,321 | 1,178 | 1,092 | 1,016 | 1,004 | 1,002 | 1,001 | 1,001 | 1,000 | 1,000 | 1,000 |
| 0,25 | 2,305 | 1,464 | 1,264 | 1,140 | 1,024 | 1,006 | 1,003 | 1,002 | 1,001 | 1,001 | 1,000 | 1,000 |
| 0,30 | 2,670 | 1,619 | 1,360 | 1,194 | 1,035 | 1,009 | 1,004 | 1,002 | 1,001 | 1,001 | 1,001 | 1,000 |

У ній для забезпечення кращого зорового сприйняття проведеного аналізу складових (5.1) ... (5.9) вжито такий важливий чинник геометричних моделей, як *колір*. Завдяки викладеному математичному підходу отримано суттєве уточнення, порівняно з наявною літературою, величин K_3 та областей (у координатах A, λ) знаходження відносно великих значень цього коефіцієнта. Червоним шрифтом у лівому нижньому куті таблиці показані режими, які, на нашу думку, не задовольняють вимогам охорони праці людей. Поряд таким же фоном зображено ті, що потребують в указаному плані необхідних уточнень. Решта клітин із білим фоном мають мізерний вплив на досліджувані характеристики. Комірki з малим контрастом реалізують зростання довжини шляху менш ніж на 1 %. Найтемніша область визначає збільшення K_3 приблизно на 1 % ... 10 %. Докладне опрацювання окреслених агротехнічних та ергономічних питань виходить за рамки тематики даної дисертації.

Ще більш наочним, в аспекті інтегрованого комплексного підходу, є застосування належних графічних діаграм у тривимірному просторі, див. рис. 5.2. На ньому показано ту частину табл. 5.1, яка варта подальшого аналізу з точки зору реального збільшення довжини шляху робочих органів. Це також становить приклад практичного застосування запропонованого способу зменшення області проектних розв'язків. Рис. 5.3 ілюструє перехід, на основі викладеного в підрозділі 2.3 математичного апарату, від сформованої дискретної геометричної моделі до неперервної аналітичної, побудованої на основі методу Кунса. При цьому також для забезпечення зручного сприйняття інформації використано певні кольори.

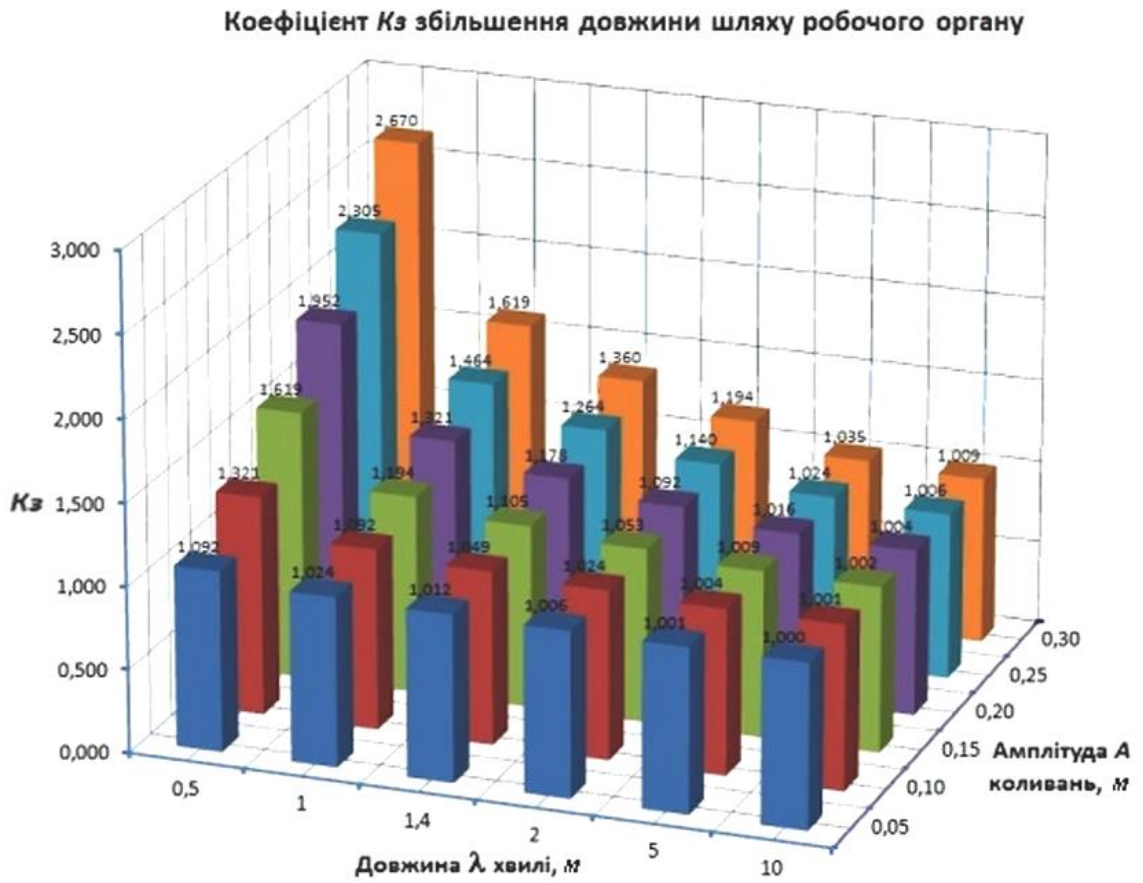


Рис. 5.2. Інформація фрагмента табл. 5.1 з довжиною хвилі $\lambda=(0,5 \text{ м}; 1 \text{ м}; 1,4 \text{ м}; 2 \text{ м}; 5 \text{ м}; 10 \text{ м})$

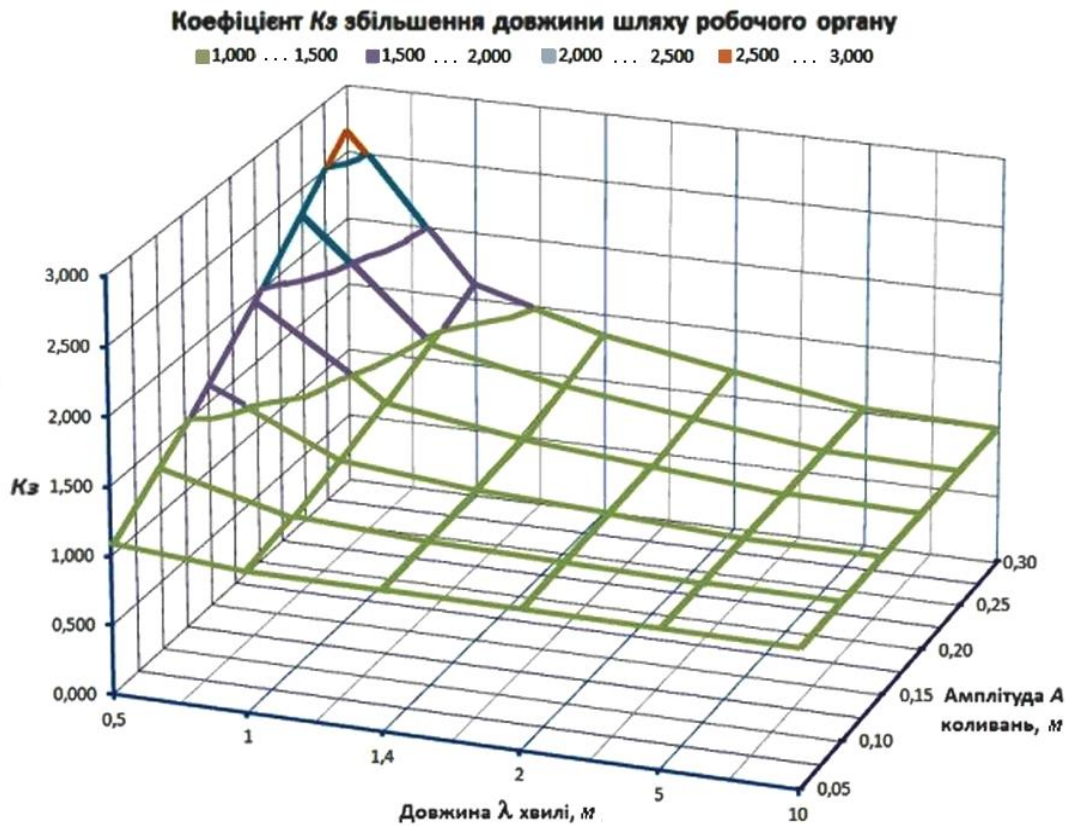


Рис. 5.3. Апроксимація множиною поверхонь Кунса

Подамо далі задачу дефініції єдиного аналітичного виразу для обчислення коефіцієнта K_3 у залежності від величин A та λ . Акцентуємо увагу на тому, що для отримання якісних результатів ці дії варто виконувати послідовно з відповідним поопераційним контролем. Обґрунтовує наведене твердження, зокрема рис. 5.4, на якому подано три графіка апроксимації кубічними поліномами коефіцієнта K_3 у вигляді функції від λ для фіксованих значень A .

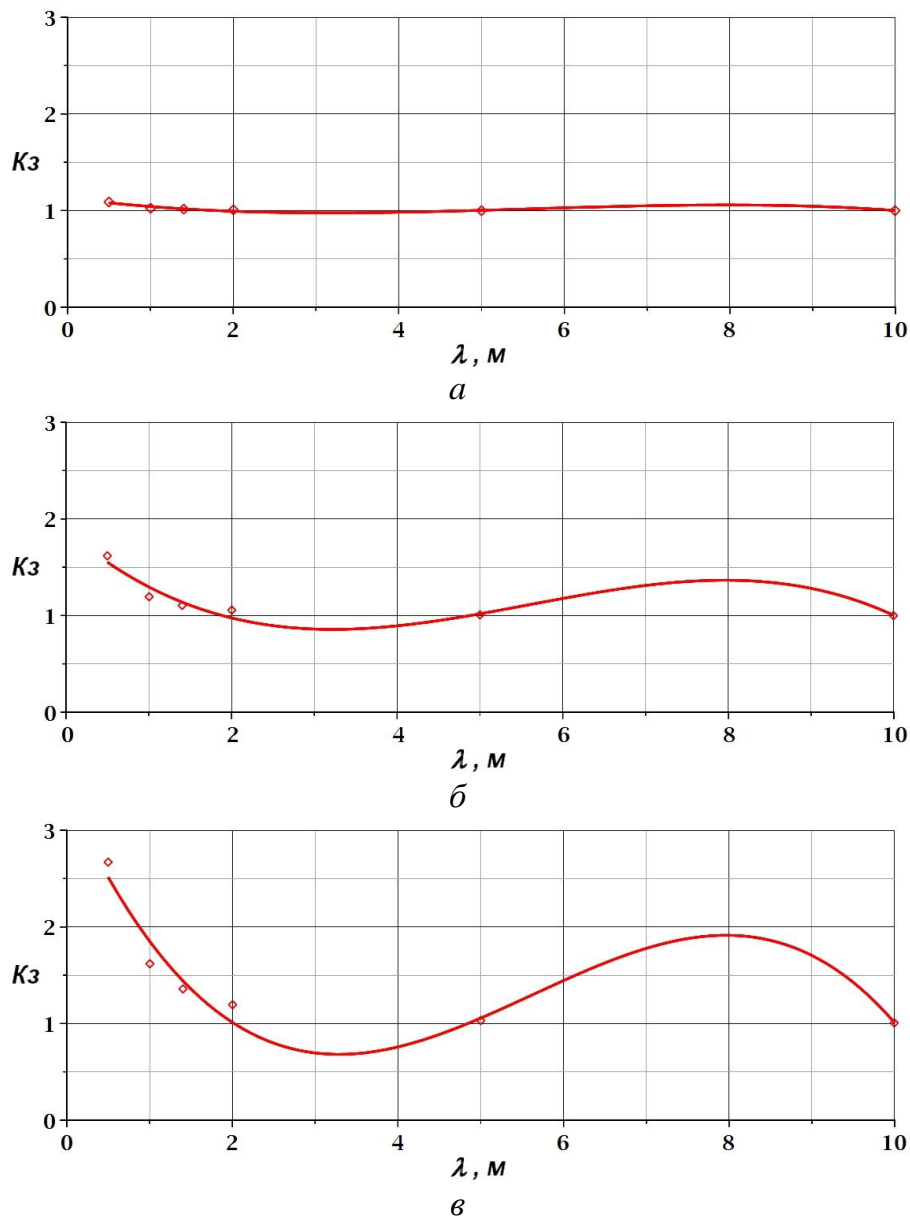


Рис. 5.4. Апроксимація залежностей $K_3=f(\lambda, A=const)$:

$a - A=0,05$ м; $б - A=0,15$ м; $в - A=0,3$ м

Для порівняння на рис. 5.5 наведено відповідну лінійну апроксимацію ламаною розглянутих даних.

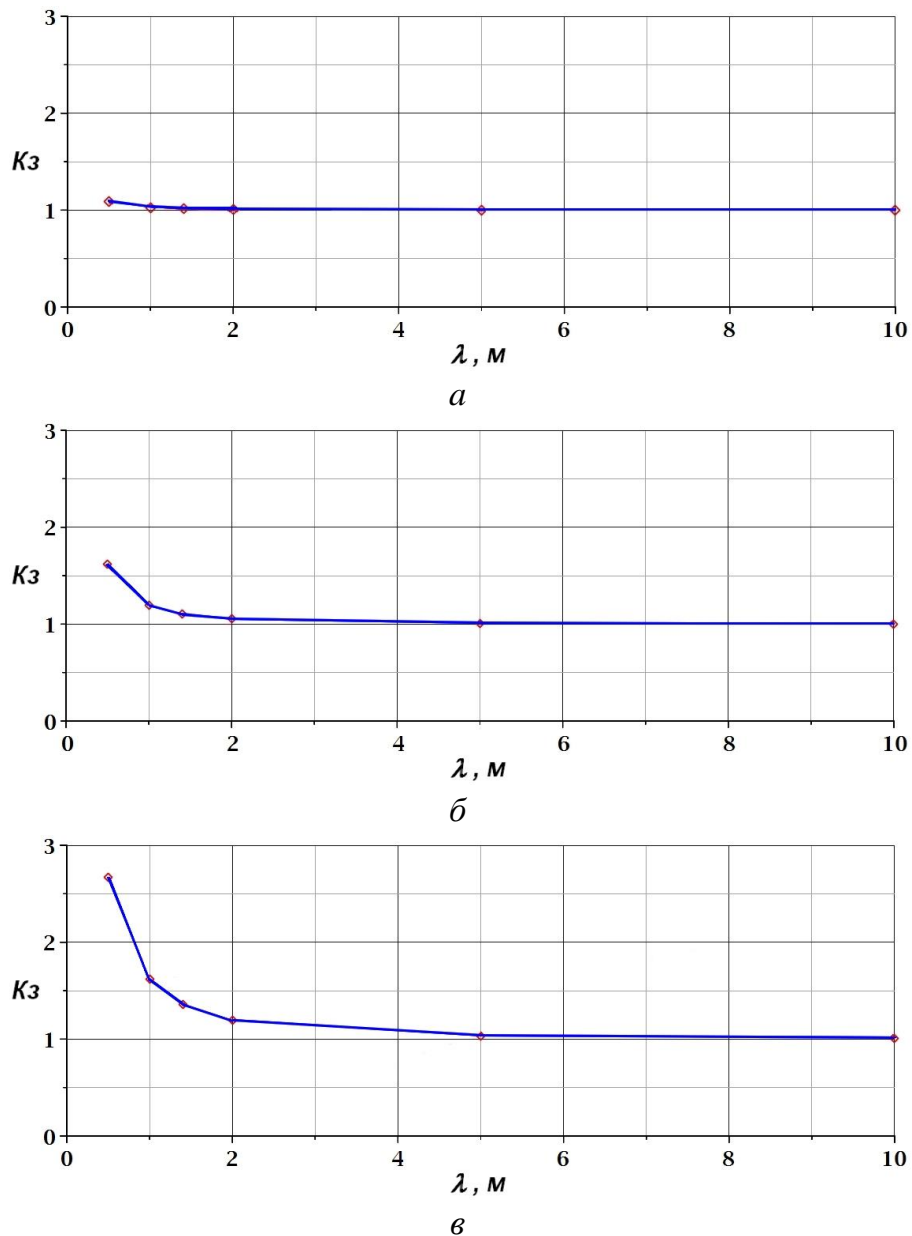


Рис. 5.5. Лінійна апроксимація точкових даних:

а – рис. 5.4, *а*; *б* – рис. 5.4, *б*; *в* – рис. 5.4, *в*

Рівняння кубічних поліномів, зображених на рис. 5.4:

– $A=0,05$ м

$$K_3(\lambda) = -0,001492 \cdot \lambda^3 + 0,024893 \cdot \lambda^2 - 0,11284 \cdot \lambda + 1,13093; \quad (5.10)$$

– $A=0,15$ м

$$K_3(\lambda) = -0,009556 \cdot \lambda^3 + 0,16024 \cdot \lambda^2 - 0,734702 \cdot \lambda + 1,880165; \quad (5.11)$$

– $A=0,30$ м

$$K_3(\lambda) = -0,024099 \cdot \lambda^3 + 0,406608 \cdot \lambda^2 - 1,89163 \cdot \lambda + 3,361667. \quad (5.12)$$

Як видно, більш коректні результати, незважаючи на свою простоту, забезпечує лінійна апроксимація. Основним її недоліком стосовно дефініції аналітичних залежностей для неперервного випадку у вигляді поверхонь, див. рис. 5.3, є відносно велике число останніх. Головна вада співвідношень (5.10) ... (5.12), крім суттєвих неточностей, полягає в якісному спотворенні модельованої залежності. Мається на увазі те, що коефіцієнт K_3 не може бути меншим одиниці.

На засадах запропонованого способу зменшення області проєктних розв'язків для виключення описаних огріхів будемо опрацьовувати далі множини

$$A = (0,05 \text{ м}; 0,1 \text{ м}; 0,15 \text{ м}), \quad \lambda = (1 \text{ м}; 1,4 \text{ м}; 2 \text{ м}; 5 \text{ м}). \quad (5.13)$$

Величини (5.13) обумовлені наступними міркуваннями. Порівняно з попередньою проаналізованою областю, див. рис. 5.2, видалено довжину хвилі $\lambda=10 \text{ м}$ через її недостатній вплив (менше 1 %, див. табл. 5.1) на збільшення довжини шляху робочих органів. У звичайних умовах $\lambda=0,5 \text{ м}$ є малоїмовірною, тому теж далі не береться до уваги. Для тих довжин хвиль, які залишилися, найпоширеніші амплітуди до 0,15 м.

Зменшену область розв'язків ілюструє табл. 5.2.

Поточна область проєктних розв'язків *Таблиця 5.2*

| | | $\lambda, \text{ м}$ | | | |
|----------------|--|----------------------|-------|-------|-------|
| $A, \text{ м}$ | | 1 | 1,4 | 2 | 5 |
| 0,05 | | 1,024 | 1,012 | 1,006 | 1,001 |
| 0,10 | | 1,092 | 1,049 | 1,024 | 1,004 |
| 0,15 | | 1,194 | 1,105 | 1,053 | 1,009 |

На рис. 5.6 наведено три графіка апроксимації кубічними поліномами коефіцієнта K_3 як функції від λ для фіксованих значень A та нового проміжку довжини хвиль. Рівняння відповідних ліній мають вигляд:

$$- A=0,05 \text{ м}$$

$$K_3(\lambda) = -0,004421 \cdot \lambda^3 + 0,039454 \cdot \lambda^2 - 0,105412 \cdot \lambda + 1,09438; \quad (5.14)$$

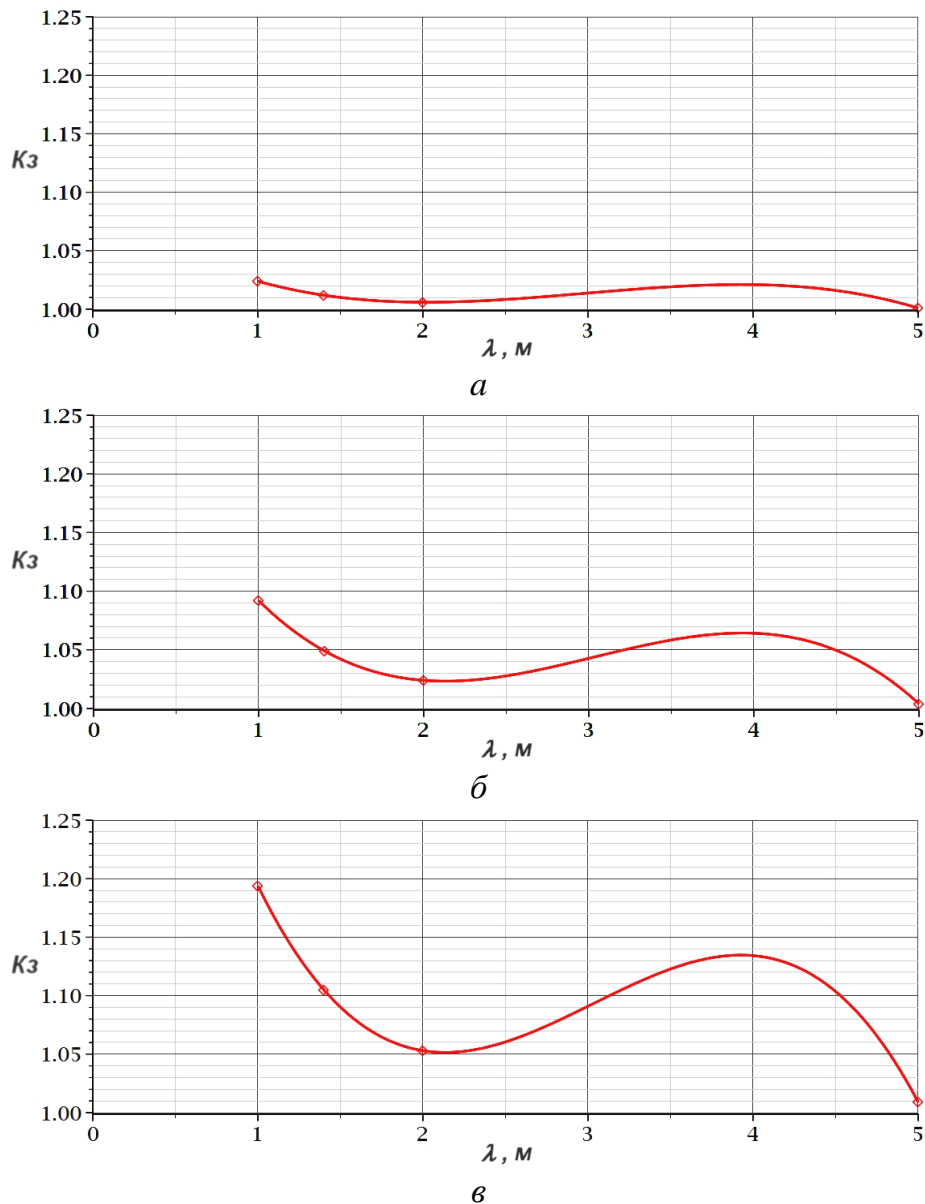


Рис. 5.6. Апроксимація залежностей $K_3=f(\lambda, A=const)$

на зменшеній області проєктних розв'язків:

$a - A=0,05$ м; $б - A=0,1$ м; $в - A=0,15$ м

– $A=0,1$ м

$$K_3(\lambda) = -0,014028 \cdot \lambda^3 + 0,127556 \cdot \lambda^2 - 0,352472 \cdot \lambda + 1,33094; \quad (5.15)$$

– $A=0,15$ м

$$K_3(\lambda) = -0,028958 \cdot \lambda^3 + 0,26325 \cdot \lambda^2 - 0,728042 \cdot \lambda + 1,68775. \quad (5.16)$$

Як бачимо з рис. 5.6, вирази (5.14) ... (5.16) забезпечили якісну адекватність створюваної моделі (мається на увазі, що тепер величина K_3 більша одиниці), але ще не кількісну. Під останньою розуміємо наявні доволі суттєві числові відхилення.

Для їхнього усунення застосовується прийом уточнення області проектних розв'язків. У даному випадку він реалізується додаванням кількох точок у просторі (A, λ, K_3) . Оскільки величини амплітуд A фіксовані, тобто $A=(0,05 \text{ м}; 0,1 \text{ м}; 0,15 \text{ м})$, то введемо нові довжини хвиль $\lambda_H=(3 \text{ м}; 4 \text{ м})$. Розрахуємо належні коефіцієнти K_3 і заповнимо табл. 5.3, де додані λ_H помічено зеленим кольором.

Уточнена область розв'язків для K_3 Таблиця 5.3

| | $\lambda, \text{ м}$ | | | | | |
|----------------|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $A, \text{ м}$ | 1 | 1,4 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 0,05 | 1,024 | 1,012 | 1,006 | 1,003 | 1,002 | 1,001 |
| 0,10 | 1,092 | 1,049 | 1,024 | 1,011 | 1,006 | 1,004 |
| 0,15 | 1,194 | 1,105 | 1,053 | 1,024 | 1,014 | 1,009 |

Рис. 5.7 ілюструє апроксимацію кубічними поліномами коефіцієнта K_3 для значень A та λ табл. 5.3.

Відповідні рівняння мають вигляд:

– $A=0,05 \text{ м}$

$$K_3(\lambda) = -0,001422 \cdot \lambda^3 + 0,015298 \cdot \lambda^2 - 0,053256 \cdot \lambda + 1,062322; \quad (5.17)$$

– $A=0,1 \text{ м}$

$$K_3(\lambda) = -0,004870 \cdot \lambda^3 + 0,053597 \cdot \lambda^2 - 0,192025 \cdot \lambda + 1,231894; \quad (5.18)$$

– $A=0,15 \text{ м}$

$$K_3(\lambda) = -0,010016 \cdot \lambda^3 + 0,110461 \cdot \lambda^2 - 0,397286 \cdot \lambda + 1,483963. \quad (5.19)$$

Виконавши квадратичну апроксимацію ліній (5.17) ... (5.19) поверхнею за підходом (2.97) і (2.98), отримуємо:

$$K_3(a, \lambda) = \sum_{i=0}^2 a_i(a) \lambda^i, \quad (5.20)$$

де

$$a_0(a) = 16,4996 \cdot a^2 + 0,916492 \cdot a + 0,97525;$$

$$a_1(a) = -13,2983 \cdot a^2 - 0,78065 \cdot a + 0,01902;$$

$$a_2(a) = 3,71301 \cdot a^2 + 0,20903 \cdot a - 0,00444;$$

$$a_3(a) = -0,33985 \cdot a^2 - 0,01797 \cdot a + 0,00033.$$

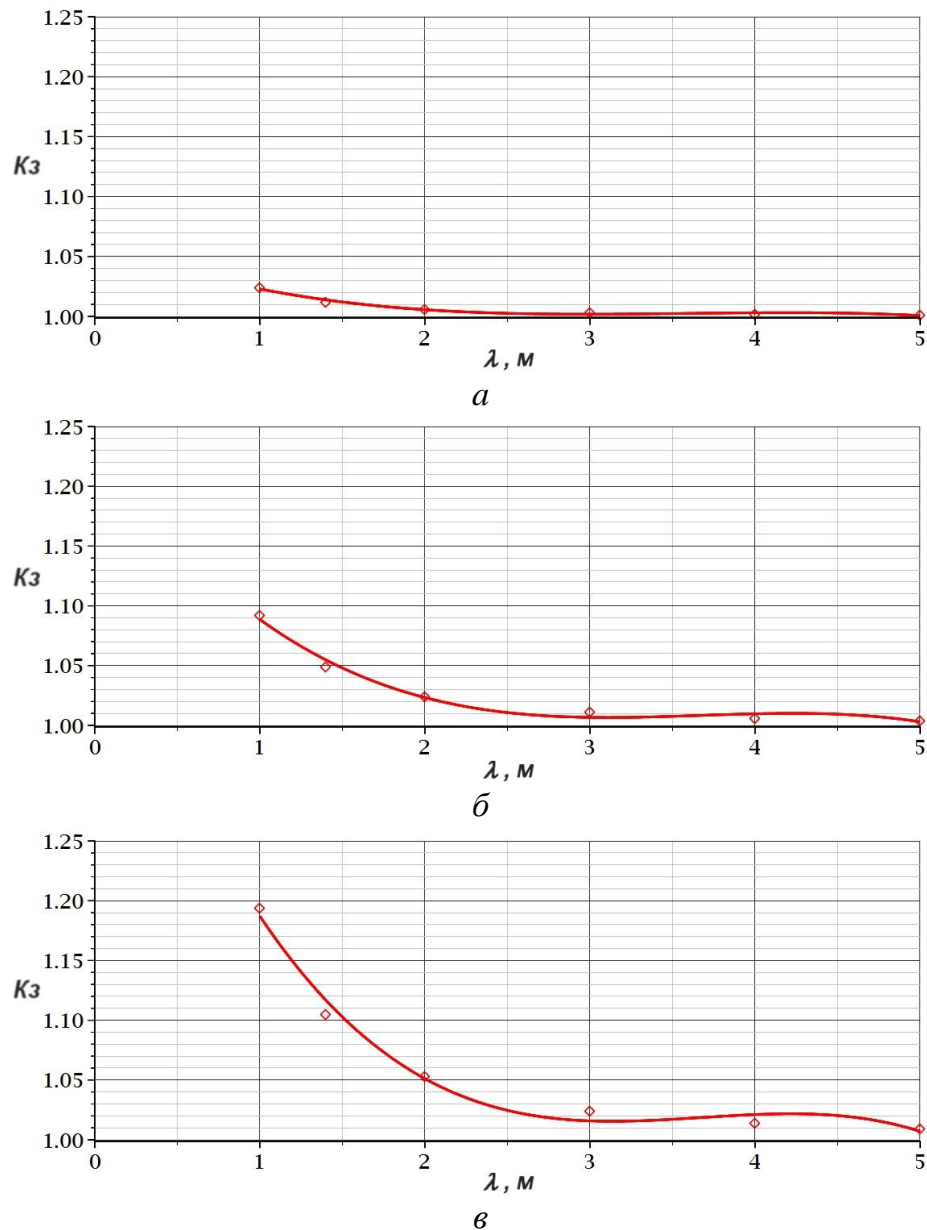


Рис. 5.7. Нова апроксимація залежностей $K_3=f(\lambda, A=const)$:

$a - A=0,05$ м; $b - A=0,1$ м; $v - A=0,15$ м

Функцію (5.20) показано на рис. 5.8, де додатково для забезпечення наочності зображено також вихідні точки табл. 5.3. Отримані відхилення кількісно характеризує табл. 5.4, для комірок якої застосовано вираз

$$\frac{K_{3p} - K_3}{K_3} \cdot 100\%, \quad (5.21)$$

де K_3 – згідно з табл. 5.3; $K_{3p} - K_3$ розрахований за співвідношенням (5.20).

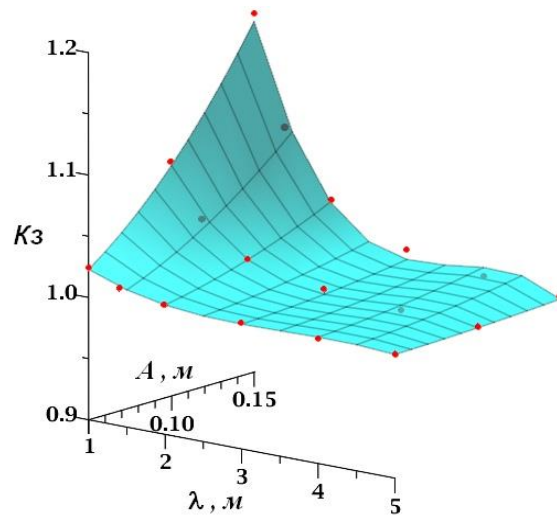


Рис. 5.8. Залежність коефіцієнта K_3 від амплітуди коливань A та довжини хвилі λ

Формула (5.21) надає відомості у процентах про відхилення обчисленої величини коефіцієнта K_3 порівняно з вихідною. Від'ємне значення свідчить про його зменшення, додатне – про збільшення.

Відхилення у % розрахованого K_3 Таблиця 5.4

| | $\lambda, м$ | | | | | |
|--------|--------------|------|-------|-------|------|-------|
| $A, м$ | 1 | 1,4 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 0,05 | -0,10 | 0,20 | 0 | -0,10 | 0,10 | 0 |
| 0,10 | -0,27 | 0,57 | -0,10 | -0,40 | 0,40 | -0,10 |
| 0,15 | -0,59 | 1,09 | -0,19 | -0,78 | 0,69 | -0,20 |

Як бачимо, наведені результати є певним компромісом між розмірами охопленої області проектних розв'язків, одержуваною точністю розрахунків і складністю використаного математичного апарату. Зрозуміло, як уже продемонстровано вище, що зменшення опрацьовуваних проміжків A та λ , дозволяє підвищити першу та/або спростити другий. У загальному випадку процес розроблення технічної продукції має, зазвичай, ітераційний характер. Тобто, спочатку приблизно визначається область існування раціональних рішень, а потім остання уточнюється належним чином.

На завершення цього підрозділу дисертації в аспекті опрацьовуваної тематики зауважимо, що один із напрямків успішної реалізації інтегрованого комплексного підходу полягає у створенні відповідних узагальнених математичних моделей. Це й було продемонстровано на обчисленні збільшення

довжини пройденого шляху під час експлуатації сільськогосподарських машин. Отримана аналітична залежність дозволяє спеціалізованим дисциплінам, наприклад ґрунтообробній механіці, більш ефективно здійснювати свої прикладні наукові дослідження.

Перейдемо далі до опису певних конкретних моментів процесів обробітку ґрунту з використанням полицевих, дискових і чизельних робочих органів.

5.2. Лемішно-полицеві плуги

Через обмежений нормативний обсяг дисертації подання лемішно-полицевих робочих органів у цьому підрозділі має стислий характер. Тобто акцентуються такі поняття, як розрахунок ширини B захвату плуга, співвідношення ширини захвату b його корпусу та глибини a оранки, наближений процес обертання скиби ґрунту, розміщення корпусів у поздовжньому напрямі. Зазначені відомості необхідні для комп'ютерного твердотільного конструювання полицевих знарядь на завершальній стадії їхнього геометричного моделювання, як складових сільськогосподарських агрегатів з енергетичною основою у вигляді трактора.

Ширину захвату B плуга визначимо з рівності діючої тяги трактора силі опору ґрунту

$$P_T \cdot \eta = a \cdot B \cdot k, \quad (5.22)$$

де P_T – тягове зусилля трактора, кН ;

$\eta = 0,8 \dots 0,95$ – коефіцієнт використання тяги P_T ;

a – глибина обробітку, м ;

r – питомий опір ґрунту, кПа .

З виразу (5.22) маємо

$$B = \frac{P_T \cdot \eta}{a \cdot r}. \quad (5.23)$$

Згідно з виданням [80] трактори поділяються на класи 0,2; 0,6; 0,9; 1,4; 2; 3; 4; 5; 6; 8 з відповідним тяговим зусиллям 2; 6; 9; 14; 20; 30; 40; 50; 60; 80 кН . Зазвичай глибина a обробітку становить до 0,35 м . Питомий опір ґрунту – це

відношення зусилля, яке витрачається на підрізання, обертання, розпушування, зсув та тертя скиби ґрунту об знаряддя до площі його проекції на площину, перпендикулярну напрямку руху сільськогосподарського агрегату.

Із співвідношення (5.23) видно, що ширина захвату плуга залежить від наявного тракторного парку та агротехнічного стану ґрунту, які характеризуються великим розмаїттям. Дефініція раціональної величини B для наведених умов виходить за рамки тематики даних дисертаційних досліджень. Під час подальшого конструювання цей параметр приймається за результатами розрахунків відповідних спеціальних дисциплін.

Питання співвідношення ширини захвату b корпусу плуга та глибини a оранки, опису наближеного процесу обертання скиби ґрунту подано в публікації [108], див. рис. 5.9.

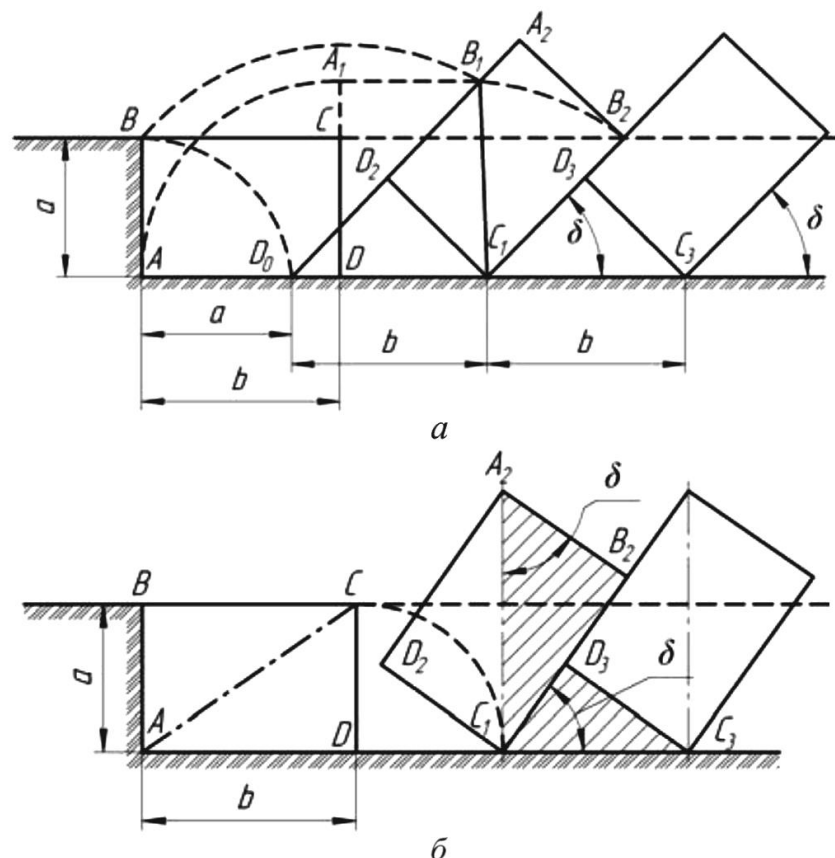


Рис. 5.9. Обертання плугом поперечного перерізу скиби ґрунту [108]

Прямокутний переріз $ABCD$ скиби ґрунту формується у вертикальній площині дисковим ножом (сторона AB), а в горизонтальній – лемешем (сторона AD). Вважається, що при переміщенні зазначена фігура не змінюється. Під час підйому на полицю відбувається її поворот навколо точки D до зайняття

вертикального положення. Далі виконується обертання з центром у точці C_1 доки скиба не ляже стороною C_1B_2 на відвалений раніш шар ґрунту, кут нахилу якого

$$\delta = \arcsin\left(\frac{a}{b}\right) \cdot 180/\pi \text{ } ^\circ. \quad (5.24)$$

Положення нестійкої рівноваги поперечного перерізу ілюструє центральне зображення скиби на рис. 5.9, б. У даному випадку з подібності трикутників $C_1C_3D_3$ та $C_1B_2A_2$ маємо

$$\frac{b}{a} = \frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{b}. \quad (5.25)$$

Застосуванням у залежності (5.25) позначення

$$k = \frac{b}{a} \quad (5.26)$$

і здійсненням нескладних перетворень одержуємо рівняння

$$k^4 - k^2 - 1 = 0, \quad (5.27)$$

додатним розв'язком якого є величина

$$k = 1,272. \quad (5.28)$$

Як видно з рис. 5.9 та формул (5.24) ... (5.28) для забезпечення відвалу шару ґрунту вправо треба мати

$$k > 1,272. \quad (5.29)$$

Отже, вираз (5.29) свідчить, що одна з умов якісної реалізації розглянутого технологічного процесу оранки полягає в дотриманні наведеного співвідношення між шириною b захвата корпусу плуга та глибиною a обробітку ґрунту.

Також важливим геометричним параметром для конструкторського компонування лемішно-полицевих знарядь є розміщення корпусів у поздовжньому напрямі, див. рис. 5.10. У цьому разі вважається, що розосереджена сила опору, яка діє у процесі роботи, має рівнодіючу R , прикладену в центрі довжини L леза лемеша.

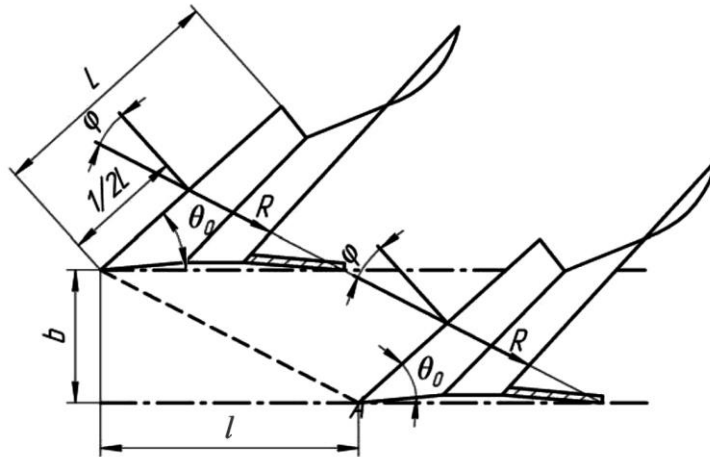


Рис. 5.10. Розміщення корпусів плуга в поздовжньому напрямі [108]

Сила R діє під кутом тертя φ до площини, перпендикулярної лезу. Носок наступного корпусу розташовується на промені, який виходить із носка попереднього паралельно напрямку сили R , на відстані $\sqrt{b^2 + l^2}$, де

$$l = b \cdot \operatorname{tg}(\theta_0 + \varphi), \quad (5.30)$$

θ_0 – кут нахилу леза лемеша до стінки борозни.

Наочне уявлення про характер взаємодії параметрів (5.30) надає графічна модель, представлена на рис. 5.11.

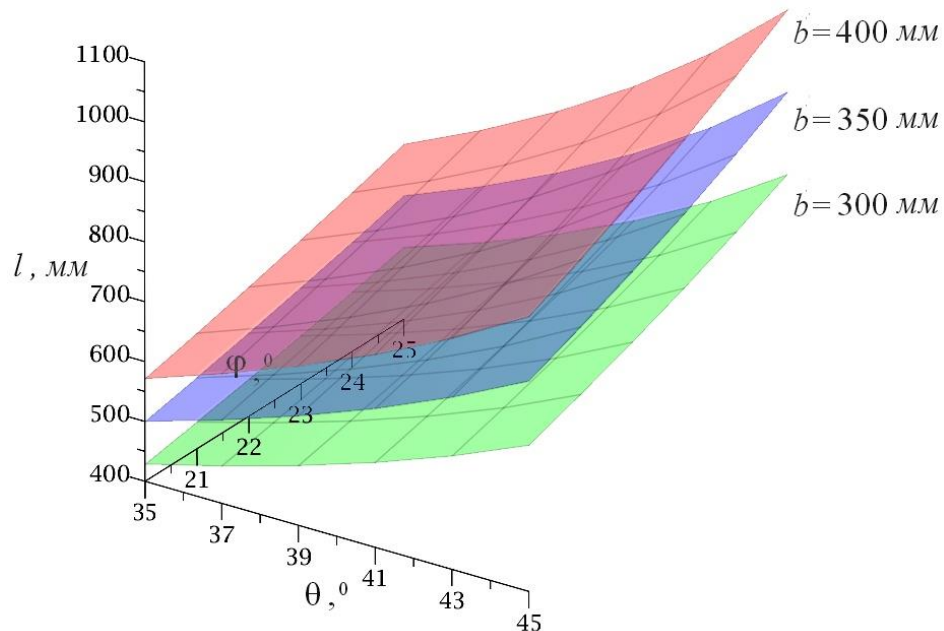


Рис. 5.11. Змінювання l у залежності від b , θ_0 та φ

Подано наступні вихідні множини:

$$b = (300 \text{ мм}, 350 \text{ мм}, 400 \text{ мм}), \quad \theta_0 = [35^0, 45^0], \quad \varphi = [20^0, 25^0]. \quad (5.31)$$

Значенням (5.31) відповідає проміжок

$$l = [428 \text{ мм}, 1099 \text{ мм}]. \quad (5.32)$$

На практиці, зазвичай, із величин (5.32) обирають середні значення

$$l = [700 \text{ мм}, 800 \text{ мм}]. \quad (5.33)$$

На рис. 5.12 показано комп'ютерну твердотільну геометричну модель одного з варіантів компоновання плуга, яка відповідає розглянутим вимогам конструювання (5.22) ... (5.23) та особливостям формоутворення полиць, викладеним у підрозділі 3.2. Це представлення стосується стадії ескізного проектування, коли визначаються принципові рішення для створюваної конструкції, які дають загальне уявлення про призначення, головні параметри та характеристики опрацьовуваного виробу.

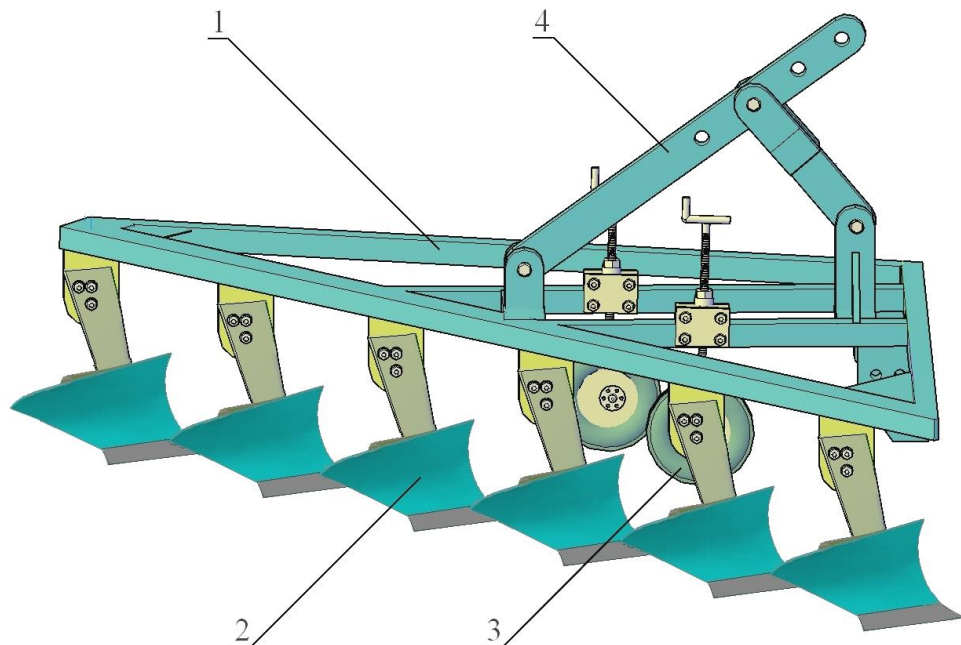


Рис. 5.12. Компоновання конструкції плуга:

1 – рама; 2 – корпус; 3 – опорне колесо з гвинтовим механізмом; 4 – начіпний пристрій

Основними складовими наведеного начіпного шестикорпусного лемішно-полицевого плуга є рама 1, корпуси 2, опорні колеса 3 та начіпний пристрій 4 для з'єднання з трактором тягового класу 5. Глибина оранки та її рівномірність по ширині захвату регулюються в межах до 350 мм вертикальним переміщенням опорних коліс відносно рами за допомогою гвинтового

механізму. 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. Стояки корпусів прикріплені до рами з інтервалом 400 мм поперек напрямку оранки. Кути орієнтації полиць до цього напрямку змінюються гвинтовими механізмами на стояках корпусів. Найважливішим робочим органом плуга є його леміш із полицею, від геометрії яких суттєвим чином залежить якість обробітку ґрунту. Тому зазначеним аспектам було приділено значну увагу у третьому розділі дисертації. Залежно від наявних агротехнічних умов оранки використовуються полиці з різними формами та розмірами робочих поверхонь.

На завершення даної частини дослідження зауважимо, що під час ескізного проектування здійснюються багатоманітні більш точні, ніж попередні, агротехнічні, міцнісні, експлуатаційні, економічні та інші розрахунки. За їх результатами вносяться необхідні корективи в конструкцію опрацьовуваних плугів. Додатки А.4 містять деякі деталізовані зображення наведеної на рис. 5.12 комп'ютерної геометричної моделі.

5.3. Ґрунтообробні дискові знаряддя

Цей підрозділ дисертації, присвячений дисковим знаряддям, включає три пункти, в яких відповідно розглядаються питання побудови математичної моделі профілю борозни, компонування належних конструкцій та дослідження впливу їхніх параметрів на показники обробітку ґрунту.

5.3.1. Математична модель профілю борозни

Під час експлуатації сільськогосподарські диски у ґрунті утворюють борозну з гребенями висотою c , яка залежить від діаметра D дисків та кутів їхнього встановлення (α – атаки, β – відхилення від вертикалі), див. рис. 5.13, 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.

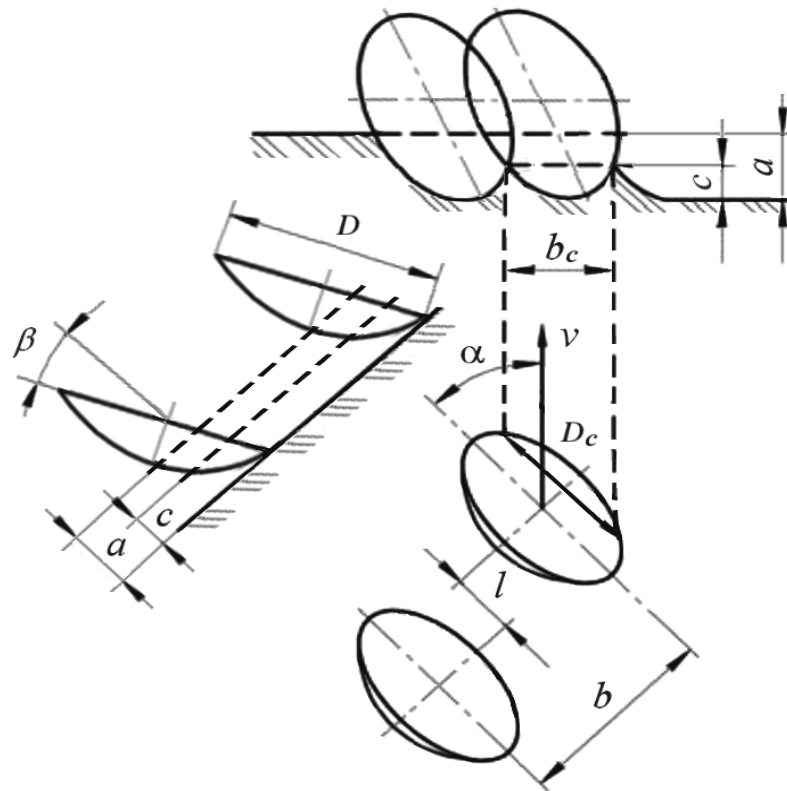


Рис. 5.13. Формування гребінчастої борозни

Згідно з агротехнічними вимогами [108] висота гребенів не повинна перевищувати половини глибини обробітку, тобто

$$c < 0,5 a. \quad (5.34)$$

Як видно з наведеного вище зображення, ширина захвату диска дорівнює відстані між гребенями та обчислюється за формулою

$$b_c = D_c \cdot \sin(\alpha). \quad (5.35)$$

Зазначимо, що збільшення параметра l зменшує висоту гребенів, а зростання дистанції b – навпаки. Для збереження висоти c необхідно забезпечити сталим

$$b_c = b \cdot \cos(\alpha) - l \cdot \sin(\alpha), \quad (5.36)$$

тобто від'ємне значення $l \cdot \sin(\alpha)$ компенсується належним збільшенням величини b .

Відстань між осями обертання дисків

$$L = \sqrt{b^2 + l^2}. \quad (5.37)$$

Співвідношення (5.36) і (5.37) широко вживані під час компонування даних сільськогосподарських знарядь.

Як бачимо з формул (5.34) ... (5.37) доволі важливою для якості процесів обробляння ґрунту дисками є величина c висоти гребенів. Для її дефініції залежно від діаметра D застосовуваного диска, кутів його встановлення α та β визначимо математичну модель профілю борозни.

Використовуватимемо прямокутну декартову систему координат $Oxyz$, див. рис. 5.14, абсциса x якої протилежна швидкості v знаряддя, площина Oxy горизонтальна, апліката z вертикальна.

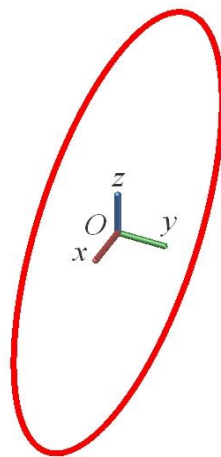


Рис. 5.14. Коло диска діаметром D з центром у початку системи координат $Oxyz$

Рівняння нижньої частини кола, розташованого у площині Oxz із параметром у вигляді кута u , який відраховується від осі x протилежно годинниковій стрілці, має вигляд

$$x = \frac{D}{2} \cos(u), \quad y = 0, \quad z = -\frac{D}{2} \sin(u), \quad u \in [0^0, 180^0]. \quad (5.38)$$

Виконавши поворот дуги (5.38) та системи координат $Oxyz$ на кут α навколо осі z у відповідності з рис. 5.13, отримаємо зображення, див. рис. 5.15, де штриховою лінією показано нове положення даної дуги. Її аналітичне визначення в новій системі координат не змінилося. Здійснимо далі поворот цієї дуги на кут β навколо осі x у поточній системі координат, див. рис. 5.16, із використанням матриць перетворень (3.6).

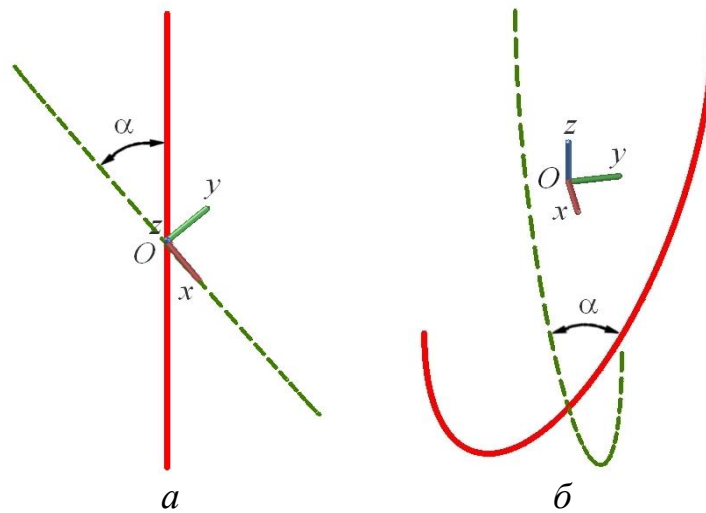


Рис. 5.15. Поворот нижньої дуги диска та системи координат $Oxyz$ на кут α :
 a – вид зверху; b – аксонометричний вид

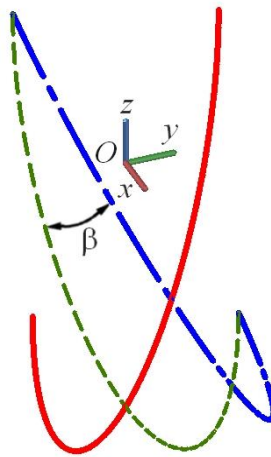


Рис. 5.16. Поворот дуги диска на кут β

Тоді одержимо

$$[x \ y \ z \ 1] \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \beta & \sin \beta & 0 \\ 0 & -\sin \beta & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = [x \ y \cos \beta - z \sin \beta \ y \sin \beta + z \cos \beta \ 1]. \quad (5.39)$$

На основі виразів (5.38) і (5.39) рівняння дуги кола, яка розглядається, в поточній системі координат

$$x = \frac{D}{2} \cos(u), \quad y = \frac{D}{2} \sin(u) \sin \beta, \quad z = -\frac{D}{2} \sin(u) \cos \beta, \quad u \in [0^0, 180^0]. \quad (5.40)$$

Формули перетворення системи координат $Oxyz$ при повороті на кут α навколо осі z у систему $Ox'y'z'$ (див. належну матрицю (3.6) з від'ємним кутом)

$$x' = x \cos \alpha + y \sin \alpha, \quad y' = -x \sin \alpha + y \cos \alpha, \quad z' = z. \quad (5.41)$$

На засадах співвідношень (5.40) і (5.41) із використанням значення $-\alpha$ отримуємо рівняння опрацьовуваної дуги кола в початковій системі координат $Oxyz$, показаній на рис. 5.14,

$$\begin{aligned}x &= \frac{D}{2}(\cos(u)\cos\alpha - \sin(u)\sin\beta\sin\alpha), \\y &= \frac{D}{2}(\cos(u)\sin\alpha + \sin(u)\sin\beta\cos\alpha), \\z &= -\frac{D}{2}\sin(u)\cos\beta, \quad u \in [0^0, 180^0].\end{aligned}\quad (5.42)$$

Для забезпечення відповідності рис. 5.13 розташуємо площину Oxy на рівні дна борозни. Тоді координати (5.42) запишуться як

$$\begin{aligned}x &= \frac{D}{2}(\cos(u)\cos\alpha - \sin(u)\sin\beta\sin\alpha), \\y &= \frac{D}{2}(\cos(u)\sin\alpha + \sin(u)\sin\beta\cos\alpha), \\z &= -\frac{D}{2}\sin(u)\cos\beta + \frac{D}{2}\cos\beta = \frac{D}{2}\cos\beta(1 - \sin(u)), \quad u \in [0^0, 180^0].\end{aligned}\quad (5.43)$$

У праці [108] зазначається, що диск зберігає роботоздатність при зануренні у ґрунт не більш ніж на $2/3$ радіуса R , див. рис. 5.17, тобто максимальна глибина борозни дорівнює

$$a = \frac{2}{3} \cdot \frac{D}{2} \cdot \cos\beta = \frac{D}{3} \cdot \cos\beta.\quad (5.44)$$

З поданого зображення

$$R \cdot \sin u_{\min} = \frac{R}{3}.\quad (5.45)$$

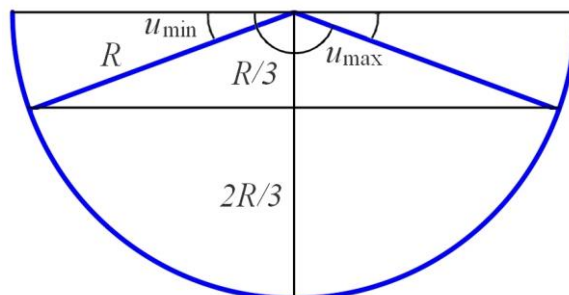


Рис. 5.17. Обмеження на змінювання параметра u

Далі

$$u_{\min} = \arcsin\left(\frac{1}{3}\right) \cdot 180/\pi^{\circ} \approx 19,5^{\circ}. \quad (5.46)$$

На підставі залежностей (5.44) ... (5.46) уточнюємо координати (5.43) профілю борозни

$$y = \frac{D}{2} (\cos(u) \sin \alpha + \sin(u) \sin \beta \cos \alpha),$$

$$z = \frac{D}{2} \cos \beta (1 - \sin(u)), \quad u \in [u_{\min}, 180^{\circ} - u_{\min}], \quad u_{\min} = 19,5^{\circ}. \quad (5.47)$$

На рис. 5.18 і рис. 5.19 подано деякі приклади профілів (5.47) для диска діаметром $D=700$ мм. У першому випадку це стосується різних кутів атаки α для вертикального відхилення $\beta=0^{\circ}$. У другому – варіюються величини $\alpha=(30^{\circ}, 40^{\circ}, 50^{\circ})$, $\beta=(0^{\circ}, 15^{\circ}, 30^{\circ})$.

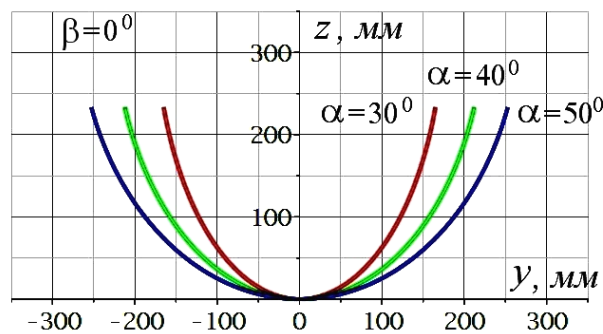


Рис. 5.18. Профілі борозни при $\alpha=(30^{\circ}, 40^{\circ}, 50^{\circ})$, $\beta=0^{\circ}$

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

$$u_{\min} = \arcsin\left(1 - \frac{2c}{D \cos \beta}\right) \cdot 180/\pi^{\circ}. \quad (5.48)$$

На основі виразу (5.48) для даних рис. 5.18 та $c=50$ мм маємо

$$u_{\min} = \arcsin\left(1 - \frac{2 \cdot 50 \text{ мм}}{700 \text{ мм} \cdot \cos 0^{\circ}}\right) \cdot 180/\pi^{\circ} \approx 59^{\circ}. \quad (5.49)$$

З використанням формул (5.47) і значення (5.49) будемо належні профілі борозни, див. рис. 5.20.

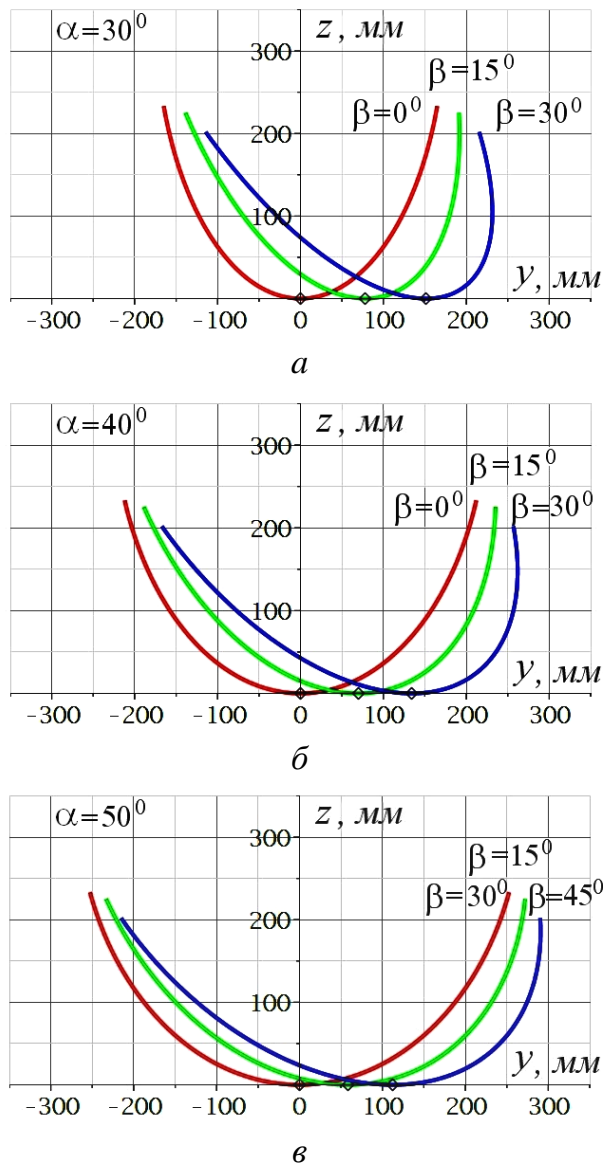


Рис. 5.19. Профілі борозни:

$a - \alpha=30^{\circ}, \beta=(0^{\circ}; 15^{\circ}, 30^{\circ});$ $б - \alpha=40^{\circ}, \beta=(0^{\circ}; 15^{\circ}, 30^{\circ});$

$в - \alpha=50^{\circ}, \beta=(0^{\circ}; 15^{\circ}, 30^{\circ})$

Відстань між вершинами гребенів дорівнює

$$b_c = y_{\max} - y_{\min}, \quad (5.50)$$

де

$$y_{\max}(u_{\min}) = \frac{D}{2}(\cos(u_{\min}) \sin \alpha + \sin(u_{\min}) \sin \beta \cos \alpha),$$

$$y_{\min}(u_{\max}) = \frac{D}{2}(\cos(u_{\max}) \sin \alpha + \sin(u_{\max}) \sin \beta \cos \alpha),$$

$$u_{\max} = 180^{\circ} - u_{\min}, \quad u_{\min} = 59^{\circ}.$$

Обчислити величину (5.50) можна також іншим способом.

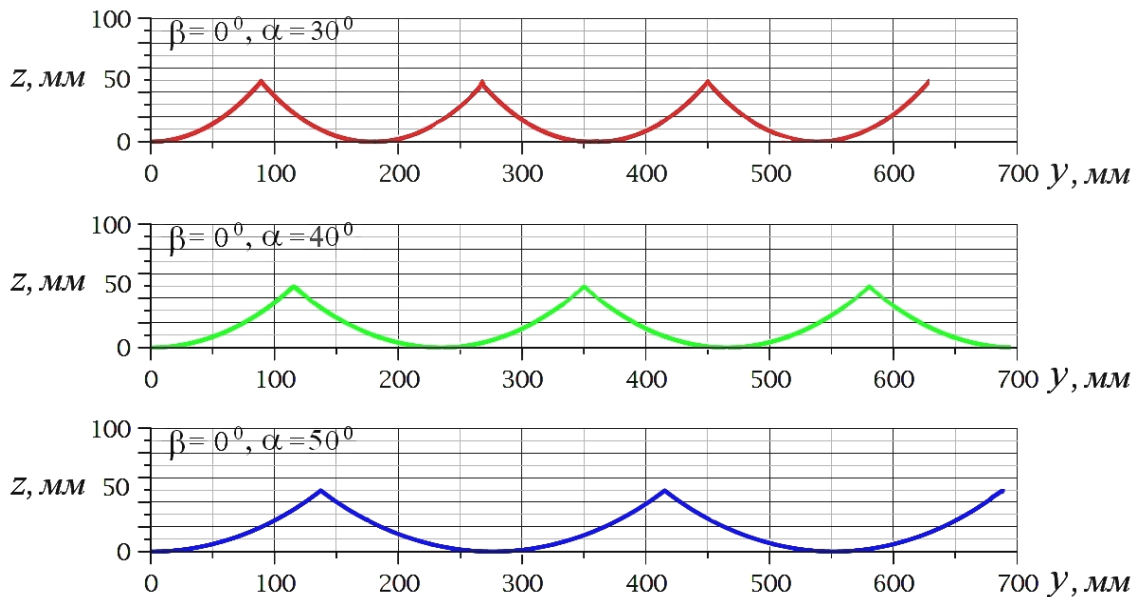


Рис. 5.20. Профілі борозни диска діаметром $D=700$ мм при глибині обробки $c=50$ мм

З рис. 5.21 для диска діаметром D та висотою c гребенів маємо

$$\left(\frac{D_c}{2}\right)^2 = R^2 - (R - c)^2, \quad R = D/2,$$

звідки значення хорди, яка відповідає c ,

$$D_c = 2\sqrt{c(D - c)}. \quad (5.51)$$

У випадку, що аналізується,

$$D_c = 2\sqrt{c(D - c)} = 2\sqrt{50 \text{ мм} \cdot (700 \text{ мм} - 50 \text{ мм})} \approx 360,56 \text{ мм}. \quad (5.52)$$

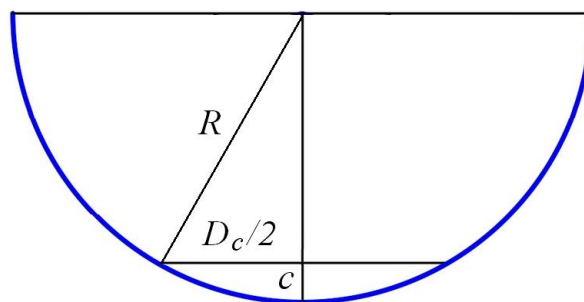


Рис. 5.21. До визначення хорди D_c

На підставі виразів (5.35) і (5.51)

$$b_c = D_c \cdot \sin \alpha = 2\sqrt{c(D - c)} \cdot \sin \alpha. \quad (5.53)$$

Згідно з даними рис. 5.20 застосуванням формул (5.50), (5.52), (5.53) отримуємо для:

$$- \alpha = 30^0$$

$$b_c = y_{\max} - y_{\min} = 90,13 \text{ мм} - (-90,13 \text{ мм}) \approx 180,3 \text{ мм};$$

$$b_c = D_c \cdot \sin \alpha = 360,56 \text{ мм} \cdot \sin 30^0 \approx 180,3 \text{ мм};$$

$$- \alpha = 40^0$$

$$b_c = y_{\max} - y_{\min} = 115,9 \text{ мм} - (-115,9 \text{ мм}) = 231,8 \text{ мм};$$

$$b_c = D_c \cdot \sin \alpha = 360,56 \text{ мм} \cdot \sin 40^0 \approx 231,8 \text{ мм};$$

$$- \alpha = 50^0$$

$$b_c = y_{\max} - y_{\min} = 138,1 \text{ мм} - (-138,1 \text{ мм}) = 276,2 \text{ мм};$$

$$b_c = D_c \cdot \sin \alpha = 360,56 \text{ мм} \cdot \sin 50^0 \approx 276,2 \text{ мм}.$$

Наведені вище контрольні розрахунки підтверджують правильність запропонованої математичної моделі (5.47). На рис. 5.22 показано профілі борозни, побудовані за розглянутою вище методикою з використанням значень $D=700 \text{ мм}$, $c=50 \text{ мм}$, $\beta=(15^0, 30^0)$, $\alpha=(30^0, 40^0, 50^0)$. За допомогою залежності висоти c_β гребня, яка відповідає куту β та дещо менша висоти c при нульовій величині останнього,

$$\begin{aligned} c_\beta &= z(u_{\min}) = \frac{D}{2} \cos \beta (1 - \sin(u_{\min})) = \\ &= z(u_{\max}) = \frac{D}{2} \cos \beta (1 - \sin(u_{\max})) = c \cdot \cos \beta \end{aligned} \quad (5.54)$$

та формули (5.50) маємо для:

$$- \beta = 15^0$$

$$c_\beta = c \cdot \cos \beta = 50 \text{ мм} \cdot \cos(15^0) \approx 48,3 \text{ мм};$$

$$\alpha = 30^0$$

$$b_c = y_{\max} - y_{\min} = 157,38 \text{ мм} - (-22,89 \text{ мм}) \approx 180,3 \text{ мм};$$

$$\alpha = 40^0$$

$$b_c = y_{\max} - y_{\min} = 175,5 \text{ мм} - (-56,4 \text{ мм}) \approx 231,8 \text{ мм};$$

$$\alpha = 50^0$$

$$b_c = y_{\max} - y_{\min} = 188 \text{ мм} - (-88,2 \text{ мм}) = 276,2 \text{ мм};$$

$$-\beta=30^{\circ}$$

$$c_{\beta} = c \cdot \cos\beta = 50 \text{ мм} \cdot \cos(30^{\circ}) \approx 43,3 \text{ мм};$$

$$\alpha=30^{\circ}$$

$$b_c = y_{\max} - y_{\min} = 220,04 \text{ мм} - (39,78 \text{ мм}) \approx 180,3 \text{ мм};$$

$$\alpha=40^{\circ}$$

$$b_c = y_{\max} - y_{\min} = 230,8 \text{ мм} - (-0,96 \text{ мм}) \approx 231,8 \text{ мм};$$

$$\alpha=50^{\circ}$$

$$b_c = y_{\max} - y_{\min} = 234,51 \text{ мм} - (-41,67 \text{ мм}) = 276,2 \text{ мм}.$$

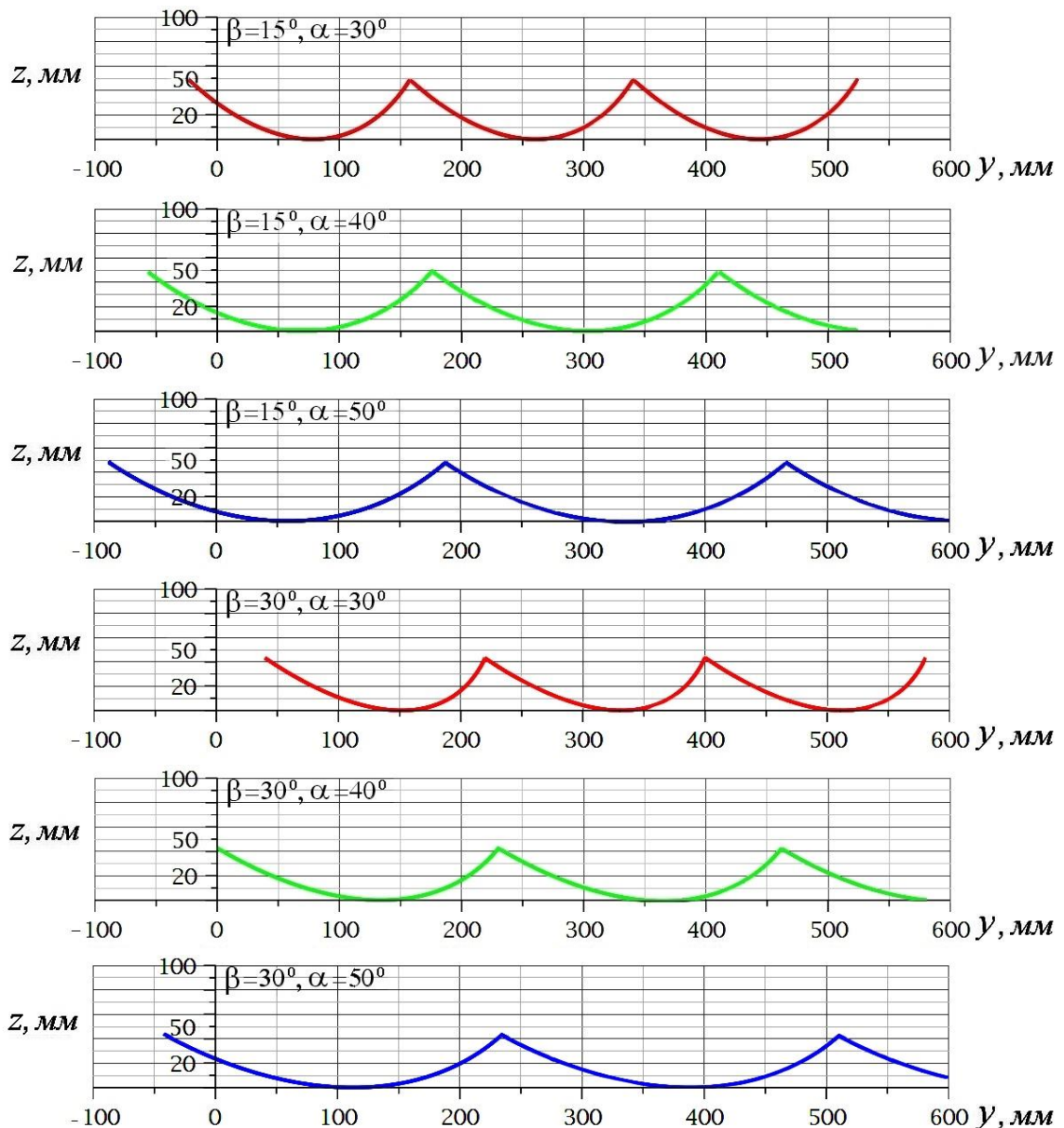


Рис. 5.22. Профілі борозни диска діаметром $D=700$ мм

Зазначені відомості разом із належними величинами b_c , обчисленими вище для кута $\beta=0^{\circ}$ через $\sin\alpha$, також свідчать про коректність запропонованих

виразів (5.47), (5.48), (5.50), (5.54) визначення профілю борозни дискових робочих органів. У розглянутій моделі величини D_c і u_{\min} становлять інваріанти по відношенню до застосування кутів α та β .

Аналіз зображень рис. 5.20 і рис. 5.22 показує, що при нульовому β профіль борозни має вертикальну вісь симетрії. Інакше останній стає пологішим у напрямі нахилу диска та дещо крутішим у протилежному. Положення точок із нульовою висотою, тобто основ похилих осей, ілюструють належні позначення рис. 5.19. Підвищення кута атаки α збільшує ширину захвату диска. Максимальна висота гребенів зменшується зі зростанням β .

Для порівняння викладених вище розрахунків для диска діаметром $D=700$ мм у додатках А.4 наведено відповідну інформацію для диска діаметром $D=500$ мм. У даному випадку вже описані властивості зберігаються.

5.3.2. Компонування конструкції

Після виконання різноманітних розрахунків, пов'язаних із моделюванням процесів обробітку ґрунту, зокрема, агротехнічних, енергетично-силових, на міцність, експлуатаційних, економічних тощо на стадії ескізного проектування здійснюється варіантне комплектування конструкції дискових сільсько-господарських знарядь. Головна мета полягає у формуванні комплексних раціональних їхніх різновидів, дефініції відповідних необхідних принципових рішень. Зауважимо, що викладені в цьому розділі дисертації методики обчислення уточненої траєкторії руху агрегатів та визначення профілю борозни тісним чином пов'язані з багатьма перерахованими вище розрахунками.

Існує велике розмаїття дискових ґрунтообробних знарядь, наприклад, див. кортеж (2.28), луцильники, борони, плуги та ін. Розглянути докладно комплектування конструкції їх усіх у даній науковій праці практично неможливо. Тому далі акцентується увага тільки на найбільш важливих належних моментах.

До недавнього часу 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 зазначеної схеми компоновки полягає в тому, що через відносно велику свою протяжність батарея погано копіює наявний рельєф. Нині широко застосовуються диски з індивідуальними підпруженими стояками. Це реалізує у процесі експлуатації плавне подолання нерівностей поля. У дискових плугів робочі органи теж розміщені на індивідуальних стояках із забезпеченням, зазвичай, покрокового регулювання кутів атаки, а інколи й відхилення від вертикалі. Акцентовані засоби сприяють адаптації сільськогосподарських знарядь до умов їхнього використання.

На рис. 5.23 представлено комп'ютерну твердотільну геометричну модель компоновки на стадії ескізного проектування конструкції дискатора, в якого робочі органи встановлені на індивідуальних стояках із кутом атаки α та відхиленням β від вертикалі.

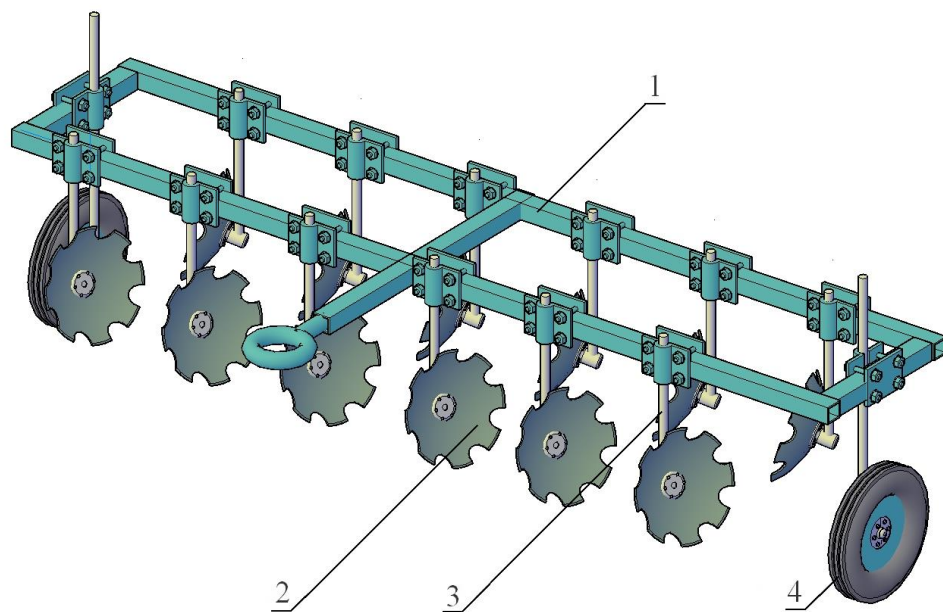


Рис. 5.23. Компоновка конструкції дискатора:

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

Диски розташовані у два зміщені ряди з обертанням шару ґрунту у протилежних напрямках. До складу цього сільськогосподарського знаряддя, як правило, входять також котки, які на наведеному рисунку не показані. Останнє обумовлено тим, що вказані компоненти в дисертації не розглядалися і становлять наступний етап опрацювання компоновки даної конструкції.

Кожен диск забезпечується пристроєм, що уможливорює керування кутами α та β , тобто змінюванням ширини захвату диска і глибиною обробітку. Опорні колеса вертикальними переміщеннями відносно рами регулюють глибину ходу. Розглянуті засоби сприяють мінімізації висоти гребенів, утворених сусідніми дисками, тобто покращують оброблюваність шару ґрунту.

Важливими з точки зору компоновання є геометричні параметри l та b , див. рис. 5.13 та формулу (5.36). Як уже акцентувалось, збільшення довжини l зменшує висоту гребенів, а відстані b – навпаки. З іншого боку, остання величина повинна забезпечувати необхідне проходження без заторів ґрунтового потоку, максимальне значення якого визначається профілем борозни. У дослідженні [108] рекомендується дистанцію b приймати такою, що дорівнює максимальній ширині захвату диска при варіюванні кутових параметрів його встановлення. Таким чином, перспективним напрямком компоновання дискаторів є гнучке змінювання поперечних і поздовжніх відстаней між їхніми стояками.

5.3.3. Залежність показників обробітку ґрунту від конструкційних параметрів

На сучасному етапі розвитку ґрунтообробної механіки істотним моментом при моделюванні сільськогосподарських технологічних процесів є належне опрацювання наявної теоретичної та експериментальної інформації. Покажемо це на прикладі застосування запропонованого способу зменшення області проєктних розв'язків.

У монографії [87] наводяться відомості стосовно впливу конструкційних параметрів на агротехнічні показники роботи дисків, див. рис. 5.24. Видно, що зі зменшенням діаметра D диска зростає середня висота c гребенів, а зі збільшенням кута атаки γ – спадає. Його велика величина покращує підрізання N рослинних залишків, однак може спричиняти забивання дисків ґрунтом. Відношення висоти гребенів c до глибини обробітку a зі зростанням кута атаки зменшується.

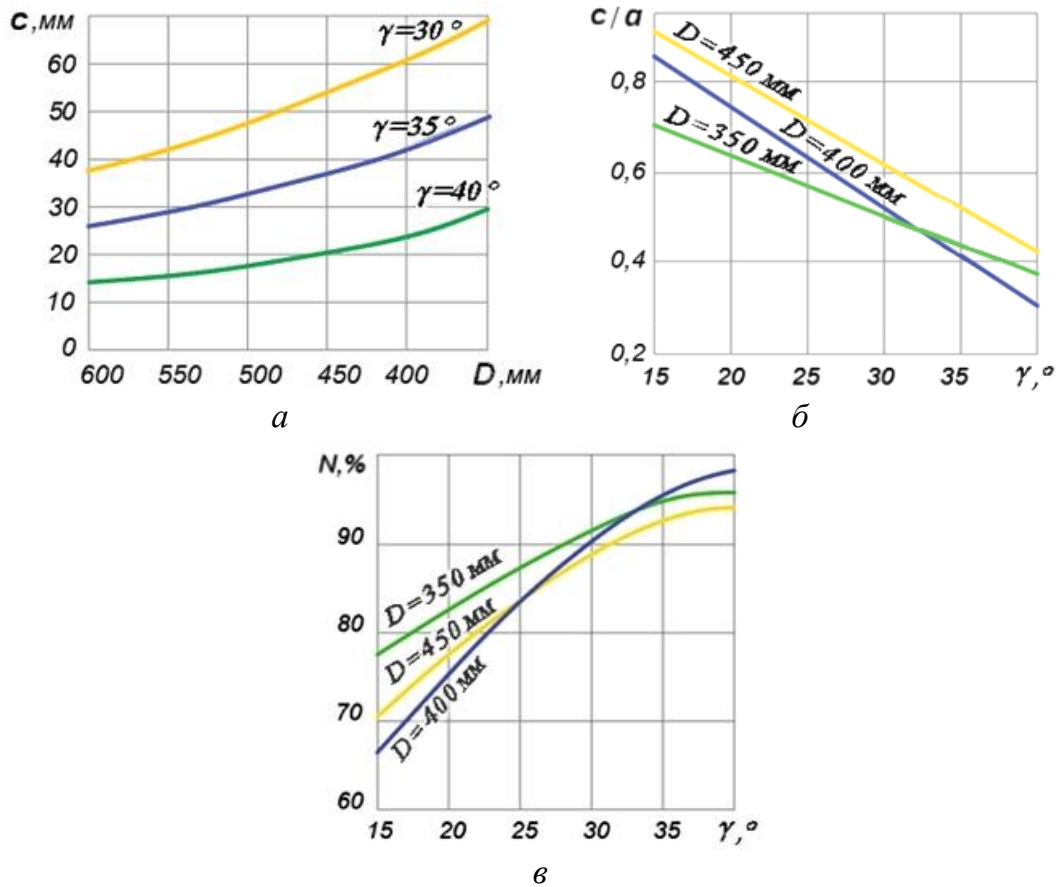


Рис. 5.24. Залежності агротехнічних показників:

- a* – висоти *c* гребенів від діаметра *D* диска при різних кутах атаки γ ;
- б* – відношення *c* до глибини *a* обробітку від γ для різних *D*;
- в* – ступеня *N* підрізання рослинних залишків від γ для різних *D*

Відповідно до викладеного в пункті 2.2.2 дисертації способу зменшення області проектних розв'язків, на підставі формули (2.36) у конкретному випадку, який розглядається, маємо наступну вихідну область допустимих розв'язків

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

$$\gamma \in [15^\circ; 40^\circ], \quad N \in [60\%; 100\%]. \quad (5.55)$$

З виразів (5.55) бачимо, що це п'ятивимірний інтегрований комплексний простір параметрів

$$(D, c, a, \gamma, N), \quad (5.56)$$

де в кортежі (5.56) перші чотири параметри геометричні, а останній – агротехнічний.

На основі загального підходу щодо представлення багатовимірною об'єкта певними простішими фігурами апроксимуємо наявні графіки рис. 5.24 відповідними аналітичними співвідношеннями.

Тоді маємо для:

– рис. 5.24, а

$$c(\gamma = 30^0, D \text{ мм}) = 202,51 \cdot 10^{-6} D^2 - 0,31917 \cdot D + 156,68; \quad (5.58)$$

$$c(\gamma = 35^0, D \text{ мм}) = 145,23 \cdot 10^{-6} D^2 - 0,23008 \cdot D + 111,76; \quad (5.59)$$

$$c(\gamma = 40^0, D \text{ мм}) = 185,93 \cdot 10^{-6} D^2 - 0,23864 \cdot D + 90,39; \quad (5.60)$$

– рис. 5.24, б

$$\frac{c}{a} (D = 350 \text{ мм}, \gamma^0) = -0,0128 \cdot \gamma + 0,892; \quad (5.61)$$

$$\frac{c}{a} (D = 400 \text{ мм}, \gamma^0) = -0,022 \cdot \gamma + 1,18; \quad (5.62)$$

$$\frac{c}{a} (D = 450 \text{ мм}, \gamma^0) = -0,02 \cdot \gamma + 1,22; \quad (5.63)$$

– рис. 5.24, в

$$N(D = 350 \text{ мм}, \gamma^0) = -0,01764 \cdot \gamma^2 + 1,70779 \cdot \gamma + 56,23; \quad (5.64)$$

$$N(D = 400 \text{ мм}, \gamma^0) = -0,03668 \cdot \gamma^2 + 3,31307 \cdot \gamma + 24,45; \quad (5.65)$$

$$N(D = 450 \text{ мм}, \gamma^0) = -0,02656 \cdot \gamma^2 + 2,39008 \cdot \gamma + 41,06. \quad (5.66)$$

Залежності (5.58) ... (5.66) є прикладами конкретного застосування виразів (2.37). Далі з міркувань проектування, конструювання, експлуатації тощо вводяться додаткові обмеження на початкову область допустимих розв'язків (5.55), приміром,

$$D \in (350 \text{ мм}, 400 \text{ мм}, 450 \text{ мм}),$$

$$a \in [50 \text{ мм} \dots 100 \text{ мм}], \quad c \in [0 \text{ мм} \dots 50 \text{ мм}],$$

$$\frac{c}{a} \in [0 \dots 0,5], \quad \gamma \in [15^0; 40^0], \quad N \in [90\%; 100\%]. \quad (5.67)$$

Тобто з неперервного вихідного проміжку значень діаметра D виокремлено три необхідні його дискретні величини, визначено потрібну глибину обробітку a

та висоту гребенів c , їхнє співвідношення, варіювання кута атаки γ залишено без змін, обмежено належним чином ступень N підрізання рослинних залишків.

Проаналізуємо зменшення області проєктних розв'язків унаслідок використання умов (5.67). З рис. 5.24, *в* та формул (5.64) ... (5.66) маємо

$$N(D = 350 \text{ мм}, \gamma^0) = -0,01764 \cdot \gamma^2 + 1,70779 \cdot \gamma + 56,23 = 90\%; \quad (5.68)$$

$$N(D = 400 \text{ мм}, \gamma^0) = -0,03668 \cdot \gamma^2 + 3,31307 \cdot \gamma + 24,45 = 90\%; \quad (5.69)$$

$$N(D = 450 \text{ мм}, \gamma^0) = -0,02656 \cdot \gamma^2 + 2,39008 \cdot \gamma + 41,06 = 90\%. \quad (5.70)$$

На основі рівнянь (5.68) ... (5.70) отримуємо зменшені діапазони кутів атаки для дисків:

$$D=350 \text{ мм}, \gamma \in [27,7^0; 40^0]; \quad (5.71)$$

$$D=400 \text{ мм}, \gamma \in [29,1^0; 40^0]; \quad (5.72)$$

$$D=450 \text{ мм}, \gamma \in [31,5^0; 40^0]. \quad (5.73)$$

Застосувавши проміжки (5.71) ... (5.73) та залежності (5.61) ... (5.63), див. рис. 5.24, *б*, уточнюємо для дисків відношення висоти c гребенів до глибини a обробітку ґрунту:

$$D = 350 \text{ мм}, \frac{c}{a} \in [0,38; 0,54]; \quad (5.74)$$

$$D = 400 \text{ мм}, \frac{c}{a} \in [0,3; 0,54]; \quad (5.75)$$

$$D = 450 \text{ мм}, \frac{c}{a} \in [0,42; 0,59]. \quad (5.76)$$

З виразів (5.74 ... 5.76), взявши до уваги обмеження (5.67), одержуємо

$$D = 350 \text{ мм}, \frac{c}{a} \in [0,38; 0,5]; \quad (5.77)$$

$$D = 400 \text{ мм}, \frac{c}{a} \in [0,3; 0,5]; \quad (5.78)$$

$$D = 450 \text{ мм}, \frac{c}{a} \in [0,42; 0,5]. \quad (5.79)$$

Маючи розрахунково-експериментальні дані, див. рис. 5.24, *а*, для висоти гребенів залежно від дискретних кутів атаки $\gamma \in (30^0; 35^0; 40^0)$, коригуємо проміжки (5.71) ... (5.73)

$$D=350 \text{ мм}, \gamma \in (30^0; 35^0; 40^0); \quad (5.80)$$

$$D=400 \text{ мм}, \gamma \in (30^0; 35^0; 40^0); \quad (5.81)$$

$$D=450 \text{ мм}, \gamma \in (35^0; 40^0). \quad (5.82)$$

Для декартового добутку $D \times \gamma$ елементів множин (5.80) ... (5.82) з використанням співвідношень (5.58) ... (5.60), див. рис. 5.24, а, отримуємо кортежі формату (D, γ, c)

$$\begin{aligned} &(350 \text{ мм}; 30^0; 69,8 \text{ мм}), (350 \text{ мм}; 35^0; 49 \text{ мм}), (350 \text{ мм}; 40^0; 29,6 \text{ мм}), \\ &(400 \text{ мм}; 30^0; 61,4 \text{ мм}), (400 \text{ мм}; 35^0; 43 \text{ мм}), (400 \text{ мм}; 40^0; 24,7 \text{ мм}), \\ &(450 \text{ мм}; 35^0; 37,6 \text{ мм}), (450 \text{ мм}; 40^0; 20,7 \text{ мм}). \end{aligned} \quad (5.83)$$

З урахуванням обмежень (5.67) із множин (5.83) залишаються наступні

$$\begin{aligned} &(350 \text{ мм}; 35^0; 49 \text{ мм}), (350 \text{ мм}; 40^0; 29,6 \text{ мм}), \\ &(400 \text{ мм}; 35^0; 43 \text{ мм}), (400 \text{ мм}; 40^0; 24,7 \text{ мм}), \\ &(450 \text{ мм}; 35^0; 37,6 \text{ мм}), (450 \text{ мм}; 40^0; 20,7 \text{ мм}). \end{aligned} \quad (5.84)$$

Висоти гребенів у виразах (5.84) та формули (5.77) ... (5.79) дозволяють обчислити відповідні проміжки величин глибини a обробітку ґрунту з взяттям до уваги також вимог (5.67). Остаточна зменшена початкова область проєктних розв'язків (5.55) за розглянутих обмежень отримує вигляд у форматі (D, γ, c, a, N)

$$\begin{aligned} &(350 \text{ мм}; 35^0; 49 \text{ мм}; [98 \text{ мм}, 100 \text{ мм}]; [90\%, 100\%]), \\ &(350 \text{ мм}; 40^0; 29,6 \text{ мм}; [59 \text{ мм}, 78 \text{ мм}]; [90\%, 100\%]), \\ &(400 \text{ мм}; 35^0; 43 \text{ мм}; [86 \text{ мм}, 100 \text{ мм}]; [90\%, 100\%]), \\ &(400 \text{ мм}; 40^0; 24,7 \text{ мм}; [49 \text{ мм}, 82 \text{ мм}]; [90\%, 100\%]), \\ &(450 \text{ мм}; 35^0; 37,6 \text{ мм}; [75 \text{ мм}, 90 \text{ мм}]; [90\%, 100\%]), \\ &(450 \text{ мм}; 40^0; 20,7 \text{ мм}; [41 \text{ мм}, 49 \text{ мм}]; [90\%, 100\%]). \end{aligned} \quad (5.85)$$

Як видно, множини (5.85) задовольняють умовам (5.67). Отже, на прикладі проведеного аналізу впливу деяких конструкційних параметрів ґрунтообробних дисків на їхні експлуатаційні показники нами продемонстровано

практичне застосування запропонованого способу зменшення області проєктних розв'язків, який реалізовано графоаналітичними прийомами. При цьому використано такі переваги геометричних моделей, як їхня наочність. Отриманий результат дозволяє спеціалізованим дисциплінам здійснювати подальше опрацювання з метою оптимізації описаних сільськогосподарських процесів.

5.4. Культиватори

Основою для проєктування культиватора є глибина обробітку ґрунту, його тип (легкий, середній, важкий) та клас трактора, з яким агрегується дане знаряддя. Ширину захвату культиватора визначаємо за методикою, викладеною для плугів, див. підрозділ 5.2, формули (5.22), (5.23). Але, для уніфікації обчислень стосовно врахування різних видів обробітку та застосовуваних робочих органів, використовуватимемо питомий опір ґрунту в одиницях кН/м . Належна довідкова інформація міститься у виданні [71]. Зокрема, тут є відомості щодо полільних, розпушувальних і плоскорізальних лап та відповідних глибин обробітку.

Отже, ширина захвату

$$B = \frac{P_T \cdot \eta}{k}, \quad (5.86)$$

де P_T – тягове зусилля трактора на певній швидкості руху, кН ;

$\eta=0,8 \dots 0,95$ – коефіцієнт використання тяги P_T ;

k – питомий опір ґрунту, кН/м .

Узяття до уваги в залежності (5.86) швидкості трактора підвищує точність проєктних розрахунків. Потрібні дані наявні в публікації [71]. Основними робочими органами культиваторів є полільні та розпушувальні лапи. Перші використовуються для глибини обробітку до 12 см, інакше – другі.

До рами культиватора полільні лапи кріпляться у два ряди. Їхнє розташування повинно реалізовувати якісне підрізування бур'янів та запобігати забиванню простору між лапами ґрунтом. У праці [71] зазначається, що за досвідом практики оптимальна відстань між рядами вздовж руху культиватора

дорівнює 500 ... 600 мм. Головною вимогою для дефініції поперечної дистанції між лапами є забезпечення належного підрізування бур'янів, для чого лапи розміщують із перекриттям

$$c = L \cdot \operatorname{tg} \delta, \quad (5.87)$$

де $L=0,5 \dots 0,6$ м – відстань між рядами лап уздовж переміщення культиватора;
 $\delta=7^\circ \dots 9^\circ$ – кут можливого випадкового відхилення від прямолінійного руху.

Кількість поліельних лап однакової ширини захвату

$$n = \frac{B}{b - c}, \quad (5.88)$$

де B – ширина захвату культиватора, м;

b – ширина захвату лапи, м;

c – перекриття лап, м.

Обчислена величина (5.88) округлюється до найближчого більшого натурального числа.

На рис. 5.25 показано комп'ютерну твердотільну геометричну модель одного з варіантів конструювання культиватора, яка відповідає вимогам конструювання (5.86) ... (5.88) та особливостям формоутворення лап, проаналізованим у підрозділі 3.3 дисертації. 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.

Основними складовими наведеного культиватора для суцільного обробітку ґрунту є зварна рама 1 із труб прямокутного перерізу, поліельні універсальні стрілочасті лапи 2, стояки 3, опорні колеса 4. Лапи встановлені у два ряди з належним поперечним перекриттям. При функціонуванні знаряддя колеса копіюють поверхню поля та використовуються під час переїздів. Рівномірність визначеної глибини обробітку ґрунту по ширині захвату культиватора регулюється вертикальними переміщеннями лап у кронштейнах їхнього кріплення до рами. Залежно від типу та агрофізичного стану ґрунту можливе застосування різних видів стрілочастих лап, формоутворення яких

подано в підрозділі 3.3 дисертації. Належні приклади наведено в додатках А.4, див. рис. А.22, рис. А.23.

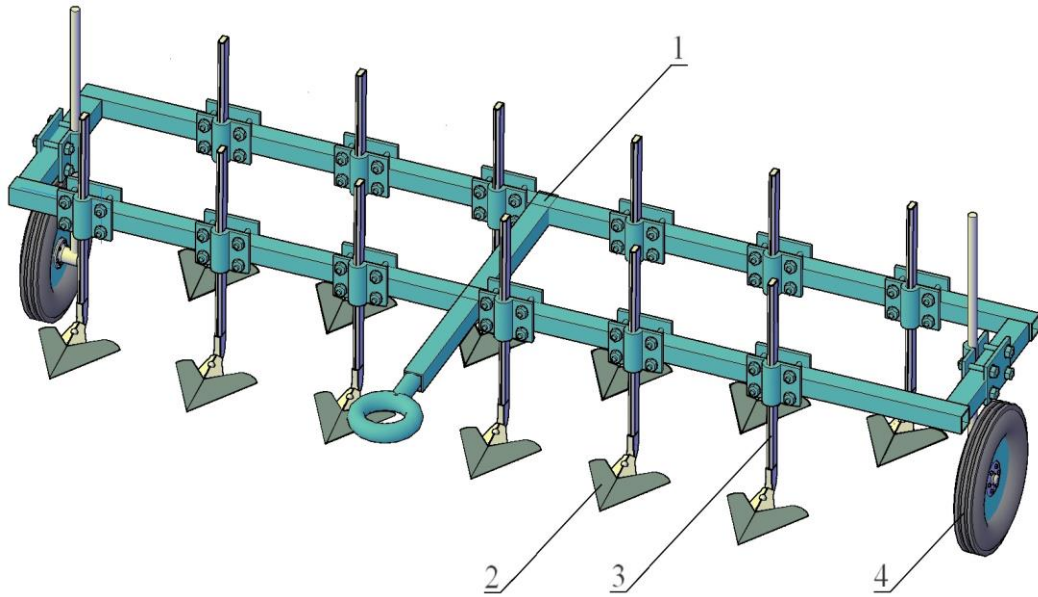


Рис. 5.25. Компонування конструкції культиватора:

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

Перспективним напрямком для конструкції розглянутого культиватора є забезпечення змінювання поперечних і поздовжніх відстаней між стояками лап. Це дозволить краще адаптуватись до наявних різноманітних та мінливих умов обробітку ґрунту.

Приклад дослідження впливу геометричних параметрів стрілкової лапи на енергетичні показники комбінованого культиватора-сошника наведено в додатках А.4.

На завершення даного розділу, після викладення питань конструювання лемішно-полицевих плугів, дискових знарядь і лапових культиваторів, стосовно інтеграції та комплексного підходу акцентуємо важливий на нашу думку аспект уніфікації конструкційних елементів. Порівнюючи рис. 5.12 (плуги), рис. 5.23 (дискатори) та рис. 5.25 (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.

Висновки до розділу 5

У цій частині виконаного дослідження розглянуті математичні описи процесів обробітку ґрунту із застосуванням знарядь, проаналізованих у попередніх розділах дисертації. Опрацьовано як загальні питання, наприклад моделювання траєкторій руху сільськогосподарських агрегатів, так і технологій із використанням конкретних полицевих, дискових та чизельних робочих органів. Зазначені матеріали належним чином доповнюють й узагальнюють подані раніш відомості.

Отримано наступні нові науково-практичні результати.

1. Розроблено методику уточнених розрахунків траєкторій руху ґрунто-обробних знарядь, напрацьовано відповідну узагальнену аналітичну модель, виконано її всебічний аналіз, сформульовано рекомендації стосовно використання.

Важливість даної задачі полягає не тільки в теоретичному, а й у практичному плані. В останньому випадку мається на увазі можливість підвищення якості сільськогосподарських технологічних процесів за рахунок більш точного дотримання агротехнічних вимог обробітку ґрунту, економії паливно-мастильних матеріалів.

2. Напрацьовано методику інтегрованого комплексного геометричного комп'ютерного моделювання лемішно-полицевих плугів. Її особливість полягає в поєднанні таких стадій проектування, як варіантний розрахунок теоретичних поверхонь відвалів, визначення та оптимізація їхньої конструкції, компонування плугів у вигляді належних складаних одиниць.

Успішна реалізація інтегрованого комплексного підходу до автоматизованого проектування технічних об'єктів неможлива без створення узагальнених комп'ютерних моделей, що охоплюють не тільки достатньо широку номенклатуру опрацьовуваних виробів, а й доволі протяжну ділянку їхнього життєвого циклу. У даному разі це стосується поєднання таких стадій проектування, як технічне завдання, ескізний та технічний проект.

3. Створено нову узагальнену математичну модель побудови профілю борозни, яка формується дисковими робочими органами в залежності від їхніх конструкційних та експлуатаційних параметрів.

Отримані результати важливі для виконання теоретичних і практичних досліджень такими суміжними в наведеному аспекті з прикладною геометрією науками, як землеробська механіка, агрогрунтознавство, агрономія, екологія та ін.

4. Розроблено методику інтегрованого комплексного геометричного комп'ютерного моделювання дискаторів та лапових культиваторів суцільного обробітку ґрунту. Акцентовано певну спільність запропонованого підходу до автоматизованого проєктування цих доволі різних із точки зору обробітку ґрунту знарядь. Спеціалізовану його частину становить формоутворення робочих поверхонь даних об'єктів та їхнє виготовлення, а універсальну – подальше конструювання належних складаних одиниць.

Описані засоби дозволяють не тільки підвищити продуктивність автоматизованого проєктування, а й покращити якість сільськогосподарських знарядь та зменшити їхню вартість за рахунок широкого впровадження уніфікації різноманітних конструкційних елементів. Це особливо важливо зараз для нашої держави в нинішній важкій історичний час.

5. Розроблено методику математичного опрацювання числової експериментально-теоретичної інформації шляхом застосування запропонованого способу зменшення області проєктних розв'язків. Ілюстрації здійснено на прикладі дослідження впливу конструкційних параметрів сільськогосподарських дисків на технологічні показники обробітку ґрунту.

Розв'язання наведеної задачі є важливим компонентом інтегрованого комплексного опрацювання багатоманітної промислової продукції. Тобто подана методика має доволі інваріантний характер і варта свого широкого застосування в різних галузях життєдіяльності.

Таким чином, матеріали п'ятого розділу дисертації на практиці підтвердили спроможність запропонованих методології та інструментарію формоутворення, розроблених способів, прийомів та алгоритмів вирішувати на

високому науково-технічному рівні актуальні питання інтегрованого комплексного геометричного моделювання технічних об'єктів, що було продемонстровано на ґрунтообробних сільськогосподарських знаряддях.

Публікації автора з розглянутих питань: [244, 247, 249, 250, 259–261, 267, 273, 282, 364].

Список публікацій здобувача за матеріалами розділу 5

1. 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.

2. 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.

3. 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. Особистий внесок здобувача: розв'язано задачу визначення зони активної дії гвинтового робочого органу ґрунтообробного знаряддя шляхом її геометричного моделювання на базі існуючих моделей переміщення частинок потоку.

4. 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. Особистий внесок здобувача: виконано аналіз різноманітних сошників для прямої сівби просапних культур.

5. 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. Особистий внесок здобувача: запропоновано методику комп'ютерного геометричного моделювання ґрунтообробних знарядь, яку проілюстровано на прикладі лап-полиць культиваторів.

6. 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. Особистий внесок здобувача: розроблено комп'ютерні геометричні моделі різних типів стрільчастих лап, виконано їхню інтеграцію з належними математичними описами енергетичних показників комбінованого культиватора-сошника.

7. 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. Особистий внесок здобувача: удосконалено конструкцію лапового культиватора-сошника з метою зниження тягового опору та підвищення якості сівби.

8. Яблонський П.М., Ванін В.В., Вірченко Г.А., Юрчук В.П. Інтегрований комплексний підхід до геометричного моделювання дискових робочих органів ґрунтообробних знарядь. *Сучасні проблеми моделювання*. Мелітополь: МДПУ, 2020. Вип. 18. С. 52–60. Особистий внесок здобувача: розроблено засади інтегрованого комплексного геометричного моделювання технічних об'єктів на прикладі дискових робочих органів ґрунтообробних знарядь.

9. 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. Особистий внесок здобувача: запропоновано інтегровану методику комп'ютерного геометричного моделювання, яка поєднує етап варіантного опрацювання робочих поверхонь і стадію автоматизованого конструювання стрілчастих лап.

10. 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. Особистий внесок здобувача: удосконалено робочі органи ґрунтообробних фрез шляхом використання їхніх раціональних конструктивних параметрів із метою підвищення ефективності кришіння ґрунту та зниження енергоємності застосовуваних процесів.

11. *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. Особистий внесок здобувача: запропоновано для математичного опису активної зони гвинтових робочих органів ґрунтообробних знарядь використовувати евольвентно-еволютні моделі.

РОЗДІЛ 6

ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШОГО РОЗВИТКУ ІНТЕГРОВАНОГО КОМПЛЕКСНОГО ГЕОМЕТРИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Ця частина дослідження є завершальною в даній дисертаційній роботі. Містить три підрозділи, які стосуються здійснення аналізу отриманих наукових результатів із точки зору теорії та практики, визначення напрямків удосконалення запропонованих методології та інструментарію інтегрованого комплексного геометричного моделювання, розширення сфери їхнього використання. Наведені матеріали підсумовують наявні здобутки й досягнення, акцентують ще не вирішені питання, окреслюють перспективи подальшого належного розвитку.

6.1. Аналіз отриманих наукових результатів

Викладені в цьому підрозділі відомості поділено на два пункти. У першому обґрунтовано виконання поставленої мети та завдань дисертації, аргументовано цінність отриманих теоретичних результатів, а у другому – висвітлено практичну значущість даної праці.

6.1.1. Теоретичні здобутки

Об'єктом дослідження є *автоматизоване геометричне моделювання технічних об'єктів і процесів*, а предметом – *інтегроване комплексне геометричне моделювання ґрунтообробних знарядь*. Виконаними науковими розвідками було досягнуто поставлену мету, яка полягала 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. Це здійснено напрацюванням відповідних способів, прийомів, алгоритмів, моделей та методик, належними впровадженнями у практику.

Важливим у теоретичному плані є проведений *всебічний і докладний огляд літературних джерел з обраної тематики*. Це дозволило оцінити стан розвитку прикладної геометрії в частині моделювання ґрунтообробних знарядь, існуючі проблеми, окреслити шляхи їхнього подолання. Наявну літературу систематизовано за такими напрямками, як: геометричне моделювання технічних об'єктів, процесів їхнього виготовлення та експлуатації; комп'ютерні інженерні засоби автоматизованого формоутворення; структурно-параметрична методологія; проблеми розвитку та актуальні задачі землеробської механіки; сільсько-господарська техніка; моделювання технологічних процесів обробітку ґрунту.

Було зроблено висновки стосовно того, що:

- для геометричного моделювання технічних об'єктів, процесів їхнього виготовлення та експлуатації нині доволі розповсюджене автоматизоване формоутворення ліній, поверхонь і тіл на основі NURBS. Це дозволило визначити перспективи щодо покращення останніх, зокрема у вигляді кривих Безьє зі степеневою параметризацією. Зазначено, що належні продуктивні побудови реалізуються структурно-параметричним конструюванням, яке на поточному етапі потребує удосконалення теоретичних засад та розширення сфери практичного впровадження;

- сучасні комп'ютерні інженерні програми являють собою інтегровані CAD/CAM/CAE/PLM системи, наприклад, Inventor, SolidWorks, NX, Catia та ін. Для виконання складних розрахунків використовуються різні математичні пакети, наприклад, Matlab, Maple та ін. Доцільне поєднання можливостей цих двох класів програм для якісного автоматизованого формоутворення технічних об'єктів;

- у сфері землеробської механіки актуальні питання вдосконалення теорії, впровадження прогресивних методів конструювання, розрахунків на міцність, використання передових досягнень інших наук, зокрема, прикладної геометрії та інженерної графіки;

- створення сільськогосподарської техніки, моделювання технологічних процесів обробітку ґрунту включають належні математичні описи машин і

механізмів, їхніх робочих органів, методики раціонального вибору конструкцій, режимів експлуатації тощо. Успішне виконання окреслених завдань у багатьох випадках спирається на графічні моделі, що визначає необхідність подальшого вдосконалення останніх.

У дисертаційному дослідженні розроблено *методологію інтегрованого комплексного формоутворення технічних об'єктів*, яку 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 промислової продукції, тобто її проектування, виробництва, експлуатації. Зміст терміну «інтегрований» полягає в забезпеченні поєднання зазначених стадій із метою їхньої оптимізації. Дана методологія забезпечила основу для нових способів, прийомів, алгоритмів, моделей та методик формоутворення різноманітних технічних об'єктів.

Напрацьовано *спосіб інтегрованих класифікацій для автоматизованого формоутворення груп технічних об'єктів*, який реалізує ефективне комп'ютерне геометричне моделювання певної номенклатури продукції. Це забезпечується взаємною адаптацією систематизованих графічних засобів і належних виробів, орієнтацією на побудову не *індивідуальних*, а *узагальнених групових моделей*. Останнє потребує реалізації систематизації як формоутворення, так і відповідної промислової продукції. Виконано *класифікацію засобів автоматизованого геометричного моделювання*, інваріантну по відношенню до різноманітних технічних об'єктів, та *спеціалізовану структурно-параметричну класифікацію ґрунтообробних знарядь* стосовно їхнього формоутворення. Описаний спосіб забезпечив продуктивне автоматизоване генерування великого числа опрацьовуваних варіантів, що сприяє дефініції кращого з них.

Розроблено *спосіб зменшення області проектних розв'язків*, який орієнтований на визначення раціональних величин параметрів та характеристик не тільки геометричних, а й інших дисциплін. Він також є інваріантним

компонентом запропонованої інтегрованої комплексної методології автоматизованого формоутворення технічних об'єктів. Основна ідея полягає в поступовій дефініції раціонального проєктного варіанта, що являє собою певну точку в багатовимірному функціональному просторі.

Напрацьовано *спосіб узагальненого контуру*, який спирається на методологію структурно-параметричного формоутворення, доволі універсальний, придатний для проєктування різноманітних груп технічних об'єктів. Головна його перевага полягає в реалізації ефективного аналізу комп'ютерними засобами чисельних варіантів промислової продукції. У рамках даного способу здійснено *узагальнення кривих Безьє використанням ступеневої параметризації*. Показано, що в результаті цього підвищується гнучкість формоутворення, з'являється ряд корисних нових геометричних властивостей, які підтверджено належними математичними викладками.

Удосконалено методологію структурно-параметричного геометричного моделювання доповненням її базових положень *принципом інтеграції*, що полягає в поєднанні етапів життєвого циклу технічних об'єктів та належних засобів формоутворення. Цей принцип проходить стрижнем через усе дане дослідження, слугує базою для багатьох розроблених способів, прийомів, алгоритмів, моделей і методик автоматизованого комп'ютерного геометричного моделювання. Також покращено СПГМ застосуванням до їхніх компонентів *циклічних*, тобто повторюваних, *операцій формоутворення*.

Наведені теоретичні здобутки подано в перших двох розділах дисертації. Цю частину роботи завершено описом *загальної методики геометричного моделювання на засадах інтегрованого комплексного автоматизованого варіантного формоутворення технічних об'єктів*. Вона постає основою для виконаної у трьох подальших розділах практичної реалізації належного геометричного моделювання різноманітних сільськогосподарських ґрунто-обробних знарядь. Ці питання в підсумковій формі стисло викладені в пункті 6.1.2 дисертаційного дослідження.

6.1.2. Практичні досягнення

Значення даної наукової праці для практики полягає в наступному.

Розроблено на засадах запропонованого принципу інтеграції *узагальнену модель формоутворення полицевих та чизельних ґрунтообробних знарядь*, орієнтовану на ефективне застосування сучасних комп'ютерних засобів. Акцентовано, що чим ширшу й багатоманітну номенклатуру продукції охоплюють певні засоби геометричного моделювання, тим легше здійснювати її проектування та комплексну оптимізацію. Шляхом узагальнення однією моделлю будуються доволі різні з точки зору обробітку ґрунту знаряддя. Її придатність до продуктивної та гнучкої генерації великої кількості різновидів опрацьовуваних поверхонь відповідно до наявних вимог реалізує необхідну адаптацію до останніх. Універсальність даного математичного апарату забезпечує його легке впровадження в середовище нинішніх CAD/CAM/CAE систем. Наведені особливості продемонстровано на прикладах формоутворення циліндроїдальних, коноїдальних, гелікоїдальних та інших поверхонь відвалів плугів і стрілчастих лап.

Виконано *аналіз змінювання кутів розпушення, обертання та зсуву ґрунту полицевих робочих поверхонь*, що особливо важливо для досягнення на практиці високих агротехнічних та економічних показників належних сільськогосподарських знарядь. Створено *універсальну методика узагальнення обчислювальних даних* від окремих точок у проектному інтегрованому комплексному просторі, який поєднує геометрію ґрунтообробних знарядь та їхні функціональні характеристики, до відповідних ліній, поверхонь, тіл і багатовимірних фігур. Окресленим шляхом формується *узагальнена область проектних розв'язків*, подальше використання якої полягає в застосуванні запропонованого способу її динамічного зменшення для визначення потрібних розрахункових величин ґрунтообробних знарядь. Зазначена методика пристосована для реалізації в сучасних CAD/CAM/CAE системах, орієнтована на інтегроване комплексне використання іншими суміжними дисциплінами, зокрема, ґрунтообробною механікою.

Розроблено *конструкційні структурно-параметричні варіантні геометричні моделі полицевих і чизельних сільськогосподарських знарядь*. На їхньому прикладі також показано інтегрований комплексний характер напрацьованого підходу до геометричного комп'ютерного моделювання технічної продукції. Для обрання серед проєктованих різновидів найкращих варіантів застосовується метод експертних оцінок техніко-економічних та інших показників створюваних об'єктів і графова структурно-параметрична оптимізація.

Розроблено *математичну модель для вдосконалення конструкції пружинного запобіжника лапового культиватора-сошника*, яка належно враховує наявні польові умови їхньої експлуатації.

Рекомендовано *методику раціонального вибору типу ґрунтообробних знарядь*, що ґрунтується на використанні запропонованих графоаналітичних комп'ютерних моделей. Проілюстровано її застосування на ротаційних робочих органах. Наведена задача досить актуальна на початку проєктування, полягає у визначенні типу створюваних об'єктів, загальної їхньої будови, принципів функціонування і т. д. Особлива відповідальність обумовлена тим, що здійсненні на даному етапі помилки потім доволі важко виправляти.

Виконано *структурно-параметричну класифікацію ґрунтообробних дисків*. Це сприяло підвищенню ефективності геометричного моделювання зазначених виробів. В основу систематизації покладено форму сільськогосподарських знарядь, зокрема, їхні базові поверхні, вирізи та отвори. Продуктивне комп'ютерне створення необхідних комбінацій вказаних характеристик дозволяє в багатоманітному плані досліджувати потрібні властивості наведених об'єктів. Виконано *автоматизоване варіантне формоутворення дискових робочих органів*, яке здатне гнучко адаптуватися до різноманітних суперечливих вимог. Для здійснення інтегрованого комплексного підходу рекомендовано використовувати структурно-параметричну методологію. Проаналізовано можливість застосування розглянутих моделей ґрунтообробних дисків для проведення дефініції їхньої міцності методом скінченних елементів.

Виконано *відтворення деяких технологічних процесів виготовлення сільськогосподарських дисків*, акцентовано важливість взяття до уваги окреслених та інших чинників для цілісного інтегрованого комплексного підходу до автоматизованого проєктування технічних об'єктів. Зауважено, що з метою підвищення продуктивності треба одним обчислювальним засобом, без його надмірного ускладнення, прагнути охопити якомога більше число технологічних варіантів, тобто використовувати узагальнені моделі. Останні сприяють успішному впровадженню на практиці інтегрованого комплексного підходу до геометричного моделювання промислової продукції.

Розроблено *методику уточнених розрахунків траєкторій руху ґрунто-обробних знарядь*, створено відповідний аналітичний опис, здійснено його аналіз, сформульовано рекомендації щодо застосування. Актуальність цієї задачі полягає в теоретичному і практичному плані. В останньому випадку підвищується якість процесів обробітку ґрунту, зокрема внаслідок точнішого дотримання агротехнічних вимог, економляться паливно-мастильні матеріали.

Напрацьовано *методику інтегрованого комплексного геометричного комп'ютерного моделювання лемішно-полицевих плугів*. Її особливість полягає в поєднанні таких стадій, як варіантний розрахунок поверхонь відвалів, дефініція та оптимізація їхньої конструкції, компоновання плугів як складаних одиниць. Акцентовано, що реалізація інтегрованого комплексного підходу до автоматизованого проєктування технічних об'єктів потребує узагальнених комп'ютерних моделей, які охоплюють не тільки широку номенклатуру виробів, а й достатньо протягну ділянку їхнього життєвого циклу. У нашому разі це стосується поєднання таких стадій, як технічне завдання, ескізний та технічний проєкт.

Створено *нову узагальнену математичну модель побудови профілю борозни* дискових робочих органів у залежності від їхніх конструкційних та експлуатаційних параметрів. Одержані результати важливі для теоретичних і практичних досліджень суміжними в наведеному аспекті з прикладною геометрією науками, наприклад, землеробською механікою, агроґрунтознавством, агрономією, екологією та ін.

Розроблено *методику інтегрованого комплексного геометричного комп'ютерного моделювання дискаторів та лапових культиваторів суцільного обробітку ґрунту*. Показано певну схожість запропонованого підходу до автоматизованого проектування цих різних із позицій обробітку ґрунту знарядь. Спеціалізованою частиною є формоутворення робочих поверхонь даних об'єктів та їхнє виготовлення, а універсальною – подальше конструювання належних складаних одиниць. На практиці це забезпечує підвищення продуктивності автоматизованого проектування, покращення якості сільськогосподарських знарядь, зменшення їхньої вартості внаслідок використання уніфікованих елементів конструкції.

Запропоновано *методику математичного опрацювання експериментально-теоретичної інформації шляхом застосування способу зменшення області проектних розв'язків*. Проілюстровано її на прикладі аналізу впливу конструкційних параметрів сільськогосподарських дисків на експлуатаційні показники обробітку ґрунту. Розв'язання цієї задачі в загальному вигляді становить важливу складову інтегрованого комплексного опрацювання різноманітних технічних об'єктів. Зазначена методика доволі інваріантна, тому має перспективу свого широкого використання також у багатьох інших сферах життєдіяльності.

Отже, матеріали цього підрозділу дисертації свідчать про достатньо вагомні теоретичні і практичні результати виконаних наукових розвідок. Це стосується проведеного аналізу сучасного стану розвитку прикладної геометрії в частині моделювання ґрунтообробних знарядь, визначення перспектив його вдосконалення, запропонованої методології інтегрованого комплексного формоутворення технічних об'єктів, напрацьованих способів, прийомів, алгоритмів, моделей і методик автоматизованого проектування ґрунтообробних знарядь, процесів їхнього виготовлення та експлуатації, належних впроваджень у практику. Наступний підрозділ присвячено дефініції основних шляхів розвитку запропонованого підходу інтегрованого комплексного формоутворення технічних об'єктів.

6.2. Подальше вдосконалення методології інтегрованого комплексного геометричного моделювання

Даною роботою створено новий науковий напрямок «інтегрованого комплексного геометричного моделювання технічних об'єктів» у прикладній геометрії та інженерній графіці. Дисертація спирається на результати багаторічної праці науковців школи геометричного моделювання Київського політехнічного інституту. Це стосується, зокрема, здобутків у галузі структурно-параметричного моделювання технічних об'єктів, процесів їхнього виготовлення та експлуатації, сільськогосподарського машинобудування й багатовимірної геометрії.

Як уже зазначалось, важливість обраної тематики обумовлена не тільки потребою узагальнення та інтеграції наявних теоретичних положень і методів, а й необхідністю практики в нових моделях автоматизованого формоутворення, орієнтованих на ефективне застосування сучасних комп'ютерних інформаційних технологій. Поданий опис області досліджень свідчить про її доволі широку проблематику. Зрозуміло, що повністю охопити та докладно опрацювати зазначений матеріал в одній дисертації зовсім не реально. Тому, після окреслення базових складових запропонованої методології інтегрованого комплексного геометричного моделювання, все ще залишаються не виконані перспективні завдання й не розв'язані відповідні задачі.

Головною метою наступних досліджень, на нашу думку, є обрання іншої, ніж ґрунтообробні сільськогосподарські знаряддя, сфери розвідок. Це може бути, наприклад, загальне машинобудування, автомобільна промисловість, нафтопереробна галузь, енергетика, металургія, освіта, медицина тощо. Застосовуючи вже відомі загальні положення, для яких теж ймовірний розвиток, у подальших дисертаціях доцільно, на основі наявних специфічних для опрацьовуваних об'єктів і процесів властивостей, розробляти нові способи, прийоми, алгоритми й моделі формоутворення. Це дозволить отримати більш цілісну методологію інтегрованого комплексного геометричного моделювання.

Існують і більш локальні задачі вдосконалення підходу, який аналізується. Це стосується таких аспектів.

Поглибленого аналізу літературних джерел із конкретних, так би мовити, вузких питань. Вивчення належних здатностей певних сучасних CAD/CAM/CAE систем, упровадження в них за допомогою відповідного програмного забезпечення власних засобів інтегрованого комплексного формоутворення.

На підставі виконаної класифікації ґрунтообробних знарядь здійснити уточнення її елементів шляхом докладної систематизації. Побудувати потрібні нові узагальнені геометричні моделі, які охоплюють достатньо широку номенклатуру виробів. При цьому в нагоді стануть спосіб інтегрованих класифікацій, зменшення області проєктних розв'язків та узагальненого контуру.

Варте уваги аналітичне дослідження нових властивостей запропонованих кривих Безьє зі степеневою параметризацією. Це стосується, зокрема, аналізу впливу на вказану лінію другого степеня її третього керуючого параметра, опрацювання кривих вищого порядку, розширення сфери практичного використання.

Стосовно безпосереднього інтегрованого комплексного геометричного моделювання ґрунтообробних знарядь доречно розповсюдження запропонованого підходу не тільки на вже певним чином досліджені засоби основного обробітку у вигляді полицевих, чизельних та дискових, а і спеціального, наприклад, плантажних та садових плугів, ямокопачів тощо. Важливим моментом є наскрізне охоплення всіх стадій проєктування цієї промислової продукції, тобто ескізного, технічного та робочого проєкта. Доречно напрацьовувати нові математичні залежності й моделі, які більш точно та узагальнено описують різноманітні геометричні властивості, які необхідні спеціальним дисциплінам у галузі обробітку ґрунту, агрономії, виготовлення й експлуатації сільськогосподарських знарядь тощо. Також актуальне питання оптимального компонування останніх у складі машинно-тракторних агрегатів.

Перспективне геометричне та комп'ютерне динамічне варіантне моделювання різноманітних процесів обробітку ґрунту. Його основна перевага полягає у простоті й наочності, а в останньому випадку додатково також у доступності для використання на практиці кінцевим споживачем, яким може бути, завдяки бурхливому розвитку комп'ютерних інформаційних технологій, наприклад, звичайний фермер.

Доцільне застосування інтегрованого комплексного підходу у сфері проведення аналізу методів та особливостей цифровізації польових досліджень, як бази для управління рослинництвом. Про це свідчить публікація [277] автора. У ній показано, що поряд з оновленням матеріально-технічної бази нині важливою складовою є інтелектуалізація виробничої та управлінської діяльності на основі сучасних комп'ютерних інформаційних технологій. Актуальне питання опрацювання суміжних із обробітком ґрунту сільськогосподарських процесів, зокрема, збирання врожаю та його транспортування, див. видання [285], [290], [367].

Таким чином, у даній частині дисертації окреслено основні напрямки подальшого розвитку та вдосконалення запропонованої методології інтегрованого комплексного геометричного моделювання технічних об'єктів.

6.3. Розширення сфери використання напрацьованого підходу

У попередньому розділі зазначалось, що одну з головних цілей наступних наукових розвідок щодо інтегрованого комплексного формоутворення промислової продукції становить його 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.

Стосовно останньої, то дещо було зроблено належними впровадженнями в навчальний процес Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»: у вигляді методик інтегрованого

комплексного геометричного моделювання технічних об'єктів при викладанні дисципліни «Інженерна та комп'ютерна графіка» студентам машинобудівних спеціальностей, створення ними деталей і складаних одиниць комп'ютерними засобами; на факультеті інформатики та обчислювальної техніки щодо побудови комплексних комп'ютерних геометричних моделей промислових виробів під час викладання курсів «Комп'ютерна графіка та обробка зображень» і «Комп'ютерна графіка та мультимедіа». Було підтверджено сприяння запропонованого підходу отриманню здобувачами вищої освіти практичних навичок ефективного опрацювання реальних технічних об'єктів у середовищі САПР.

Упроваджено результати виконаного дослідження також у Науково-виробничому підприємстві «Техногаз» м. Полтави у вигляді розробленого комплексного підходу та способів комп'ютерного моделювання, що сприяє покращенню інтеграції таких складових комплексної підготовки газу, як блок сепарації, установки очищення, осушення, охолодження газу та дотискні компресорні станції. За рахунок цього підвищується ефективність забезпечення дотримання належних параметрів технологічного процесу підготовки природного газу. Через обмежений обсяг дисертації та конфіденційний характер зазначеної інформації далі наведено тільки окремі елементи реалізованих рішень.

Постачання газу здійснюється через певну систему трубопроводів, які до свого складу включають труби, засоби їхнього з'єднання та арматуру для регулювання потоками, див. рис. 6.1 та рис. 6.2.

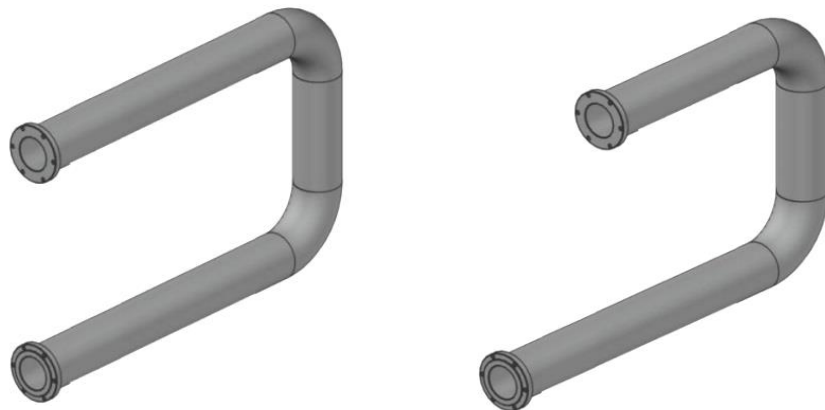


Рис. 6.1. Варіанти трубопроводу без розгалужень й арматури

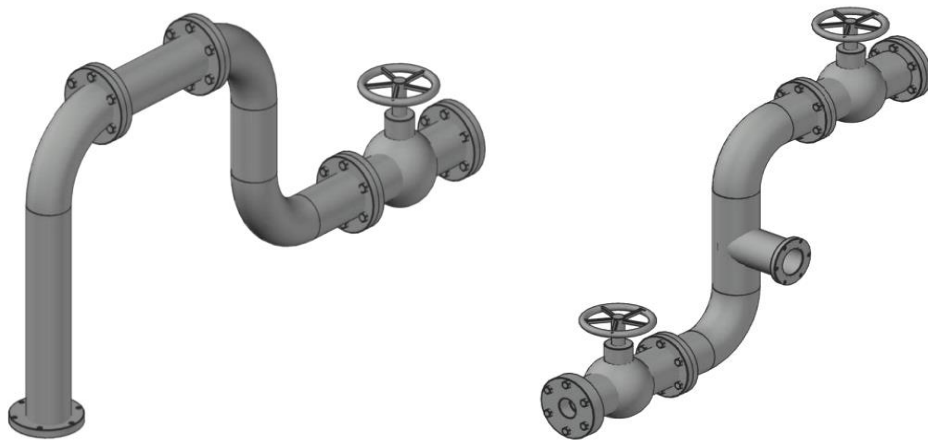


Рис. 6.2. Різновиди трубопроводу з арматурою та розгалуженням

На першому бачимо прямолінійні ділянки труб, що поєднані відводами (колінами), які забезпечують у даному випадку поворот потоку газу на 90 градусів, та фланці, тобто диски з рівномірно розташованими отворами під болти. Ці деталі використовуються для герметичного сполучення труб і встановлення арматури. Геометричними параметрами прямолінійних труб є їхній діаметр, товщина стінки та довжина. Відводи характеризуються діаметром, товщиною стінки, радіусом і кутом повороту. Приклади деяких різновидів труб, фланців та їхнього з'єднання наведено на рис. 6.3.

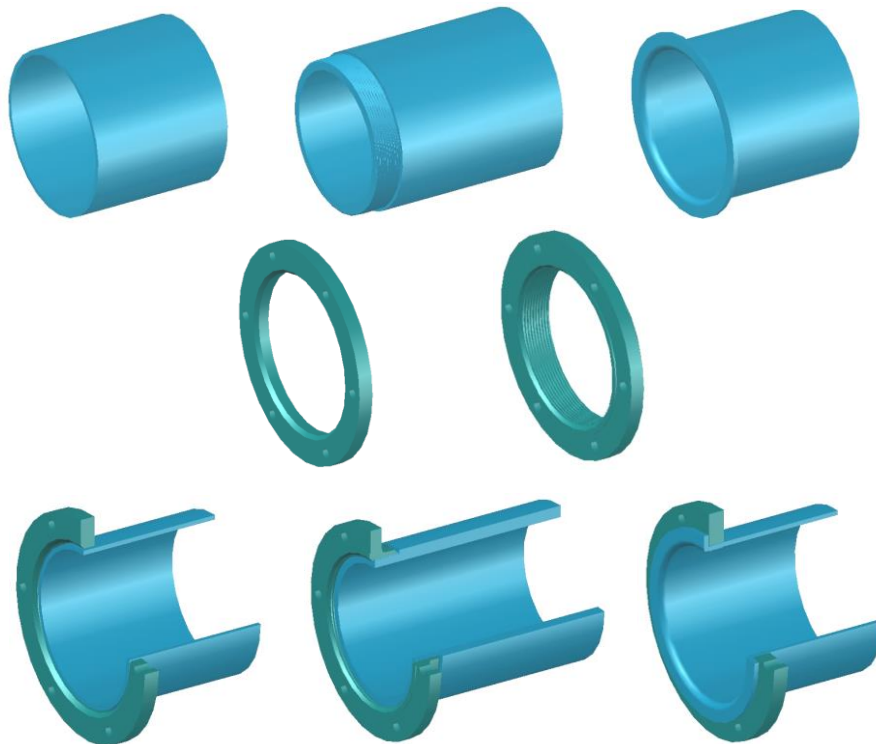


Рис. 6.3. Варіанти труб, фланців та їхніх з'єднань

У першому ряді подано труби, де друга на кінці має нарізь, а третя – розвальцювання. У наступному показано фланці, де останній із нарізю. Нижні зображення відтворюють з'єднання, які відповідають проаналізованим трубам. Приклади розгалужень у вигляді трійників містяться на рис. 6.4.

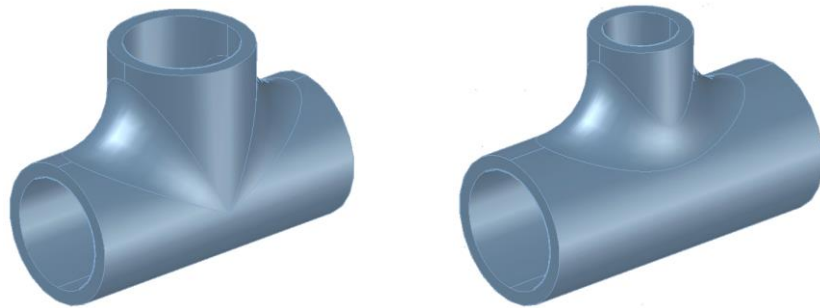


Рис. 6.4. Деякі різновиди трійників

При цьому перший рівнопрохідний, а другий – перехідний. Основними їхніми геометричними параметрами є діаметри та товщина стінки.

Рис. 6.5 демонструє комп'ютерну твердотільну модель перекривної арматури, яка застосовується під час інтегрованого комплексного компонування газових трубопроводів.

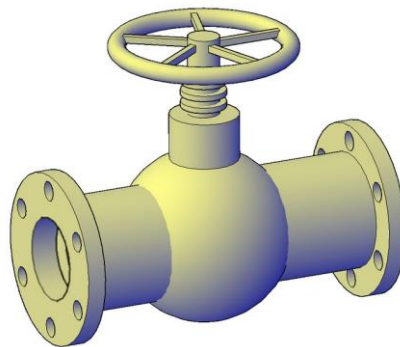


Рис. 6.5. Компонувальна модель перекривного засува

Наведені вище зображення підтверджують варіантний характер проєктування газового обладнання, важливість геометричних параметрів і характеристик його елементів для здійснення комплексної оптимізації.

Результати дисертаційного дослідження впроваджено в ТОВ «Інноваційні інженерні рішення» м. Києва у вигляді запропонованих способів і прийомів інтегрованого комплексного комп'ютерного моделювання при створенні проєктів будівельно-монтажних робіт. Це дозволило підвищити техніко-економічні показники за рахунок продуктивного автоматизованого варіантного

опрацювання використовуваного електромонтажного обладнання та устаткування. Подані факти засвідчують перспективність інтегрованого комплексного формоутворення також у будівельній галузі. Це додатково підтверджується публікаціями [360, 361] автора, присвяченими мікроклімату виробничих приміщень. Цікаве теж поєднання запропонованого підходу з математичними моделями клітинних автоматів, див видання [368], та модульним геометричним підходом до автоматизованого проєктування виробів і процесів їхнього виготовлення в машинобудуванні, що досліджується працею [265].

На закінчення викладення матеріалів стосовно поширення інтегрованого комплексного геометричного моделювання технічних об'єктів зауважимо, що дане питання може бути успішно вирішено. Це досягається завдяки універсальності розроблених теоретичних положень, способів, прийомів, алгоритмів і моделей формоутворення, значним чином інваріантних до різноманітної промислової продукції.

Висновки до розділу 6

Дана частина дисертації є завершальною у виконаному дослідженні. Тому її основне завдання становить підсумовування отриманих результатів, висвітлення шляхів подальшого вдосконалення запропонованої методології інтегрованого комплексного геометричного моделювання, розширення сфери її застосування.

Було отримано наступні науково-прикладні та практичні результати.

1. Виконано критичний аналіз теоретичних здобутків, до яких належить розроблена методологія інтегрованого комплексного формоутворення технічних об'єктів, проілюстрована на прикладі ґрунтообробних знарядь, та нові відповідні способи геометричних побудов.

Коментарі щодо наукової значущості зазначених досягнень подано у висновках до другого розділу дисертації. У даній же частині дослідження було окреслено напрямки покращення цих теоретичних засад.

2. Здійснено узагальнений систематизований опис одержаних практичних результатів, до яких відноситься:

– узагальнена аналітична модель формоутворення 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 належно враховує наявні польові умови їхньої експлуатації;

– інструментарій для уточнення розрахунків траєкторій руху сільськогосподарських знарядь, що сприяє поліпшенню обробітку ґрунту внаслідок точнішого дотримання агротехнічних вимог, а також забезпечує економію 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, агрогрунтознавства та інших відповідних спеціалізованих наук;

- методика інтегрованого комплексного геометричного комп'ютерного моделювання лемішно-полицевих плугів, яка поєднує варіантний розрахунок поверхонь відвалів, дефініцію та оптимізацію їхньої конструкції, компонування плугів як складаних одиниць;

- методика інтегрованого комплексного геометричного комп'ютерного моделювання дискаторів і лапових культиваторів суцільного обробітку ґрунту, в якій акцентовано її спеціалізовані та універсальні складові;

- методика математичного опрацювання експериментально-теоретичної інформації шляхом застосування способу зменшення області проектних розв'язків, яку проілюстровано на прикладі аналізу впливу конструкційних параметрів сільськогосподарських дисків на експлуатаційні показники обробітку ґрунту.

3. 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 нових узагальнених геометричних моделей, які охоплюють достатньо широку номенклатуру виробів;

- дослідження нових властивостей запропонованих кривих Безьє 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 проекту;

- оптимального компонування машинно-тракторних агрегатів;

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

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

4. Окреслено ймовірне розширення застосування розробленої методології інтегрованого комплексного геометричного моделювання технічних об'єктів.

Це може бути загальне та галузеве машинобудування, енергетика, металургія, нафтопереробна промисловість, медицина, освіта і т. д.

Таким чином, матеріали цього розділу дисертації свідчать про розвиток теоретичного ядра прикладної геометрії, її методології та інструментарію шляхом розробляння спеціальної теорії інтегрованого комплексного геометричного моделювання технічних об'єктів і процесів, окреслено перспективи їхнього подальшого розвитку та можливе розширення сфери використання.

Публікації автора з розглянутих питань: [256, 257, 263, 265, 266, 270, 277, 285, 290, 360, 361, 367, 368].

Список публікацій здобувача за матеріалами розділу 6

1. 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. Особистий внесок здобувача: проаналізовано сучасний стан, актуальні проблеми та напрямки розвитку наукової школи прикладної геометрії КПІ ім. Ігоря Сікорського.

2. 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. 15. Особистий внесок здобувача: обґрунтовано, що для досягнення ефективних результатів комп'ютерного геометричного моделювання різноманітної

промислової продукції необхідно здійснювати не тільки узагальнення засобів формоутворення, а й відповідних об'єктів проєктування.

3. 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. Особистий внесок здобувача: виконано аналіз сучасного стану, основних напрямків досліджень, отриманих здобутків та перспектив подальшого розвитку наукової школи прикладної геометрії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», визначено потреби формування інтегрованої комплексної методології геометричного моделювання різноманітних технічних об'єктів, процесів їхнього виготовлення та експлуатації.

4. 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. Особистий внесок здобувача: запропоновано базові засади загальної концепції модульно-геометричного підходу до формоутворення технічних об'єктів в середовищі сучасних машинобудівних систем автоматизованого проєктування.

5. 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. Особистий внесок здобувача: визначено перспективний підхід до комп'ютерного формоутворення різноманітної промислової продукції, зроблено прогноз необхідних методів, способів, прийомів, алгоритмів і методик автоматизованого геометричного моделювання технічних об'єктів.

6. 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. Особистий внесок здобувача: виконано опис основних положень інтегрованого комплексного геометричного моделювання ґрунтообробних знарядь.

7. 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: УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого, 2023. Вип. 33 (47). С. 22–34. Особистий внесок здобувача: запропоновано ідею проведення аналізу та систематизації публікацій стосовно методів та особливостей цифровізації польових досліджень як бази для управління рослинництвом.

8. 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. Особистий внесок здобувача: удосконалено сортувальний стіл картоплезбирального комбайна шляхом автоматизації застосовуваного процесу.

9. Яблонський П.М., Фришев С.Г., Лукач В.С., Василюк В.І. 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. Особистий внесок здобувача: запропоновано варіантне моделювання транспортування коренеплодів цукрових буряків після викопування з метою проведення комплексної оптимізації зазначених технологічних процесів.

10. 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. Особистий внесок здобувача: запропоновано поєднання інтегрованого комплексного підходу з засобами фізичного, математичного та комп'ютерного геометричного моделювання складних технічних об'єктів та належних технологічних процесів.

11. *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. 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.

12. *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. Особистий внесок здобувача: виконано комп'ютерне геометричне моделювання технологічних сільськогосподарських процесів із метою їхньої оптимізації.

13. *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. Особистий внесок здобувача: акцентовано важливість забезпечення створюваними математичними моделями потрібного впливу на досліджувані динамічні процеси, їхньої належної комп'ютерної візуалізації.

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 проєктування 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, багатовимірна 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 проектування різноманітних груп технічних об'єктів. Основною перевагою є забезпечення продуктивного аналізу комп'ютерними засобами чисельних варіантів опрацьовуваної промислової продукції;

- спосіб зменшення області проектних 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 при виконанні обробітку ґрунту дисками, виготовленими за запропонованими в дисертаційній роботі геометричними моделями;

- у фермерському господарстві «Павільйон флори» Миргородського району Полтавської області під час проведення лабораторно-польових експериментальних досліджень дискової робочої поверхні ґрунтообробного знаряддя типу «ромашка», виконаної згідно з геометричною моделлю, розробленою здобувачем;

- у навчальний процес КПІ ім. Ігоря Сікорського на кафедрі нарисної геометрії, інженерної та комп'ютерної графіки у вигляді методик інтегрованого

комплексного геометричного моделювання технічних об'єктів при викладанні дисципліни «Інженерна та комп'ютерна графіка» студентам машинобудівних спеціальностей, на факультеті інформатики та обчислювальної техніки під час формування комплексних комп'ютерних геометричних моделей технічних об'єктів при викладанні дисциплін «Комп'ютерна графіка та обробка зображень» і «Комп'ютерна графіка та мультимедіа»;

– у Науково-виробничому підприємстві «Техногаз» м. Полтави шляхом застосування розробленого комплексного підходу та способів комп'ютерного моделювання, що сприяє покращенню інтеграції таких складових комплексної підготовки газу, як блок сепарації, установки очищення, осушення, охолодження газу та дотискні компресорні станції;

– у ТОВ «Інноваційні інженерні рішення» м. Києва використанням напрацьованих способів і прийомів інтегрованого комплексного комп'ютерного моделювання при створенні проєктів будівельно-монтажних робіт.

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 ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Адамчук В.В., Булгаков В.М. Пріоритетні напрями створення сучасної сільськогосподарської техніки. *Вісник аграрної науки*. Київ: Аграрна наука, 2014. № 5. С. 5–10. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vaan_2014_5_3
2. Адамчук В.В., Булгаков В.М., Надикто В.Т., Головач І.В. Дослідження керованості руху машинно-тракторного агрегату модульного типу. *Вісник аграрної науки*. Київ: Аграрна наука, 2020. № 6. С. 47–54. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vaan_2020_6_8
3. Адамчук В.В., Булгаков В.М., Надикто В.Т., Ігнат'єв Є.І. Теоретичне дослідження рівномірного руху боронувальної секції для обробітку парів. *Механізація та електрифікація сільського господарства*. Глеваха: ННЦ «ІМЕСГ», 2021. Вип. 13. С. 10–19. URL: <https://doi.org/10.37204/0131-2189-2021-13-1>
4. Адамчук В.В., Булгаков В.М., Танчик С.П., Надикто В.Т. Сучасні проблеми оранки як особливого прийому обробітку ґрунту. *Вісник аграрної науки*. Київ: Аграрна наука, 2016. № 1. С. 5–10. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vaan_2016_1_3
5. Адамчук В.В., Грицишин М.І. Пріоритетні напрямки агроінженерних досліджень. *Механізація та електрифікація сільського господарства*. Глеваха: ННЦ «ІМЕСГ», 2013. Вип. 97(1). С. 14–23. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/mesg_2013_97%281%29_3
6. Адамчук В.В., Калетнік Г.М., Черновол М.І., Булгаков В.М. Сучасні проблеми землеробської механіки. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. Кропивницький: КНТУ, 2013. Вип. 43(1). С. 3–11. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Zmntz_2013_43%281%29_3
7. Алфьоров О.І. Динаміка руху та надійність робочих органів ґрунтообробних агрегатів на пружній підвісці. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства*. Харків: ХНТУСГ, 2015. Вип. 158. С. 271–278. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vkhdtusg_2015_158_42
8. Алфьоров О.І. Динамічні характеристики пружної підвіски робочих органів ґрунтообробних агрегатів. *Вісник Харківського національного*

технічного університету сільського господарства. Харків: ХНТУСГ, 2015. Вип. 163. С. 174–177. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vkhdtusg_2015_163_29

9. Алфьоров О.І. Динамічні характеристики робочих органів культиватора при інтенсифікованому процесі обробітку ґрунту. *Інженерія природокористування*. Харків: ХНТУСГ, 2021. № 3. С. 73–81. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Iprk_2021_3_11

10. Анікеев О.І., Артьомов М.П., Сировицький К.Г., Чигрина С.А. Моделювання технологічних процесів основного обробітку ґрунту. *Інженерія природокористування*. Харків: ХНТУСГ, 2021. № 1. С. 90–96. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Iprk_2021_1_15

11. Анікеев О.І., Сердюк Ю.О. Перспективи розвитку технології та класифікаційна модель робочих органів для технології Strip Till. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства*. Харків: ХНТУСГ, 2017. Вип. 180. С. 299–304. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vkhdtusg_2017_180_44

12. Артьомов М.П. Вплив зміни вертикальних прискорень машинно-тракторних агрегатів на ущільнення ґрунту при виконанні агротехнічних операцій. *Інженерія природокористування*. Харків: ХНТУСГ, 2017. № 2. С. 90–95. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Iprk_2017_2_18

13. Артьомов М.П. Визначення тягових і енергетичних показників мобільних сільськогосподарських агрегатів при динамічних випробуваннях. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*. Харків: ХНТУСГ, 2018. № 11. С. 175–180. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/tcalc_2018_11_24

14. Артьомов М.П. Сучасні проблеми і напрямки розвитку систем землеробства в Україні. *Інженерія природокористування*. Харків: ХНТУСГ, 2019. № 2. С. 60–65. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Iprk_2019_2_9

15. Артьомов М.П., Кот О.В. Тягова динаміка сільськогосподарських ґрунтообробних агрегатів. *Сільськогосподарські машини*. 2015. Вип. 32. С. 10–18. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/silmah_2015_32_4

16. Артёмов М.П., Лебедев А.Т., Шуляк М.Л., Кулаков Ю.М. Оцінка тягово-динамічних властивостей на основі прискорення трактора. *Інженерія природокористування*. Харків: ХНТУСГ, 2015. № 1. С. 84–89. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Iprk_2015_1_17
17. Артёмов М.П., Подригало М.А., Шуляк М.Л. Визначення динамічних характеристик сільськогосподарських агрегатів. *Вібрації в техніці та технологіях*. Вінниця: ВНАУ, 2016. № 3. С. 5–10. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vvtt_2016_3_3
18. Аушева Н.М. Геометричне моделювання об'єктів дійсного простору на основі ізотропних характеристик: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.01.01. Київ: КНУБА, 2014. 38 с.
19. Аушева Н.М. Моделювання кривих Безье на основі уявних дотичних. *Сучасні проблеми моделювання*. Мелітополь: МДПУ, 2015. Вип. 4. С. 9–13. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/cpm_2015_4_4
20. Бадаев Ю.І., Бліндарук А.О. Керування кривою NURBS кривої 3-го порядку за допомогою ваги контрольних вектор-точок. *Водний транспорт*. Київ: ДУІТ, 2014. Вип. 3. С. 103–105. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vodt_2014_3_21
21. Бадаев Ю.І., Бліндарук А.О. Комп'ютерна реалізація проектування криволінійних обводів методом NURBS-технологій вищих порядків. *Сучасні проблеми моделювання*. Мелітополь: МДПУ, 2014. Вип. 2. С. 3–8. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/cpm_2014_2_3
22. Бадаев Ю.І., Ганношина І.М. Моделювання плоскої кривої із заданим законом кривини. *Сучасні проблеми моделювання*. Мелітополь: МДПУ, 2015. Вип. 4. С. 14–17. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/cpm_2015_4_5
23. Бадаев Ю.І., Ганношина І.М. Моделювання ермітового сплайна 5-го степеня із заданим законом кривини. *Сучасні проблеми моделювання*. Мелітополь: МДПУ, 2016. Вип. 6. С. 8–11. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/cpm_2016_6_4
24. Бадаев Ю.І., Ганношина І.М. Раціональна крива Безье 5-го степеня за заданими двома точками та величинами кривини в них. *Водний транспорт*. Київ: ДУІТ, 2016. Вип. 1. С. 208–212. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vodt_2016_1_36

25. Бадаев Ю.І., Лагодіна Л.П. Моделювання і комп'ютерна реалізація векторно-параметричної кривої за заданими двома точками і першими, другими і третіми похідними в них. *Сучасні проблеми моделювання*. Мелітополь: МДПУ, 2021. Вип. 21. С. 16–22. URL: <https://doi.org/10.33842/22195203/2021/21/16/22>

26. Балан С.О. Інтелектуальні інформаційні технології в машинобудуванні. Одеса: Астропринт, 2002. 360 с.

27. Балюба І.Г., Малютіна Т.П., Старченко Ж.В. Представлення в БН-численні відомих з математики кривих площини, визначених параметричними рівняннями. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. Прикладна геометрія та інженерна графіка*. Мелітополь: ТДАТУ, 2013. Вип. 4. Т. 57. С. 28–32.

28. Беседа О.О., Маслійов С.В. Сільськогосподарські машини. Частина І. Ґрунтообробні, посівні та садильні машини. Луганськ: ТОВ «Віртуальна реальність», 2014. 188 с.

29. Боженко В.О. Сільськогосподарські машини та їх використання. Київ: Аграрна освіта, 2009. 420 с.

30. Борисенко В.Д. Геометричне моделювання лопатних апаратів нагнітальних і розширювальних турбомашин різного конструктивного оформлення: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.01.01. Київ: КНУБА, 2002. 37 с.

31. Борисенко В.Д., Устенко І.В. Модифікація кривих Безье. *Науковий вісник Мелітопольського державного педагогічного університету. Серія: Математика. Геометрія. Інформатика*. Мелітополь: МДПУ, 2014. Т. 1. С. 32–36.

32. Борисенко В.Д., Устенко С.А., Устенко І.В. Геометричне моделювання компонентів енергетичного обладнання із застосуванням функцій SolidWorks API. *Прикладна геометрія та інженерна графіка*. Київ: КНУБА, 2005. Вип. 75. С. 29–35.

33. Борисенко В.Д., Устенко С.А., Устенко І.В. Моделювання складених кривих із застосуванням лінійних законів розподілу їх кривини. *Наукові праці Чорноморського державного університету. Серія: комп'ютерні технології*. Миколаїв: ЧДУ, 2015. Вип. 254. Т. 266. С. 6–10. URL: <https://lib.chmnu.edu.ua/index.php?m=10&s=9&t=266>

34. Брагінець М.В., Поляков Б.А., Фесенко Г.В., Поляков А.М. Удосконалення технологічних властивостей сільськогосподарського агрегату. *Інженерія природокористування*. Харків: ХНТУСГ, 2019. № 1. С. 103–108. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Iprk_2019_1_15

35. Браїлов О.Ю. Комплексне формування спряжених криволінійних поверхонь, що виключають інтерференцію: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.01.01. Київ: КНУБА, 2004. 36 с.

36. Булгаков В.М., Кюрчев В.М., Надикто В.Т. Дослідження стійкості вертикального руху орно-подрібнювального МТА. *Механізація та електрифікація сільського господарства*. Глеваха: ННЦ «ІМЕСГ», 2015. Вип. 2. С. 167–178. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/mesg_2015_2_23

37. Булгаков В.М., Надикто В.Т., Головач І.В., Присяжнюк Д.В. Дослідження стійкості руху модульного машинно-тракторного агрегату. *Вісник аграрної науки*. Київ: Аграрна наука, 2020. № 5. С. 61–68. URL: <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202005-08>

38. Булгаков В.М., Танчик С.П., Надикто В.Т. Теорія і практика обробітку ґрунту в сучасних умовах. *Механізація та електрифікація сільського господарства*. Глеваха: ННЦ «ІМЕСГ», 2015. Вип. 2. С. 30–38. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/mesg_2015_2_5

39. Ванін В.В. Евольвентно-еволютні моделі в упорядкованих потоках: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.01.01. Київ: КДТУБА, 1996. 39 с.

40. Ванін В.В. Структурно-параметричне геометричне моделювання як засіб інтеграції процесів проектування та виробництва об'єктів машинобудування: дис. ... канд. техн. наук: 05.01.01. Київ: НТУУ «КПІ», 2008. 153 с.

41. Ванін В.В., Вірченко В.Г. Оптимальне варіантне геометричне моделювання технічних об'єктів. *Прикладна геометрія та інженерна графіка*. Київ: КНУБА, 2012. Вип. 89. С. 22–27.

42. Ванін В.В., Вірченко Г.А. Деякі питання моделювання кривими Безьє третього порядку. *Праці Таврійської державної агротехнологічної академії. Прикладна геометрія та інженерна графіка*. Мелітополь: ТДАТА, 2004. Вип. 4. Т. 23. С. 9–13.

43. Ванін В.В., Вірченко Г.А. Визначення та основні положення структурно-параметричного геометричного моделювання. *Геометричне та комп'ютерне моделювання*. Харків: ХДУХТ, 2009. Вип. 23. С. 42–48.

44. Ванін В.В., Вірченко Г.А., Ванін І.В. Деякі питання розробки обчислювальних алгоритмів структурно-параметричного моделювання складних геометричних об'єктів. *Прикладна геометрія та інженерна графіка*. Київ: КНУБА, 2006. Вип. 76. С. 17–23.

45. Ванін В.В., Вірченко Г.А., Ванін І.В. Структурно-параметричні геометричні моделі як основа для узгодженої розробки літака на стадії ескізного проектування. *Наукові вісті НТУУ «Київський політехнічний інститут»*. Київ: НТУУ «КПІ», 2006. № 4 (48). С. 35–41.

46. Ванін В.В., Вірченко Г.А., Вірченко В.Г. Застосування структурно-параметричного підходу як методології комп'ютерної комбінаторно-варіаційної геометрії. *Прикладна геометрія та інженерна графіка*. Київ: КНУБА, 2011. Вип. 87. С. 12–17.

47. Ванін В.В., Вірченко Г.А., Вірченко Г.І. Застосування структурно-параметричного моделювання для проектування нафтопереробного обладнання. *Вісник національного технічного університету України «КПІ». Серія «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження»*. Київ: НТУУ «КПІ», 2016. Вип. № 1 (15). С. 10–15. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/VKPI_hier_2016_1_4

48. Ванін В.В., Вірченко Г.А., Гумен О.М. Сучасний стан і перспективи розвитку наукової школи прикладної геометрії КПІ ім. Ігоря Сікорського. *Прикладна геометрія та інженерна графіка*. Київ: КНУБА, 2021. Вип. 100. С. 5–12. URL: <https://doi.org/10.32347/0131-579X.2021.100.5-12>

49. Ванін В.В., Вірченко Г.І. Метод поліпараметризації як інваріантний компонент комп'ютерного формоутворення. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*. Мелітополь: ТДАТУ, 2016. Вип. 6. Т. 1. С. 269–274. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvt dau_2016_6_1_32

50. Ванін В.В., Вірченко Г.І., Вірченко С.Г. Варіантне моделювання геометричних об'єктів методом поліпараметризації. *Проблеми інформаційних технологій*. Херсон: ХНТУ, 2014. № 2 (16). С. 76–79. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Pit_2014_2_12

51. Ванін В.В., Вірченко Г.І., Вірченко С.Г. Деякі перспективи подальшого розвитку параметричного опису геометричних фігур. *Сучасні проблеми моделювання*. Мелітополь: МДПУ, 2016. Вип. 5. С. 9–13. URL: <https://magazine.mdpu.org.ua/index.php/spm/issue/view/62>

52. Ванін В.В., Вірченко Г.І., Шамбіна С.Л. Обґрунтування деяких властивостей кривих Безьє другого степеня. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2016. Вип. 6. Т. 2. С. 3–8. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvtdau_2016_6_2_3

53. Ванін В.В., Гумен О.М. Деякі аспекти застосування засобів геометричного моделювання у проєктивному просторі. *Прикладна геометрія та інженерна графіка*. Київ: КНУБА, 2011. Вип. 87. С. 90–93.

54. Василенко М.О., Буслаєв Д.О., Калінін О.Є., Кононогов Ю.А. Обґрунтування раціональних параметрів зміцнення робочих органів ґрунтообробних машин способом електроконтактного оброблення. *Механізація та електрифікація сільського господарства*. Глеваха: ННЦ «ІМЕСГ», 2019. Вип. 9. С. 156–163. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/mesg_2019_9_21

55. Веремейчик Н.В., Грицишин М.І., Днесь В.І., Кудринський Р.Б. Особливості узгодження параметрів технічного оснащення з характеристиками виробничих планів машинно-технологічних систем рільництва. *Механізація та електрифікація сільського господарства*. Глеваха: ННЦ «ІМЕСГ», 2020. Вип. 11. С. 218–226. URL: <https://doi.org/10.37204/0131-2189-2020-11-15>

56. Верещага В.М. Дискретно-параметричний метод геометричного моделювання кривих ліній та поверхонь: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.01.01. Київ: КДТУБА, 1996. 32 с.

57. Верещага В.М., Лисенко К.Ю. Корегування форми плоского точкового поліному шляхом зміни положення його базисних точок. *Сучасні проблеми моделювання*. Мелітополь: МДПУ, 2021. Вип. 22. С. 12–21. URL: <https://doi.org/10.33842/2313-125X-2021-22>

58. Вірченко В.Г. Комбінаторно-варіаційне геометричне моделювання технічних об'єктів: дис. ... канд. техн. наук: 05.01.01. Київ: НТУУ «КПІ», 2014. 219 с.

59. Вірченко Г.А. Деякі прийоми та алгоритми структурно-параметричного синтезу геометричних об'єктів. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. Прикладна геометрія та інженерна графіка*. Мелітополь: ТДАТУ, 2010. Вип. 4. Т. 48. С. 63–68.

60. Вірченко Г.А. Застосування комп'ютерних структурно-параметричних геометричних моделей для раціонального проектування технологічних процесів у машинобудуванні. *Машинознавство*. 2010. №7 (157). С. 34–37.

61. Вірченко Г.А. Узагальнення структурно-параметричного підходу до геометричного моделювання об'єктів машинобудування: дис. ... докт. техн. наук: 05.01.01. Київ: НТУУ «КПІ», 2011. 357 с.

62. Вірченко Г.А., Ванін В.В., Вірченко В.Г. Структурно-параметричне твердотільне геометричне моделювання стояків планера літака. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. Прикладна геометрія та інженерна графіка*. Мелітополь: ТДАТУ, 2008. Вип. 4. Т. 37. С. 83–91.

63. Вірченко Г.А., Голова О.О., Воробйов О.М., Надкернична Т.М. Структурно-параметрична модель поверхонь другого порядку. *Прикладна геометрія та інженерна графіка*. Київ: КНУБА, 2021. Вип. 100. С. 71–80. URL: <https://doi.org/10.32347/0131-579X.2021.100.71-80>

64. Вірченко Г.А., Колосова О.П. Застосування структурно-параметричного геометричного моделювання для оптимізації конструкції хвилеводів і концентраторів ультразвукового технологічного обладнання. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. Херсон: ХНТУ, 2014. Вип. 4(51). С. 145–149. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vkhdtu_2014_4_26

65. Вірченко Г.І. Застосування графів-дерев для динамічного варіантного моделювання геометричних об'єктів. *Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво*. Луцьк: ЛНТУ, 2015. №19. С. 96–99. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Kitonv_2015_19_17

66. Вірченко Г.І. Динамічне варіантне формоутворення ліній, поверхонь і тіл методом поліпараметризації. *Наукові нотатки. Інженерна механіка*. Луцьк: ЛНТУ, 2015. Вип. 48. С. 45–48. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nn_2015_48_10

67. Вірченко Г.І. Метод поліпараметризації як ефективний засіб варіантного динамічного комп'ютерного формоутворення. *Прикладна геометрія та інженерна графіка*. Київ: КНУБА, 2015. Вип. 93. С. 5–9.

68. Вірченко Г.І. Варіантне геометричне моделювання технічних об'єктів методом поліпараметризації: дис. ... канд. техн. наук: 05.01.01. Київ: НТУУ «КПІ», 2016. 191 с.

69. Вірченко С.Г. Динамічне формоутворення технічних об'єктів засобами структурно-параметричного моделювання: дис. ... канд. техн. наук: 05.01.01. Київ: НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», 2018. 214 с.

70. Власюк Г.Г. Приклад конструювання поверхні носової частини літака з використанням плоских кривих скінченних сум. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. Прикладна геометрія та інженерна графіка*. Мелітополь: ТДАТА, 2001. Вип. 4. Т. 13. С. 98–102.

71. Войтюк Д.Г., Аніскевич Л.В., Волянський М.С., Мартишко В.М. Сільськогосподарські машини. Київ: Агроосвіта, 2017. 180 с.

72. Войтюк Д.Г., Гаврилюк Г.Р. Сільськогосподарські машини. Київ: Каравела, 2015. 552 с.

73. Войтюк Д.Г., Дубровін В.О., Іщенко Т.Д. Сільськогосподарські та меліоративні машини. Київ: Вища освіта, 2004. 544 с.

74. Волик Б.А., Когут І.М. Полицевий робочий орган для використання на технічному етапі рекультивації техногенно-порушеного ґрунту. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства*. Харків: ХНТУСГ, 2014. Вип. 148. С. 43–48. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vkhdusg_2014_148_9

75. Волик Б.А., Лепеть Є.І., Коновий А.В. Метод гідродинамічних аналогій в системі модельних досліджень ґрунтообробних машин. *Інженерія природокористування*. Харків: ХНТУСГ, 2018. № 2. С. 45–48. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Iprk_2018_2_9

76. Волик Б.А., Теслюк Г.В., Коновий А.В., Лепеть Є.І. Методика прогнозування на проектному етапі якісних показників роботи ґрунтообробного знаряддя. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2021. Вип. 11. Т. 2. <https://doi.org/10.31388/2220-8674-2021-2-4>

77. Волоха М.П. Моделювання механізованих технологічних процесів вирощування і збирання буряків цукрових: дис. ... докт. техн. наук: 05.05.11. Київ: НУБіП України, 2020. 343 с.

78. Вольський В.А. Результати досліджень щодо уточнення процесу різання ґрунту сферичним дисковим робочим органом. *Механізація та електрифікація сільського господарства*. Глеваха: ННЦ «ІМЕСГ», 2019. Вип. 9. С. 30–36. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/mesg_2019_9_5

79. Гавриленко Є.А., Івженко О.В., Пихтєєва І.В. Методика комп'ютерного моделювання динамічних поверхонь. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2019. Вип. 9. Т. 1. URL: <https://doi.org/10.31388/2220-8674-2019-1-65>

80. Гевко Р.Б., Ткаченко І.Г., Павх І.І. Машини сільськогосподарського виробництва Тернопіль: ТДПУ, 2005. 228 с.

81. Гнатушенко В.В. Геометричні моделі формування та попередньої обробки цифрових фотограмметричних зображень високого просторового розрізнення: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.01.01. Київ: КНУБА, 2009. 43 с.

82. Горбатюк Р.М. Обґрунтування конструкційно-технологічних параметрів вібромашини для поверхневого відновлення робочих органів ґрунтообробних агрегатів: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.11. Вінниця: ВНАУ, 2021. 212 с.

83. Гриник І.В., Адамчук В.В., Калетнік Г.М., Булгаков В.М. Стан проектування і виготовлення в Україні сільськогосподарських машин сучасного технічного рівня. *Механізація та електрифікація сільського господарства*. Глеваха: ННЦ «ІМЕСГ», 2014. Вип. 99(1). С. 34–39. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/mesg_2014_99%281%29_5

84. Гринченко О.С., Алфьоров О.І., Савченко В.Б., Юр'єва Г.П. Теоретичний аналіз автоколивань ґрунтообробних органів на пружній підвісці з урахуванням стохастичних факторів. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*. Харків: ХНТУСГ, 2016. № 5. С. 222–226. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/tcalc_2016_5_35

85. Грицишин М.І., Перепелиця Н.М. Екологізація землеробства і проблеми її технічного забезпечення. *Механізація та електрифікація*

сільського господарства. Глеваха: ННЦ «ІМЕСГ», 2019. Вип. 9. С. 175–180.

URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/mesg_2019_9_24

86. Гумен О.М. Моделювання проєктивних n-просторів багатопараметричних технічних систем: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.01.01. Мелітополь: ТДАТУ, 2011. 36 с.

87. Гуцол О.П., Ковбаса В.П. Обґрунтування параметрів і режимів руху ґрунтообробних машин з дисковими робочими органами. Київ: НУБіП України, 2016. 145 с.

88. Денисенко М.І., Рубльов В.І. Підвищення довговічності робочих органів ґрунтообробних машин з використанням точкового зміцнення. *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*. Кропивницький: КНТУ, 2011. Вип. 24(2). С. 28–35. URL: <https://dspace.kntu.kr.ua/items/388cc898-c542-4340-bbbf-a7eb8416b08e/full>

89. Денисенко М.І., Рубльов В.І. Технологічні методи забезпечення довговічності робочих органів і надійності сільськогосподарських машин. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. Кропивницький: КНТУ, 2013. Вип. 43(2). С. 7–17. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Zmntz_2013_43%282%29_4

90. Днесь В.І., Кудринський Р.Б., Крупич С.О., Скібчик В.І. Ефективність застосування різних технологій вирощування сільськогосподарських культур. *Механізація та електрифікація сільського господарства*. Глеваха: ННЦ «ІМЕСГ», 2019. Вип. 9. С. 195–199. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/mesg_2019_9_27

91. Долгодуш М.М. Геометричне моделювання раціонального розбиття посівних площ за заданими вимогами: автореф. дис... канд. техн. наук: 05.01.01. Мелітополь: ТДАУ, 2008. 20 с.

92. Дорошенко Ю.О. Комп'ютерні методи деформативного конструювання геометричних об'єктів на основі політканинних перетворень: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.01.01. Київ: КНУБА, 2002. 38 с.

93. Елісеєв І.П. Геометричне моделювання спряжених кінематичних поверхонь. *Прикладна геометрія та інженерна графіка*. Київ: КНУБА, 2020. Вип. 97. С. 36–43. URL: <https://doi.org/10.32347/0131-579x.2020.97>

94. Жорницький С.П., Мелентьєв О.Б. Стан і перспективні напрями механізації виробництва продукції рослинництва. *Вісник Українського відділення Міжнародної академії аграрної освіти*. Запоріжжя: НВК Інтер-М, 2015. Вип. 3. С. 143–148. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vuvmaao_2015_3_24
95. Зінько Р.В., Шуляк М.Л., Скварок Ю.Ю., Глобчак М.В. Аналіз методик проектування сільськогосподарських машин. *Інженерія природокористування*. Харків: ХНТУСГ, 2021. № 1. С. 75–85. URL: <https://doi.org/10.5281/zenodo.6902711>
96. Ісмаїлова Н.П. Моделювання спряжених квазігвинтових поверхонь на базі параметричного кінематичного гвинта. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2014. № 2. С. 96–102. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Stmkb_2014_2_19
97. Ісмаїлова Н.П. Теоретичні основи геометричного моделювання зачеплень в кінематичних парах: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.01.01. Київ: КНУБА, 2017. 39 с.
98. Ісмаїлова Н.П., Елісєєв І.П. Моделювання спряжених поверхонь за допомогою метода кругового перетворення в системі MATLAB. *Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво*. Луцьк: ЛНТУ, 2019. № 37. С. 66–71. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/kint_2019_37_12
99. Ісмаїлова Н.П., Елісєєв І.П. Моделювання спряжених кінематичних поверхонь за допомогою метода гвинтового перетворення в системі MATLAB. *Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво*. Луцьк: ЛНТУ, 2020. № 38. С. 33–39. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/kint_2020_38_7
100. Ісмаїлова Н.П., Підкоритов А.М. Діаграма гвинта та її застосування до визначення спряжених квазігвинтових поверхонь, що виключають інтерференцію. *Сучасні проблеми моделювання*. Мелітополь: МДПУ, 2015. Вип. 4. С. 52–57. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/cpm_2015_4_13
101. Калетнік Г.М., Пришляк В.М., Яропуд В.М., Булгаков В.М., Пилипака С.Ф. Математичне моделювання руху скиби ґрунту по площині косоного клина. *Вібрації в техніці та технологіях*. Вінниця: ВНАУ, 2013. № 4. С. 27–36. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vvtt_2013_4_6

102. Караєв О.Г., Матковський О.І. Дослідження переміщення ґрунту з саджанцями по робочому органу викопувального плуга. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*. Мелітополь: ТДАУ, 2015. Вип. 5. Т. 2. С. 50–62. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvtdau_2015_5_2_6

103. Караєв О.Г., Матковський О.І., Чижиков І.О., Рубцов Н.О. Проектування поверхонь робочих органів машин, які взаємодіють з ґрунтом. *Сучасні проблеми моделювання*. Мелітополь: МДПУ, 2020. Вип. 19. С. 70–78. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/cpm_2020_19_11

104. Караєв О.Г., Пахаренко В.О., Рубцов М.О. Геометричне моделювання прийняття рішень щодо вибору машин із множини альтернатив. *Сучасні проблеми моделювання*. Мелітополь: МДПУ, 2018. Вип. 12. С. 92–98. URL: <https://doi.org/10.33842/2313-125X-2018-12>

105. Кирилюк В.П. Адаптивна система основного обробітку ґрунту під пшеницю озиму. *Землеробство*. Київ: ЕКМО, 2019. Вип. 2. С. 32–45. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Zemlerobstvo_2019_2_6

106. Кістечок О.Д., Надикто В.Т. Умови стабільності руху заглибленого фронтального плуга. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*. Мелітополь: ТДАУ, 2013. Вип. 3. Т. 1. С. 3–10. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvtdau_2013_3_1_3

107. Кістечок О.Д., Надикто В.Т. Дослідження стійкості руху орного агрегату у горизонтальній площині. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК*. Київ: НУБіП України, 2016. Вип. 254. С. 268–274. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvnau_tech_2016_254_28

108. Кобець А.С., Волик Б.А., Пугач А.М. Ґрунтообробні машини: теорія, конструкція, розрахунок. Дніпропетровськ: Свидлер А.Л., 2011. 140 с.

109. Ковальов Ю.М., Верещага В.М. Прикладна геометрія: нарисна геометрія, інженерна та комп'ютерна графіка, сучасні напрями. Київ: Омега-Л, 2012. 472 с.

110. Козаченко О.А. Альтернативні способи підвищення економічної ефективності аграрного виробництва. Київ: *Вісник аграрної науки*, 2013. № 2. С. 71–74. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vaan_2013_2_18

111. Козаченко О.В. Проблеми та перспективи розвитку технічного сервісу машин АПК. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства*. Харків: ХНТУСГ, 2014. Вип. 145. С. 3–7. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vkhdtusg_2014_145_3

112. Козаченко О.В. Становлення та розвиток наукової школи «Технічна ефективність машин і засобів механізації АПК». *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства*. Харків: ХНТУСГ, 2017. Вип. 181. С. 142–147. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vkhdtusg_2017_181_25

113. Козаченко О.В., Блезнюк О.В. Аналіз режимів руху сільськогосподарського агрегату та напрямки зменшення енерговитрат при виконанні технологічного процесу. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства*. Харків: ХНТУСГ, 2015. Вип. 159. С. 3–11. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vkhdtusg_2015_159_3

114. Козаченко О.В., Блезнюк О.В. Зовнішнє навантаження як чинник впливу на надійність сільськогосподарських машин. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства*. Харків: ХНТУСГ, 2016. Вип. 170. С. 119–123. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vkhdtusg_2016_170_23

115. Козаченко О.В., Блезнюк О.В., Шкрегаль О.М., Дроботенко О.А. До методики випробування та прогнозування технічного стану сільськогосподарської техніки. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства*. Харків: ХНТУСГ, 2014. Вип. 145. С. 168–173. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vkhdtusg_2014_145_28

116. Козаченко О.В., Блезнюк О.В., Шкрегаль О.М., Каденко В.С. До методики визначення ефективності ґрунтообробних робочих органів. *Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія: механізація та автоматизація виробничих процесів*. Суми: СНАУ, 2013. Вип. 10. С. 80–81. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vsna_mekh_2013_10_18

117. Козаченко О.В., Блезнюк О.В., Шкрегаль О.М. Теоретичне обґрунтування раціональної геометричної форми леза лапи культиватора. *Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія: механізація та*

автоматизація виробничих процесів. Суми: СНАУ, 2016. Вип. 10(1). С. 48–52.

URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vsna_mekh_2016_10%281%29_10

118. Козаченко О.В., Каденко В.С., Шкрегаль О.М., Блезнюк О.В. Дослідження процесу зношування леза лапи культиватора із періодичними ділянками локального зміцнення. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*. Харків: ХНТУСГ, 2016. № 6. С. 76–87. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/tcalk_2016_6_11

119. Козаченко О.В., Каденко В.С., Шкрегаль О.М., Блезнюк О.В. Вплив параметрів різальних елементів на інтенсивність зношування лап культиваторів. *Інженерія природокористування*. Харків: ХНТУСГ, 2017. № 1. С. 63–67. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Iprk_2017_1_13

120. Козаченко О.В., Сєдих К.В., Волковський О.М. Фізико-математична модель взаємодії диска з ґрунтом. *Інженерія природокористування*. Харків: ХНТУСГ, 2020. № 2. С. 69–77. URL: [https://doi.org/10.37700/enm.2020.2\(16\).69-77](https://doi.org/10.37700/enm.2020.2(16).69-77)

121. Козаченко О.В., Шкрегаль О.М., Каденко В.С. Математичне моделювання взаємодії леза з ґрунтовим середовищем. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*. Харків: ХНТУСГ, 2014. № 2. С. 86–91. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/tcalk_2014_2_14

122. Козаченко О.В., Шкрегаль О.М., Каденко В.С. Динаміки зношування криволінійного леза оснащеного локальним зміцненням. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства*. Харків: ХНТУСГ, 2015. Вип. 159. С. 159–163. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vkhdtusg_2015_159_26

123. Козаченко О.В., Шкрегаль О.М., Каденко В.С. Зміна форми леза ґрунтообробних знарядь при зношуванні. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. Кропивницький: КНТУ, 2015. Вип. 45(1). С. 21–27. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Zmntz_2015_45%281%29_6

124. Козаченко О.В., Шкрегаль О.М., Каденко В.С., Блезнюк О.В. Дослідження впливу параметрів леза на енергетичні характеристики робочих органів культиваторів. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та*

транспортного комплексів. Харків: ХНТУСГ, 2016. № 4. С. 236–242. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/tcalc_2016_4_30

125. Козаченко О.В., Шкрегаль О.М., Каденко В.С., Блезнюк О.В. Вплив властивостей ґрунтового середовища та режимів руху на формоутворення леза робочого органу. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*. Харків: ХНТУСГ, 2018. № 11. С. 193–198. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/tcalc_2018_11_26

126. Козаченко О.В., Шкрегаль О.М., Каденко В.С., Блезнюк О.В. Вплив способів заточування та зміцнення леза на довговічність ґрунтообробних знарядь *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*. Харків: ХНТУСГ, 2018. № 14. С. 15–24. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/tcalc_2018_14_4

127. Козаченко О.В., Шкрегаль О.М., Каденко В.С., Блезнюк О.В. Польові випробування удосконалених культиваторних лап. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*. Харків: ХНТУСГ, 2019. № 15. С. 31–39. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/tcalc_2019_15_5

128. Козаченко О.В., Шкрегаль О.М., Каденко В.С., Гончаров В.В. Оптимізація параметрів локального зміцнення леза лапи культиватора. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*. Харків: ХНТУСГ, 2017. № 7. С. 149–155. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/tcalc_2017_7_19

129. Козаченко О.В., Шкрегаль О.М., Сівірін О.М. Експлуатаційні випробування культиваторного агрегату з удосконаленими робочими органами. *Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія: механізація та автоматизація виробничих процесів*. Суми: СНАУ, 2013. Вип. 10. С. 95–99. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vsna_mekh_2013_10_22

130. Колбасін В.О., Волик Б.А., Дубовик В.О. Лабораторні дослідження полицевого робочого органу для використання в системі рекультивації ґрунту. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. Кропивницький: КНТУ, 2012. Вип. 42(2). С. 53–58. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Zmntz_2012_42%282%29_11

131. Котельников Д.І. Наукове обґрунтування мінімізованого та нульового обробітку ґрунту за різних систем удобрення в сівозміні на зрошуваних землях півдня України: автореф. дис. ... докт. с.-г. наук: 06.01.02. Херсон: ІЗЗ НААН України, 2021. 44 с.

132. Кошук О.Б., Лузан П.Г., Мося І.А., Герлянд Т.М., Романов Л.А. *Сільськогосподарські і меліоративні машини*. Київ: ІПТО НАПН України, 2015. 291 с.

133. Крюкова І.О., Непочатенко В.О. Стратегія інноваційного розвитку пріоритетних галузей аграрного виробництва. *Економіка: реалії часу*. Одеса: ОНПУ, 2013. № 4. С. 133–141. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/econrch_2013_4_22

134. Кузнецов Ю.М., Луців І.В., Дубиняк С.А. Теорія технічних систем. Тернопіль: ТДТУ, 1998. 310 с.

135. Кузьменко Л.В. Сучасний ринок сільгосптехніки в Україні та перспективи розвитку вітчизняних підприємств сільгоспмашинобудування *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*. Харків: ХНТУСГ, 2018. № 13. С. 200–211. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/tcalc_2018_13_29

136. Кузьо І.В., Зінько Р.В. Використання морфологічного середовища для синтезу конструкцій машин. *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»*. Серія: машинобудування. Київ: НТУУ «КПІ», 2014. № 3. С. 90–96. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/VKPI_mash_2014_3_14

137. Кухарець С.М. Обґрунтування процесу роботи та параметрів ротаційно-лопатевого робочого органу ґрунтообробного знаряддя: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.05.11. Глеваха: ДАУ, 2004. 197 с.

138. Левчук О.В., Здобицький А.Я. Відновлення робочих органів ґрунтообробних знарядь електродуговим навуглецьовуванням *Інженерія природокористування*. Харків: ХНТУСГ, 2017. № 2. С. 69–73. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Iprk_2017_2_14

139. Лещенко С.М., Сало В.М. Технічне забезпечення збереження родючості ґрунтів в системі ресурсозберігаючих технологій. *Конструювання,*

виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. Кропивницький: КНТУ, 2013. Вип. 43(1). С. 96–102. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Zmntz_2013_43%281%29_14

140. Лещенко С.М., Сало В.М. Обґрунтування доцільності проведення глибокого чизельного рихлення на переущільнених та ерозійно-небезпечних ґрунтах. *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*. Кропивницький: КНТУ, 2015. Вип. 28. С. 181–186. URL: <https://dspace.kntu.kr.ua/items/fe00296a-abc7-4700-b394-aff566712b61/full>

141. Лещенко С.М., Сало В.М., Васильковський О.М., Петренко Д.І. Адаптація операцій чизельного обробітку до складних ґрунтово-кліматичних умов центральної України. *Вісник Українського відділення Міжнародної академії аграрної освіти*. Запоріжжя: НБК Інтер-М, 2015. Вип. 3. С. 98–105. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vuvmaao_2015_3_17

142. Лещенко С.М., Сало В.М., Петренко Д.І. Експериментальна оцінка якості роботи комбінованого чизеля з додатковими горизонтальними та вертикальними деформаторами. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства*. Харків: ХНТУСГ, 2015. Вип. 156. С. 25–34. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vkhdtusg_2015_156_6

143. Лещенко С.М., Сало В.М., Петренко Д.І., Лісовий І.О. Вплив конструктивних параметрів чизельної лапи глибокорозпушувача на деформацію ґрунту. *Вісник Українського відділення Міжнародної академії аграрної освіти*. Запоріжжя: НБК Інтер-М, 2016. Вип. 4. С. 115–124. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vuvmaao_2016_4_13

144. Лисогор В.М., Єленіч М.П., Яропуд В.М., Зегер М.С. Логіко-динамічні дворівневі структури та матричні моделі зв'язків вібраційних вузлів сільськогосподарських машин. *Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. Серія: технічні науки*. Вінниця: ВНАУ, 2013. Вип. 12. С. 81–87. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/znpvnutn_2013_12_12

145. Литвинюк Л.К., Говоров О.Ф., Адамчук В.В., Корнюшин В.М. Техніко-технологічні передумови для покращення родючості ґрунту. *Механізація та електрифікація сільського господарства*. Глеваха: ННЦ «ІМЕСГ», 2020. Вип. 11. С. 33–40. URL: <https://doi.org/10.37204/0131-2189-2020-11-3>

146. Лісовий І.О., Бойко А.І., М.О. Свірень, Пушка О.С. Пряма сівба та обґрунтування параметрів сошника. *Вісник Українського відділення Міжнародної академії аграрної освіти*. Запоріжжя: НВК Інтер-М, 2015. Вип. 3. С. 177–190. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vuvmaao_2015_3_29

147. Лузан С.О., Петренко Д.М., Михеев Ю.Р. Аналіз умов роботи та методів підвищення зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин (огляд) / *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*. Харків: ХНТУСГ, 2018. № 14. С. 79–88. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/tcalk_2018_14_13

148. Люлька О.М., Нікольський М.Л., Фабричнікова І.А. Аналітичне визначенню геометричних параметрів робочої частини ножа кенігсфельдського типу. *Інженерія природокористування*. Харків: ХНТУСГ, 2019. № 1. С. 89–96. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Iprk_2019_1_13

149. Маланчук О.В. Обґрунтування параметрів технологічних систем відновлення робочих органів ґрунтообробних машин: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.11. Львів: ЛНАУ, 2016. 239 с.

150. Манько Ю.П., Танчик С.П., Примак І.Д. Зміст сучасних систем землеробства в Україні та пропозиції щодо їх класифікації. *Вісник аграрної науки*. Київ: Аграрна наука, 2015. № 12. С. 17–21. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vaan_2015_12_6

151. Мартинов В.Л. Моделювання оптимальних геометричних параметрів енергоефективних будівель гранної форми: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.01.01. Київ: КНУБА, 2015. 39 с.

152. Махорін Я.Г., Підкоритов А.М., Юрчук В.П. Аналітичне моделювання спряжених кінематичних поверхонь робочих органів сільськогосподарських машин. *Сучасні проблеми моделювання*. Мелітополь: МДПУ, 2014. Вип. 2. С. 63–68. URL: <https://magazine.mdpu.org.ua/index.php/spm/article/view/1216>

153. Михайленко В.Е., Найдиш В.М. Тлумачення термінів з прикладної геометрії, інженерної та комп'ютерної графіки. Київ: Урожай, 1998. 200 с.

154. Михайлов Є.В., Волик Б.А., Теслиук Г.В., Коновий А.В. Методика обґрунтування конструктивної схеми стрілчастої лапи на основі біологічного

прототипу. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. Технічні науки*. Мелітополь: ТДАТУ 2019. Вип. 19. Т. 3. С. 37–45. URL: <https://oj.tsatu.edu.ua/index.php/pratsi/article/view/239>

155. Мироненко В.Г. Інформаційні технології як основа створення «розумних» сільськогосподарських машин. *Механізація та електрифікація сільського господарства*. Глеваха: ННЦ «ІМЕСГ», 2019. Вип. 9. С. 171–174. URL: <https://doi.org/10.37204/0131-2189-2019-9-21>

156. Мироненко В.Г., Антипчук Б.О. Оперативний моніторинг фізичного стану ґрунту в процесі його розуцільнення. *Механізація та електрифікація сільського господарства*. Глеваха: ННЦ «ІМЕСГ», 2020. Вип. 11. С. 27–32. URL: <https://doi.org/10.37204/0131-2189-2020-11-2>

157. Надикто В. Т. Механіко-технологічні аспекти оранки. *Вісник аграрної науки*. Київ: Аграрна наука, 2012. № 4. С. 56–60. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vaan_2012_4_12

158. Надикто В.Т. Щодо доцільності використання оборотного плуга. *Вісник аграрної науки*. Київ: Аграрна наука, 2014. № 10. С. 51–54. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vaan_2014_10_11

159. Надикто В.Т. Наукові основи агрегування сільськогосподарських машин. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства*. Харків: ХНТУСГ, 2015. Вип. 163. С. 186–194. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vkhdtusg_2015_163_31

160. Надикто В.Т. Агрегування як розділ землеробської механіки. *Техніка і технології АПК*. 2015. №4. С. 11–14. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Titapk_2015_4_6

161. Надикто В.Т. Науково-практичні аспекти оранки. *Техніка і технології АПК*. 2017. № 5. С. 10–15. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Titapk_2017_5_5

162. Надикто В., Величко О. Означення точки оптимуму кривої та спосіб її визначення. *Техніка і технології АПК*. 2014. № 2. С. 16–18. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Titapk_2014_2_6

163. Надикто В.Т., Кістечок О.Д. Теоретичне та експериментальне дослідження показників роботи орного агрегату, працюючого за схемою «push-

pull». *Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія: Механізація та автоматизація виробничих процесів*. Суми: СНАУ, 2016. Вип. 10(1). С. 43–47. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vsna_mekh_2016_10%281%29_9

164. Надикто В.Т., Тиховод М.А. Експлуатаційно-технологічна оцінка роботи агрегату для обробітку парів. *Machinery & Energetics*. Київ: НУБіП України, 2021. Vol. 12, № 3. С. 93–99. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/machener_2021_12_3_14

165. Найдиш В.М. Основні поняття теорії дискретного геометричного моделювання. *Праці Таврійської державної агротехнологічної академії. Прикладна геометрія та інженерна графіка*. Мелітополь: ТДАТА, 2001. Вип. 4. Т. 13. С. 3–11.

166. Найдиш В.М., Верещага В.М., Найдиш А.В., Малкіна В.М. Основи прикладної дискретної геометрії. Мелітополь: Люкс, 2007. 193 с.

167. Налобіна О.О. Випробування, сертифікація і стандартизація машин. Рівне: НУВГП, 2018. 259 с.

168. Нанка О.В., Сиромятников Ю.М. Результати польових випробувань експериментальної ґрунтообробної установки. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства*. Харків: ХНТУСГ, 2019. Вип. 201. С. 191–201. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vkhdtusg_2019_201_24

169. Насонов В.А., Литвинюк Л.К., Гриценко О.П. Розроблення та дослідження механізму для підвищення якості обробітку ґрунту дисковими знаряддями. *Механізація та електрифікація сільського господарства*. Глеваха: ННЦ «ІМЕСГ», 2020. Вип. 11. С. 41–47. URL: <https://doi.org/10.37204/0131-2189-2020-11-4>

170. Непочатенко В.В., Мелентьев О.Б. Перспективні розробки адаптивних робочих органів фрезерних культиваторів. *Вісник Українського відділення Міжнародної академії аграрної освіти*. Запоріжжя: НВК Інтер-М, 2016. Вип. 4. С. 147–161. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vuvmaao_2016_4_17

171. Непочатенко В.В., Мелентьев О.Б. Обґрунтування геометричних параметрів плоскоріжучого робочого органу під час виконання технологічної операції оранки на перезволожених ґрунтах. *Вісник Українського відділення*

Міжнародної академії аграрної освіти. Запоріжжя: НВК Інтер-М, 2016. Вип. 4. С. 161–171. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vuvmaao_2016_4_18

172. Несвідомін В.М. Комп'ютерні моделі синтетичної геометрії: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.01.01. Київ: КНУБА, 2008. 41 с.

173. Ніцин О.Ю. Геометрія психофізичного простору та перспектива: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.01.01. Київ: КНУБА, 2007. 34 с.

174. Павлов А.В., Ванін В.В., Ковальов Ю.М. Оптимізація як самоорганізація: проблеми геометричного моделювання. *Прикладна геометрія та інженерна графіка*. Київ: КДТУБА, 1999. Вип. 65. С. 8–12.

175. Пальчевський Б.О. Дослідження технологічних систем (моделювання, проектування, оптимізація). Львів: Світ, 2001. 232 с.

176. Пастухов В.І., Беловол С.А. Дослідження переміщення подрібненого ґрунту у вертикальній площині під дією ротаційних ґрунтообробних машин. *Інженерія природокористування*. Харків: ХНТУСГ, 2014. № 2. С. 80–83. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Iprk_2014_2_16

177. Пастухов В.І., Беловол С.А. Енергетичний аналіз роботи ротаційного органу культиватора міжрядного обробітку ґрунту. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства*. Харків: ХНТУСГ, 2015. Вип. 156. С. 126–133. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vkhdtusg_2015_156_21

178. Пастухов В.І., Беловол С.А. Дослідження деформації ґрунту під дією ротаційного робочого органу. *Вісник Українського відділення Міжнародної академії аграрної освіти*. Запоріжжя: НВК Інтер-М, 2015. Вип. 3. С. 23–30. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vuvmaao_2015_3_5

179. Пастухов В.І., Скофенко С.М., Зиков В.В. Дослідження нестійкого руху ґрунтообробних механічних систем на фізичних моделях. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства*. Харків: ХНТУСГ, 2015. Вип. 156. С. 134–137. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vkhdtusg_2015_156_22

180. Пастухов В.І., Скофенко С.М., Крохмаль Д.В. Обзор конструкцій підвісок сошників. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства*. Харків: ХНТУСГ, 2017. Вип. 180. С. 44–48. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vkhdtusg_2017_180_9

181. Пастухов В.І., Скофенко С.М., Міленін А.М., Обущенко Ю.О. Дослідження стійкості руху механічних систем на структурних моделях. *Інженерія природокористування*. Харків: ХНТУСГ, 2016. № 2. С. 63–67. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Iprk_2016_2_13

182. Пастухов В.І., Скофенко С.М., Фесенко Г.В., Міленін А.М. Дослідження кутових переміщень рами ґрунтообробної машини під час виконання технологічної операції. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства*. Харків: ХНТУСГ, 2014. Вип. 148. С. 69–77. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vkhdtusg_2014_148_13

183. Пастушенко С.І., Клендій М.Б., Клендій В.М., Троханяк О.М. Дослідження якісних показників роботи борони з гвинтовими робочими органами. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2021. Вип. 11. Т. 1. SBTSATU.11.1.2 URL: <https://oj.tsatu.edu.ua/index.php/visnik/issue/archive>

184. Пастушенко С.І., Клендій М.Б., Клендій М.І. Дослідження тягового опору експериментального варіанту борони з гвинтовими робочими органами. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2020. Вип. 10. Т. 2. SBTSATU.10.2.2 URL: <https://doi.org/10.31388/2220-8674-2020-2-2>

185. Пащенко В.Ф., Нанка О.В., Сиромятников Ю.М. Конструкція ножа ротора розрихлювально-сепаруючого пристрою ґрунтообробної машини. *Інженерія природокористування*. Харків: ХНТУСГ, 2019. № 1. С. 56–67. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Iprk_2019_1_9

186. Пащенко В.Ф., Сиромятников Ю.М., Храмов М.С. Ґрунтообробна установка з використанням гнучкого робочого органу для контролю росту бур'янів. *Овочівництво і багтанництво*. Київ: НААН ІОіБ, 2018. Вип. 64. С. 33–43. URL: <https://doi.org/10.32717/0131-0062-2018-64-33-43>

187. Пащенко В.Ф., Сиромятников Ю.М., Храмов М.С. Якісні показники роботи ґрунтообробної установки при вирощуванні цукрових буряків. *Овочівництво і багтанництво*. Київ: НААН ІОіБ, 2019. Вип. 65. С. 39–49. URL: <https://doi.org/10.32717/0131-0062-2019-65-39-49>

188. Пилипака С.Ф. Конструювання поверхонь та їх неперервне згинання в кінцеві форми на основі управління натуральними параметрами: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.01.01. Київ: КНУБА, 2000. 35 с.

189. Пилипака С.Ф., Кресан Т.А., Кремець Я.С. Кінематичний гвинт тригранника Френе. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2018. Вип. 8. Т. 2. SBTSATU.8.2.47 URL: <https://oj.tsatu.edu.ua/index.php/visnik/article/view/49>

190. Пилипака С.Ф., Кресан Т.А., Федорина Т.П., Хропост В.І. Врахування товщини листового матеріалу при виготовленні конічного диска згинанням плоского кільця. *Інженерія природокористування*. Харків: ХНТУСГ, 2020. № 2. С. 78–83. URL: [https://doi.org/10.37700/enm.2020.2\(16\).78-83](https://doi.org/10.37700/enm.2020.2(16).78-83)

191. Підгорний О.Л., Плоский В.О. Розширення можливостей формоутворення структурних конструкцій. *Сучасні проблеми моделювання*. Мелітополь: МДПУ, 2014. Вип. 1. С. 117–122. URL: <https://magazine.mdpu.org.ua/index.php/spm/article/view/1197>

192. Плоский В.О. Дослідження структурних особливостей методів геометричного моделювання та тенденцій розвитку прикладної геометрії: дис. ... докт. техн. наук: 05.01.01. Київ: КНУБА, 2007. 277 с.

193. Плоский В.О. Принципи визначення загальносистемних властивостей методів геометричного моделювання. *Прикладна геометрія та інженерна графіка*. Київ: КНУБА, 2008. Вип. 79. С. 62–67.

194. Плоский В.О. Функціональність графіки як методологічна основа графічних технологій. *Прикладна геометрія та інженерна графіка*. Київ: КНУБА, 2016. Вип. 92. С. 93–99.

195. Поляков А.М., Волох В.О., Фесенко Г.В., Жмуренко М.А. Підвищення якісних показників поверхневого обробітку ґрунту культиватором із стрілочастими лапами. *Інженерія природокористування*. Харків: ХНТУСГ, 2021. № 1. С. 27–30. URL: <https://doi.org/10.5281/zenodo.6829148>

196. Пустюльга С.І. Дискретне визначення геометричних об'єктів числовими послідовностями: дис. ... докт. техн. наук: 05.01.01. Київ: КНУБА, 2006. 322 с.

197. Равська Н.С., Родін П.Р., Ніколаєнко Т.П., Мельничук П.П. Основи формоутворення поверхонь при механічній обробці. Житомир: ЖІТІ, 2000. 163 с.

198. Радзевич С.П. Формоутворення поверхонь деталей (основи теорії). Київ: Растан, 2001. 592 с.
199. Риндяєв В.І. Аналіз діючих навантажень в машинах для обробки ґрунту. *Інженерія природокористування*. Харків: ХНТУСГ, 2021. № 1. С. 86–89. URL: <https://doi.org/10.5281/zenodo.6902834>
200. Роговський І.Л. Розробка комплексних техніко-технологічних заходів підвищення працездатності сільськогосподарських машин: дис. ... докт. техн. наук: 05.05.11. Київ: НУБіП України, 2020. 584 с.
201. Ролдугін М.І., Пономаренко Н.О., Яропуд В.М., Сидоренко Р.М. Стан і перспективи розвитку комбінованих агрегатів. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. Вінниця: ВНАУ, 2017. № 3. С. 40–43. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/tetapk_2017_3_9
202. Росоха С.В. Комп'ютерно-геометричні моделі роторно-планетарних трохойдних гідромашин: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.01.01. Мелітополь: ТДАТУ, 2009. 39 с.
203. Садковий В.П., Комяк В.М., Соболь О.М. Раціональне розбиття множин при територіальному плануванні у сфері цивільного захисту. Харків: УЦЗУ, 2008. 174 с.
204. Сало В.М., Лещенко С.М., Пашинський В.А., Ярових Р.В. Аналіз процесів чизелювання ґрунтів з застосуванням різних комбінацій робочих органів. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. Кропивницький: КНТУ, 2015. Вип. 45(1). С. 126–132. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Zmntz_2015_45%281%29_20
205. Семенюта А.М., Волик Б.А., Дубовик В.О. Результати польових випробувань дискового плуга, адаптованого для роботи в умовах півдня України. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. Кропивницький: КНТУ, 2013. Вип. 43(1). С. 335–340. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Zmntz_2013_43%281%29_52
206. Семків О.М. Графічні комп'ютерні технології дослідження маятникових механічних систем: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.01.01. Київ: КНУБА, 2016. 42 с.

207. Сергейчук О.В. Геометричне моделювання фізичних процесів при оптимізації форми енергоефективних будинків: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.01.01. Київ: КНУБА, 2008. 39 с.

208. Сєдих К.В. Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів дискатора з пружними стійками: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.11. Харків: : ХНТУСГ, 2021. 248 с.

209. Сидоренко Ю.В., Залевська О.В. Система деформаційного моделювання на основі кривих Безье. *Сучасні проблеми моделювання*. Мелітополь: МДПУ, 2020. Вип. 20. С. 176–183. URL: <https://doi.org/10.33842/2313-125X-2020-19>

210. Сиромятников Ю.М. Вдосконалення робочих органів для підрізання та підйому ґрунту розрихлювально-сепаруючою машиною. *Інженерія природокористування*. Харків: ХНТУСГ, 2017. № 2. С. 74–77. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Iprk_2017_2_15

211. Сиротинський О.А., Форсюк С.Л. Проектування лемішно-полицевої поверхні корпусу плуга. Розміщення робочих органів на рамі плуга. Рівне: НУВГП, 2019. 29 с.

212. Сірий І.О. Передумови основного обробітку ґрунту шляхом створення деформацій розтягування-вигину і зсуву. *Вісник Українського відділення Міжнародної академії аграрної освіти*. Запоріжжя: НВК Інтер-М, 2016. Вип. 4. С. 171–181. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vuvmaao_2016_4_19

213. Сірий І.О. Обґрунтування ефективного типу деформацій при здійсненні обробки ґрунту в умовах степової зони України. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*. Мелітополь: ТДАУ, 2016. Вип. 6. Т. 3. С. 190–195. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvtdau_2016_6_3_21

214. Сірий І.О., Борохов І.В., Ковальов О.О. Використання методів планування багатофакторного експерименту для дослідження культиватора-плоскоріза з розпушувачами. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*. Мелітополь: ТДАУ, 2018. Вип. 8. Т. 2. URL: <https://oj.tsatu.edu.ua/index.php/visnik/article/view/6>

215. Скрипник В.І. Розробка, виробництво, конструктивні особливості нової сільськогосподарської техніки. Київ: Літера ЛТД, 2019. 256 с.

216. Сокол С.П. Геометрична модель робочої поверхні копача коренеплодів. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства*. Харків: ХНТУСГ, 2015. Вип. 159. С. 176–180. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vkhdusg_2015_159_28

217. Сокол С.П., Кобець А.С., Науменко М.М. Визначення геометричних розмірів робочого органу типу «СКОБА» для викопування коренеплодів. *Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. Серія: технічні науки*. Вінниця: ВНАУ, 2012. Вип. 11(2). С. 270–275. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/znpvnutn_2012_11%282%29_45

218. Субочев О.И., Деркач О.Д., Каракай А.О. Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів просапного культиватора у складі машино-тракторного агрегату. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2020. Вип. 10. Т. 2. SBTSATU.10.2.8 URL: <https://doi.org/10.31388/2220-8674-2020-2-8>

219. Танчик С.П., Манько Ю.П., Бабенко А.І. Зміст сучасних систем землеробства та їх класифікація. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: агрономія*. Київ: НУБіП України, 2012. Вип. 176. С. 130–138. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvnau_agr_2012_176_24

220. Танчик С.П., Миколенко Я. Вплив нульового та традиційного обробітків ґрунту на його біологічну активність. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: агрономія*. Київ: НУБіП України, 2016. Вип. 235. С. 121–128. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvnau_agr_2016_235_16

221. Танчик С.П., Павлов О.С. Відтворення родючості ґрунту за різних систем землеробства. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: агрономія*. Київ: НУБіП України, 2013. Вип. 183(2). С. 135–143. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvnau_agr_2013_183%282%29_26

222. Теслюк Г.В., Волик Б.А., Брижаний І.Ю. Вплив конструктивних і кінематичних параметрів дискового плуга на величину тягового опору і якість розпушення ґрунту. *Вісник Українського відділення Міжнародної академії аграрної освіти*. Запоріжжя: НВК Інтер-М, 2015. Вип. 3. С. 116–123. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vuvmaao_2015_3_20

223. Теслюк Г., Волик Б., Кобець О.М., Пугач А. Моделювання технологічних процесів ґрунтообробних машин. *Вісник Дніпропетровського державного аграрно-економічного університету*. Дніпро: ДДАУ, 2017. № 2. С. 93–97. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vddau_2017_2_18

224. Теслюк Г., Волик Б., Лісунов П., Лепеть Є. Результати польових досліджень дискового плуга в умовах півдня України. *Техніка і технології АПК*. 2014. № 6. С. 22–26. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Titapk_2014_6_7

225. Теслюк Г.В., Волик Б.А., Майстришин Р.М. Удосконалення технологічних процесів і технічних засобів обробітку ґрунту в системі органічного землеробства. *Інженерія природокористування*. Харків: ХНТУСГ, 2016. № 1. С. 48–52. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Iprk_2016_1_9

226. Теслюк Г.В., Волик Б.А., Пугач А.М. Методика аналітичної оцінки якості розпушення ґрунту комбінованим агрегатом. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК*. Київ: НУБіП України, 2015. Вип. 226. С. 260–264. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvnau_tech_2015_226_31

227. Теслюк Г.В., Волик Б.А., Семенюта А.М. Вплив різних варіантів постановки корпусів дискового плуга на структурно-агрегатний склад ґрунту. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. Кропивницький: КНТУ, 2011. Вип. 41(1). С. 326–330. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Zmntz_2011_41%281%29_52

228. Теслюк Г.В., Волик Б.А., Сокол С.П., Кобець О.М., Семенюта А.М. Ґрунтообробні агрегати на основі дискових робочих органів. Дніпропетровськ: ДДАЕУ, 2016. 144 с.

229. Тиховод М.А., Надикто В.Т. Перевірка математичної моделі плоско-паралельного руху боронувальної секції у поздовжньо-вертикальній площині на

адекватність. *Інженерія природокористування*. Харків: ХНТУСГ, 2021. № 2. С. 32–37. URL: <https://doi.org/10.5281/zenodo.7048978>

230. Ткачевський Я.І. Структурне моделювання складних геометричних об'єктів у літакобудуванні: дис. ... канд. техн. наук: 05.01.01. Київ: НТУУ «КПІ», 2007. 175 с.

231. Тулученко Г.Я., Старун Н.В., Безердян С.І. Удосконалення геометричного алгоритму побудови гармонічних базисів для трикутних скінченних елементів. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. Херсон: ХНТУ, 2015. Вип. 3 (54). С. 621–624. URL: https://journals.kntu.kherson.ua/index.php/visnyk_kntu/issue/view/33/33

232. Устенко С.А. Геометрична теорія моделювання криволінійних форм лопаткових апаратів турбомашин з оптимізацією їх параметрів: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.01.01. Київ: КНУБА, 2013. 38 с.

233. Устенко С.А., Агарков О.Ю. Геометричне моделювання просторових кривих із застосуванням формул Серре-Френе. *Прикладна геометрія та інженерна графіка*. Київ: КНУБА, 2012. Вип. 90. С. 358–362. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/prgeoig_2012_90_66

234. Фесенко Г.В., Жмуренко М.А. Аналіз технологічних властивостей робочих органів культиватора передпосівного поверхневого обробітку ґрунту і удосконалення стрілкової лапи. *Інженерія природокористування*. Харків: ХНТУСГ, 2020. № 1. С. 89–94. URL: [https://doi.org/10.37700/enm.2020.1\(15\).89-94](https://doi.org/10.37700/enm.2020.1(15).89-94)

235. Хименко І.Ю. Геометричне моделювання рельєфу поля для системи точного землеробства: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.01.01. Київ: КНУБА, 2005. 20 с.

236. Чайка Т.О. Роль мінімального обробітку ґрунту в органічному землеробстві. *Інженерія природокористування*. Харків: ХНТУСГ, 2018. № 2. С. 37–44. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Iprk_2018_2_8

237. Чайка Т.О., Яснолоб І.О., Лотиш І.І. Оцінка ресурсо- й енергозбереження в сучасних системах землеробства. *Землеробство*. Київ: ЕКМО, 2019. Вип. 1. С. 47–55. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Zemlerobstvo_2019_1_10

238. Черніков О.В. Геометричне та комп'ютерне моделювання динаміки процесів зміни об'єктів під впливом заданих чинників (на прикладі фільтрування): автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.01.01. Київ: КНУБА, 2008. 37 с.

239. Шепель В.П. Узагальнення синтезу моделей конструкторсько-технологічних обводів методами аналізу їх інваріантних складових: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.01.01. Київ: КНУБА, 2004. 36 с.

240. Шоман О.В. Геометричне моделювання узагальнених паралельних множин: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.01.01. Київ: КНУБА, 2007. 37 с.

241. Шоман О.В. Паралельні множини в геометричному моделюванні явищ і процесів. Харків: НТУ «ХПІ», 2007. 288 с.

242. Юрчук В.П. Спряжені поверхні в геометричних моделях формотворення робочих органів коренезбиральних машин: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.01.01. Київ: КНУБА, 2002. 37 с.

243. 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.

244. 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>

245. 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)

246. Яблонський П.М. Інтегроване комплексне геометричне моделювання технічних об'єктів. *Збірник тез доповідей XIV міжнародної науково-практичної конференції «Обухівські читання»*. Київ: НУБіП України, 2019 р. С. 52–54. URL: https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u132/obuhovski_chitannya_2019_tezi_0.pdf

247. 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>

248. 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>

249. 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>

250. 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

251. 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>

252. 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>

253. 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>

254. 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>

255. 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

256. 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_vidkrytyy_proektom_2020.pdf

257. 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. 15. URL: http://eprints.library.odku.edu.ua/id/eprint/6987/1/VelykodniySS_Upravlinnja_vidkrytyy_proektom_2020.pdf

258. 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>

259. 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>

260. Яблонський П.М., Ванін В.В., Вірченко Г.А., Волоха М.П., Воробйов О.М. Вплив геометричних параметрів стрілкової 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>

261. 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

262. 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.

263. 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>

264. 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/>

265. Яблонський П.М., Ванін В.В., Вірченко Г.А., Лазарчук-Воробйова Ю.В., Воробйов О.М. Модульно-геометричний підхід в автоматизованому проектуванні виробів машинобудування. *Прикладна геометрія та інженерна графіка*. Київ: КНУБА, 2023. Вип. 105. С. 16–22. URL: <http://ageg.knuba.edu.ua/article/view/297600>

266. 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>

267. Яблонський П.М., Ванін В.В., Вірченко Г.А., Юрчук В.П. Інтегрований комплексний підхід до геометричного моделювання дискових робочих органів ґрунтообробних знарядь. *Сучасні проблеми моделювання*. Мелітополь: МДПУ, 2020. Вип. 18. С. 52–60. URL: <https://doi.org/10.33842/22195203/20210/18/52/60>

268. 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/Збірник_2022.pdf

269. 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>

270. 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>

271. 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

272. 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

273. 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

274. 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>

275. 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

276. 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>

277. 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: УкрНДІПВТ 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)

278. 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 р. С. 10. URL: <http://magazine.mdpu.org.ua/index.php/spm/issue/view/121/26>

279. 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: ДІЯ, 2013 р. С. 41–42. URL: https://geometry.kpi.ua/files/IIconference_geometry_FMF.pdf

280. 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: ДІЯ, 2014 р. С. 68–70. URL: https://geometry.kpi.ua/files/IIIconference_geometry_FMF.pdf

281. Яблонський П.М., Григорович О.О., Юрчук В.П., Мазуренко П.Т., Огороднік Б.М. Геометричне конструювання пірамідальної робочої поверхні зубів землерийних машин. *Тези доповідей I конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Прикладна геометрія, дизайн та інноваційна діяльність»*. Київ: НТУУ "КПІ", 2012. С. 20–22.

282. Яблонський П.М., Гумен О.М. Геометричне моделювання робочого органу ґрунтообробної фрези. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. Прикладна геометрія та інженерна графіка*. Мелітополь: ТДАТУ, 2012. Вип. 4. Т. 54. С. 43–47.

283. 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: ДІЯ, 2016. С. 79–83. URL: https://ng-kg.kpi.ua/files/Sbornik_2016.pdf

284. Яблонський П.М., Жищинський В.П., Ковалюк Т.В. Графо-аналітичне моделювання поверхні зуба землерийної 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

285. 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/>

286. 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.

287. 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>

288. 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

289. 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. 368 с.

290. Яблонський П.М., Фришев С.Г., Лукач В.С., Василюк В.І. 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>

291. 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/ukr/content/download/82020/475556/file/ВІСНИК_№3\(62\)_Том_2.pdf](https://kntu.net.ua/ukr/content/download/82020/475556/file/ВІСНИК_№3(62)_Том_2.pdf)

292. 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

293. Яблонський П.М., Юрчук В.П., Вознюк Т.А., Святина М.А., Ізволєнська 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>

294. 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.

295. 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-runtoobrobniij-disk.html>

296. 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-diskoviji-kopach.html>

297. 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, сл. вар..pdf](https://ng-kg.kpi.ua/files/Збірник%202018,%20сл.%20вар..pdf)

298. Яропуд В.М., Волик Б.А. Обґрунтування конструкції голчастого диска ротаційної борони аналізом будови тіла біологічного аналогу. *Вібрації в техніці та технологіях*. Вінниця: ВНАУ, 2019. № 4. С. 56–64. URL: <https://doi.org/10.37128/2306-8744-2019-4-7>

299. Ятчук В.Я. Вплив основного обробітку сірого лісового ґрунту на його родючість та продуктивність культур сівозміни в лісостепу України: автореф. дис. ... канд. с.-г. наук: 06.01.01. Чабани: ІЗУААН, 2010. 21 с. URL: <http://www.irbis-nbuv.gov.ua/aref/20100525000164>

300. Aday S.H., Al-Muthafar Y.W. Comparison between the performance of a movable boards ditch opener and conventional ditch opener in cultivated and uncultivated soils. Part 2: The disturbed area. *University of Thi-Qar Journal of agricultural research*, 2020. Vol. 9. Issue 1. P. 108–117. URL: <https://doi.org/10.54174/UTJagr.Vo10.N1/12>

301. Agarwal A. Vector & 3D Geometry. Meerut: Arihant, 2018. 282 p.

302. Agnew R. Analytic Geometry and Calculus, with Vectors. San Francisco: cGraw-Hill Book Company, 2010. 738 p.

303. Agriculture and Mechanical Engineering. *International Symposium*. Bucharest, 2016. 829 p.

304. Alwan A.A. A field study of soil pulverization energy by using different moldboards types under various operating condition. *Basrah Journal of Agricultural Sciences*, 2019. Vol. 32. Issue 2. P. 373–388. URL: <https://doi.org/10.37077/25200860.2019.284>

305. AutoCAD 2018. User's Guide. Autodesk, 2018. 846 p.
306. Badayev Yu. I., Lagodina L.P. Interpolation by rational surfaces of Bezier and NURBS-surfaces. *Modern modelling problems*. Melitopol: MSPU, 2020. Issue 19. P. 11–16. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/cpm_2020_19_4
307. Bethune J. Engineering Design and Graphics with SolidWorks 2016. New York: Pearson, 2017. 829 p.
308. Berg M., Kreveld M., Overmars M., Schwarzkopf O. Computational Geometry: algorithms and applications. Berlin: Springer, 2010. 367 p.
309. Bird J. Higher Engineering Mathematics. New York Elsevier, 2020. 686 p.
310. Catia Version 6 Release 18. Assembly Design User's Guide. Dassault Systemes, 2018.
311. Catia Version 6 Release 18. Part Design User's Guide. Dassault Systemes, 2018.
312. Catia Version 6 Release 18. Wireframe and Surface User's Guide. Dassault Systemes, 2018.
313. Char B.W. Maple 8 Learning Guide. Waterloo Maple Inc., 2012. 310 p.
314. Dasgupta S., Papadimitriou C., Vazirani U. Algorithms. London: McGraw-Hill Education 2016. 318 p.
315. Dedousis A., Bartzanas T. Soil Engineering. *Soil Biology*. London: Springer, 2010. Vol. 20. 230 p.
316. Enovia Version 6 Release 18. Engineering Life Cycle User's Guide. Dassault Systemes, 2018.
317. Enovia Version 6 Release 18. Product Variant Management User's Guide. Dassault Systemes, 2018.
318. Feng B., Zhan C., Liu Z., Cheng X., Chang H. Application of basis functions for hull form surface modification. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2021. Vol. 9. Issue 9, 1005. URL: <https://doi.org/10.3390/jmse9091005>
319. Field H., Long J. Introduction to Agricultural Engineering Technology. A Problem Solving Approach. Switzerland: Springer, 2018. 456 p.
320. Foth H. Fundamentals of Soil Science. New York: John Wiley & Sons, 2010. 382 p.

321. Garcia D. R. Geometric manipulation of NURBS surfaces for computational meshes: doctoral thesis. Madrid: Polytechnic University, 2018. 165 p.
322. Gersting J. Mathematical Structures for Computer Science: Discrete Mathematics and Its Applications. New York: W. H. Freeman and Company, 2014. 969 p.
323. Gheorghe G., Lates D., Oprea C., Baltatu C. Structural and modal analysis in Solidworks of agricultural plow to choose vibration system at moldboard. *Engineering for Rural Development*, 2023. Vol. 22. P. 872–878. URL: <https://doi.org/10.22616/ERDev.2023.22.TF168>
324. Govindasamy K. Engineering Mechanics and Drawings. Chennai: Tamilnadu Textbook Corporation, 2010. 154 p.
325. Haggard G., Schlipf J., Whitesides S. Discrete Mathematics for Computer Science. Belmont: Thomson Brooks/Cole, 2016. 603 p.
326. Hamid A.A., Alsabbagh A.R. Effect of moldboard types, two depths of tillage and two speeds of tractor in some physical properties and pulverization of soil. *Kufa Journal For Agricultural Sciences*, 2023. Vol. 15. Issue 1. P. 105–116. URL: <https://doi.org/10.36077/kjas/2023/v15i1.10334>
327. Kazemzadeh-Parsi M., Pasquale A., Lorenzo D., Champaney V., Ammar A., Chinesta, F. NURBS-based shape parametrization enabling PGD-based space separability: Methodology and application. *Finite Elements in Analysis & Design*, 2023. Vol. 227, 104122. URL: <https://doi.org/10.1016/j.finel.2023.104022>
328. Kolosov A. E., Virchenko G. A., Kolosova E. P., Virchenko G. I. Structural and Technological Design of Ways for Preparing Reactoplastic Composite Fiber Materials Based on Structural Parametric Modelling. *Chemical and Petroleum Engineering*, 2015. Volume 51, Issue 7. P. 493–500.
329. Kyles S. AutoCAD Workbook for Architects and Engineers. Singapore: Blackwell Publishing, 2012. 281 p.
330. Lombard M. Mastering SolidWorks. Indianapolis: Sybex, 2019. 1210 p.
331. Madsen D.A., Madsen D.P. Engineering Drawing & Design. New York: Delmar, 2012. 1297 p.

332. Maple User Manual. Maplesoft. 2017. 396 p.
333. Marsh D. Applied Geometry for Computer Graphics and CAD. London: Springer-Verlag, 2015. 350 p.
334. Matlab Programming Fundamentals. MathWorks, 2022. 1560 p.
335. Mishra K., Chandrasekaran N. Theory Computer Science. Automata, Languages and Computation. New Delhi: Prentice-Hall of India, 2018. 422 p.
336. Moler C. Experiments with MATLAB. MathWorks, 2015. 278 p.
337. Murtadha A., Almaliki S., Muhsin S. Effect of adding wings to the shallow tines on the performance of subsoiler plow in the soil disturbed area, soil pulverization index & equivalent energy of pulverization. *Basrah Journal of Agricultural Sciences*, 2020. Vol. 33. Issue 2. P. 196–206. URL: <https://doi.org/10.37077/25200860.2020.33.2.17>
338. Narayana K., Kannaiah P., Venkata K. Machine Drawing. New Delhi: New Age International Publishers, 2016. 451 p.
339. Nassir A.J. Effect of moldboard plow types on soil physical properties under different soil moisture content and tractor speed. *Basrah Journal of Agricultural Sciences*, 2018. Vol. 31. Issue 1. P. 48–58. URL: <https://doi.org/10.37077/25200860.2018.75>
340. Omura G., Benton B. Mastering AutoCAD 2017 and AutoCAD LT 2017. Autodesk. Official Press, 2016. 1046 p.
341. Onstott S. AutoCAD 2018 and AutoCAD LT 2018 Essentials. Indianapolis: Sybex, 2017. 414 p.
342. Panigrahi B., Goyal M. Modelling Methods and Practices in Soil and Water Engineering. Oakville: Apple Academic Press, 2016. 390 p.
343. Pratiwi D.K., Chandra H., Utami N.P., Irawan O., Purba A.N. Damage analysis of moldboard plow. *The 1st Sriwijaya International Conference on Environmental. E3S Web of Conferences*, 2018. Vol. 68, 04004. URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20186804004>
344. Rovenski V. Geometry of Curves and Surfaces with Maple. Berlin: Birkhauser, 2010. 310 p.

345. Sharma R., Soni A., Bhagat R., Pandey N., Pandey V. Basics of Agriculture for Engineers. New Delhi: Daya Publishing House, 2014. 117 p. URL: https://www.rvskvv.net/images/Basics-of-Agriculture-for-Engineers_20.04.2020.pdf
346. Simmons C., Maguire D. Manual of Engineering Drawing. Amsterdam. Elsevier, 2014. 298 p.
347. Smith J. Methods of Geometry. New York: John Wiley & Sons, 2010. 486 p.
348. Tapp K. Differential Geometry of Curves and Surfaces. Switzerland: Springer, 2016. 366 p.
349. Tesliuk H., Volik B., Sokol S., Ponomarenko N. Design of working bodies for tillage tools using the methods of bionics. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2019. Vol. 3. Issue 1. P. 49–54. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2019_3%281%29_8
350. Tickoo S. Autodesk Inventor 2015 for Designers. Schererville: CAD/CIM Technologies. 2014. 1346 p.
351. Tishchenko S.S. Modelling of expanding surfaces, which incident by two direct drive curves. *Mathematical modelling*, 2019. Issue 2. P. 40–46. URL: [https://doi.org/10.31319/2519-8106.2\(41\)2019.185038](https://doi.org/10.31319/2519-8106.2(41)2019.185038)
352. Tong L., Lin J. Structural topology optimization with implicit design variable-optimality and algorithm, *Finite Elements in Analysis and Design*. 2011. Vol. 47. Issue 8. P. 922–932. URL: <https://doi.org/10.1016/j.finel.2011.03.004>
353. Tuluchenko G., Virchenko G., Getun G., Martynov V., Tymofieiev M. Generalization of one algorithm for constructing recurrent splines. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2018. Vol. 2. Issue 4. P. 53–62. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.128312>
354. Vanin V., Virchenko G., Virchenko S., Nezenko A. Computer variant dynamic forming of technical objects on the example of the aircraft wing. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2017. № 6/7 (90). P. 67–73. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.117664>
355. Vasudev C. Graph Theory with Application. New Delhi: New Age International, 2016. 466 p.

356. Videla J., Shaaban A.M., Atroshchenko E. Adaptive shape optimization with NURBS designs and PHT-splines for solution approximation in time-harmonic acoustics. *Computers & Structures*, 2024. Vol. 290, 107192. URL: <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2023.107192>

357. Villa D., Furcas F., Pralits J.O., Vernengo G., Gaggero S. An effective mesh deformation approach for hull shape design by optimization. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2021. Vol. 9. Issue 10, 1107. URL: <https://doi.org/10.3390/jmse9101107>

358. Waguespack C. Mastering Autodesk Inventor 2015 and Autodesk Inventor LT 2015. Indianapolis: Sybex, 2015. 1024 p.

359. Xuchu W., Qingshun B., Siyu G., Liang Z., Kai C. A tool path planning method for optical freeform surface ultra-precision turning based on NURBS surface curvature, *Machines*, 2023. Vol. 11. Issue 11, 1017. URL: <https://doi.org/10.3390/machines11111017>

360. 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>

361. 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>

362. Yablonskyi P., Kutsenko L., Vanin V., Shoman O., 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>

363. 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>

364. Yablonskyi P., Vanin V. Geometrical modelling of screw working tools of soil-processing tools and active area of their action. *Abstracts of the 21st international scientific and practical conference «Modern problems of geometric modelling»*. Melitopol: MSPU, 2019, p. 30. URL:

<https://magazine.mdpu.org.ua/index.php/spm/issue/view/92/50>

365. 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)

366. Yablonskyi P.M., Virchenko G.A, Voloha M.P, Lazarchuk-Vorobiova Y.V., Hrubykh 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>

367. 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*, 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)

368. 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. URL:

<https://doi.org/10.1109/CADSM52681.2021.9385235>

369. Zhou H., Feng B., Liu Z., Chang H., Cheng X. NURBS-based parametric design for ship hull form. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2022. Vol. 10, Issue 5, 686. URL: <https://doi.org/10.3390/jmse10050686>

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

ПРИКЛАДИ ПРАКТИЧНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ РОЗРОБЛЕНОГО ПІДХОДУ

У даному додатку наведено приклади практичної реалізації напрацьованого в дисертації підходу стосовно геометричного моделювання ґрунтообробних знарядь та інших технічних об'єктів. Це, зокрема, стосується формоутворення з використанням кривих Безьє, автоматизованого варіантного конструювання плугів, лап і сільськогосподарських дисків, отриманих автором дисертації належних патентів на корисні моделі і т. д.

А.1. До аналізу формоутворення кривими Безьє

Удосконалення математичного апарату обчислення площ криволінійних трапецій

Приклад А.1. Обчислення площі криволінійної трапеції, обмеженої кубічною кривою Безьє, методом трапецій.

Вихідні дані для програми математичного пакета Maple визначені в підпункті 2.2.3.2 дисертації, див. формулу (2.57).

restart:

S := 0: # початкове значення площі

координати вершин характеристичної ламаної в мм

x0 := 30: x1 := 120: x2 := 220: x3 := 330:

y0 := 80: y1 := 89: y2 := 89: y3 := 70:

u := 0: du := 0.1: # початкове значення параметра та його крок

процедури обчислення координат x та y

*prx := proc (u) return (1-u)^3*x0+3*u*(1-u)^2*x1+3*u^2*(1-u)*x2+u^3*x3
end proc:*

*pry := proc (u) return (1-u)^3*y0+3*u*(1-u)^2*y1+3*u^2*(1-u)*y2+u^3*y3
end proc:*

початкові координати

```

xp := prx(u):
yp := pry(u):
# обчислення площі методом трапецій
for u from du by du to 1 do x:=prx(u): y:=pry(u): S:=S+0.5*(yp+y)*(x-xp):
xp:=x: yp:=y end do:
# розрахована величина площі в кв. мм
S

```

Приклад А.2. Обчислення площі криволінійної трапеції, обмеженої кубічною кривою Безьє, на підставі запропонованого виразу (2.56).

Вихідні дані для програми системи Maple визначені в підпункті 2.2.3.2 дисертації, див. співвідношення (2.57).

```

restart:
with(LinearAlgebra):
# координати вершин характеристичної ламаної в мм
x0 := 30: x1 := 120: x2 := 220: x3 := 330:
y0 := 80: y1 := 89: y2 := 89: y3 := 70:
# дефініція належних змінних
X1 := 3*(x1-x0): X2 := 6*(x2-x1): X3 := 3*(x3-x2):
# формування матриць
X := Matrix([[X1, 0, 0, 0], [X2, 3*X1, 0, 0], [X3, 3*X2, 3*X1, 0], [0, 3*X3,
3*X2, X1], [0, 0, 3*X3, X2], [0, 0, 0, X3]]):
Y := Matrix(4, 1, [y0, y1, y2, y3]):
K1 := 1/6: K2 := 1/30: K3 := 1/60: K4 := 1/60: K5 := 1/30: K6 := 1/6:
K := Matrix([[K1, K2, K3, K4, K5, K6]]):
# добуток перших двох матриць
KX := Multiply(K, X):
# розрахована площа трапеції кв. мм
S := Multiply(KX, Y)

```

Приклад А.3. Модифікований розрахунок площі криволінійної трапеції, обмеженої кубічною кривою Безьє, на основі залежності (2.59).

Вихідні дані для поданої нижче комп'ютерної програми математичного пакета Maple визначені в підпункті 2.2.3.2 координатами (2.57).

```
restart:
with(LinearAlgebra):
# координати вершин характеристичної ламаної в мм
x0 := 30: x1 := 120: x2 := 220: x3 := 330:
y0 := 80: y1 := 89: y2 := 89: y3 := 70:
# дефініція належних змінних
X1 := 3*(x1-x0): X2 := 6*(x2-x1): X3 := 3*(x3-x2):
# формування матриць та необхідних масивів
Y := Matrix(4, 1, [y0, y1, y2, y3]):
m(1) := 1: m(2) := 3: m(3) := 3: m(4) := 1:
k(1):= 1/6: k(2):= 1/30: k(3):= 1/60: k(4):= 1/60: k(5):= 1/30: k(6):= 1/6:
# процедура для заповнення матриці M
p := proc (i) return m(i)*(k(i)*X1+k(i+1)*X2+k(i+2)*X3) end proc:
M := Matrix(1, 4, [p(1), p(2), p(3), p(4)]):
# визначення площі криволінійної трапеції
S := Multiply(M, Y)
```

Приклад А.4. Розрахунок площі поперечного перерізу крила літака.

Нехай маємо симетричний аеродинамічний профіль, див. рис А.1, який визначено кривими Безьє другого степеня $\mathbf{r}_e(\underline{u})$ і $\mathbf{r}_n(\underline{u})$ з наступними координатами в міліметрах:

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_{0e}=(x_{0e}, y_{0e})= \mathbf{r}_{0n}=(x_{0n}, y_{0n})=(0, 0), \quad \mathbf{r}_{1e}=(x_{1e}, y_{1e})=(0, 120), \\ \mathbf{r}_{1n}=(x_{1n}, y_{1n})=(0, -120), \quad \mathbf{r}_{2e}=(x_{2e}, y_{2e})= \mathbf{r}_{2n}=(x_{2n}, y_{2n})=(1000, 0). \end{aligned} \quad (\text{A.1})$$

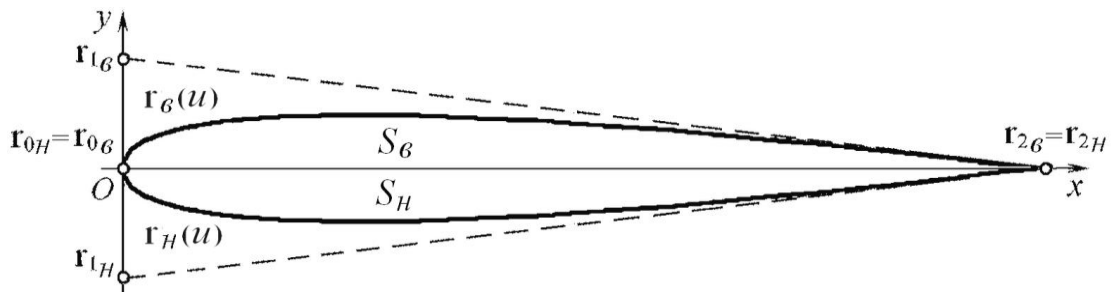


Рис. А.1. Аеродинамічний профіль крила літака

З рис. А.1 видно, що необхідна площа S поперечного перерізу крила, обмеженого лініями $\mathbf{r}_\epsilon(u)$ і $\mathbf{r}_н(u)$, розраховується як сума рівних площ S_ϵ верхньої та $S_н$ нижньої криволінійних трапецій. На основі формул (2.61), (2.62) та (А.1)

$$S = S_\epsilon + S_н = 2S_\epsilon = 2 \cdot 40000 \text{ мм}^2 = 80000 \text{ мм}^2.$$

Криві Безьє зі степеневою параметризацією

Приклад А.5. Моделювання серединної поверхні газового балона.

Газові балони, що розглядаються, є оболонками обертання, серединна поверхня яких складається з центральної циліндричної частини та двох суміжних сферичних, див. рис А.2, де x – вісь обертання. У наведеному прикладі з використанням раціональних кривих другого степеня (2.45) твірна визначається складеним обводом із трьох таких ліній

$$L = (L_i)_1^3, \quad (\text{А.2})$$

де наступні координати в міліметрах:

$$L_1: \mathbf{r}_0=(0, 0), \mathbf{r}_1=(0, R), \mathbf{r}_2=(R, R), w_1=\cos(\pi/4);$$

$$L_2: \mathbf{r}_0=(R, R), \mathbf{r}_1=(R+l/2, R), \mathbf{r}_2=(R+l, R), w_1=0;$$

$$L_3: \mathbf{r}_0=(R+l, R), \mathbf{r}_1=(l_3, R), \mathbf{r}_2=(l_3, 0), w_1=\cos(\pi/4);$$

$R=70, l=175$ – радіус та довжина циліндричної частини;

$l_3 = R+l+R=70+175+70=315$ – загальна довжина балона.

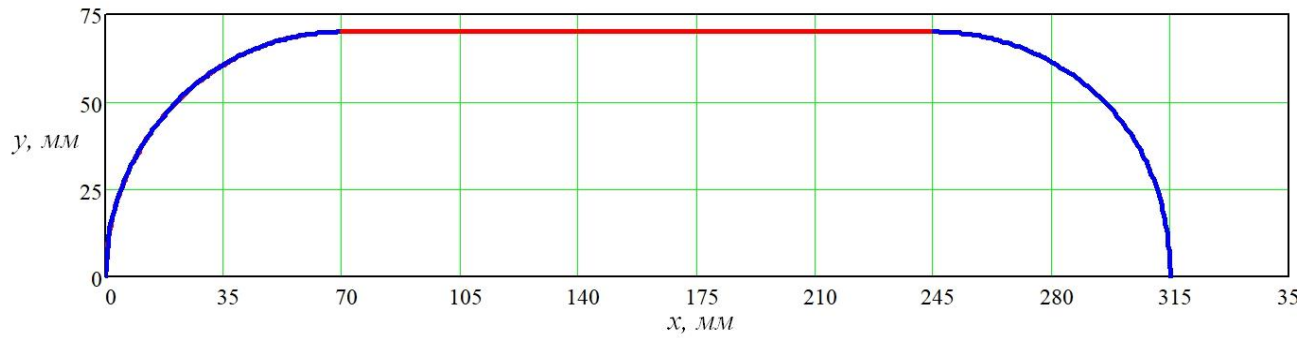


Рис. А.2. Твірна серединної поверхні газового балона

Схема побудови (А.2) є типовою. З точки зору забезпечення гладкості другого порядку, тобто за кривиною, в точці стику сферичної та циліндричної частини маємо неперервність лише дотичних. У поданій на рис А.2 твірної радіус кривини дуг кола $R=70$ мм, відрізка прямої – $R_{np}=\infty$. Для кривини відповідно маємо $k=1/R\approx 0,0143$ мм⁻¹, $k_{np}=1/R_{np}=0$ мм⁻¹.

На рис. А.3 наведено збільшене зображення лівої частини рис. А.2, де показано зазначену вище криву другого степеня, яка абсолютно точно відтворює дугу кола, та лінію Безьє зі степеневою параметризацією

$$L_4: \mathbf{r}_0=(R, R), \mathbf{r}_1=(0, R), \mathbf{r}_2=(0, 0), m_1=2,25, m_2=1,25. \quad (\text{A.3})$$

Рівняння останньої для випадку (А.3) має вигляд (2.74). При цьому в точці стику з циліндричною частиною забезпечена неперервність кривини.

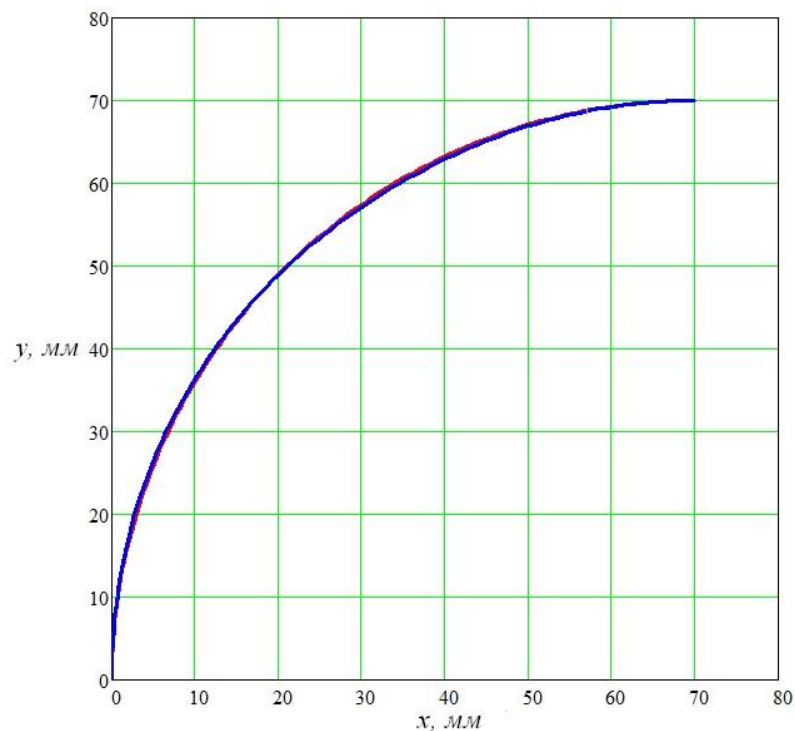


Рис. А.3. Дуга кола та крива Безьє зі степеневою параметризацією

Приклад А.6. Аналіз відхилень кривої Безьє зі степеневою параметризацією від дуги кола.

Зауважимо, що наведені на рис. А.3 криві достатньо схожі. З метою виконання кількісного оцінювання їхнього максимального відхилення розроблено наступну комп'ютерну програму для математичного пакета Maple. Її ідея полягає в розбитті вказаних ліній на потрібне число ділянок n , які аналізуються. Останні визначаються відповідними вертикальними відрізками прямих, що перетинають опрацьовувані криві. За відхилення приймається абсолютна величина різниці ординат отриманих належних точок. Оскільки реальне відхилення між даними лініями знаходиться вздовж нормалей до них, то розраховане є дещо більшим. Тобто оцінка береться з запасом. Цим також нівелюється ймовірне пропущення застосовуваним обчислювальним алгоритмом дійсного максимального відхилення.

```

restart:
# n>1 – число опрацьовуваних ділянок
n := 71:
# R – радіус циліндричної частини балона, мм
R := 70:
# координати вершин характеристичної ламаної кривої другого порядку, мм
x01:= 0: y01:= 0: x11:= 0: y11:= R: x21:= R: y21:= R:
# w1 – ваговий коефіцієнт
w1:=cos((Pi/4):
# координати вершин характеристичної ламаної кривої Безьє зі
степеневою параметризацією, мм
x02:= R: y02:= R: x12:= 0: y12:= R: x22:= 0: y22:= 0:
# показники степенів
m1:= 2.25: m2:= 1.25:
# максимальне відхилення, мм
d:= 0:
# опрацювання кривих

```

for i from 1 by 1 to $n-1$ do $x:=R-R*i/n$: $u1:=fsolve(x*((1-u)^2+2*w1*u*(1-u)+u^2)-u^2*R,u,0..1,maxsols=1)$: $y1:=evalf(((1-u1)^2*y01+2*w1*u1*(1-u1)*y11+u1^2*y21)/((1-u1)^2+2*w1*u1*(1-u1)+u1^2))$: $u2:=fsolve((1-u^(m1))*(1-u)*R-x, u, 0..1, maxsols=1)$: $y2:=((1-u2^m1)*y02+u2^m1*y12)*(1-u2)+u2*((1-u2^m2)*y12+u2^m2*y22)$: if $i=1$ then $d:=abs(y1-y2)$ else $d:=max(d, abs(y1-y2))$ end if end:

максимальне відхилення, мм

d

Зробимо кілька коментарів стосовно наведеної вище комп'ютерної програми. Оскільки досліджувані лінії параметричні, то для дефініції їхніх ординат, які відповідають певним дистанціям уздовж осі абсцис, потрібно розв'язувати рівняння з метою визначення відповідних величин параметрів. У системі Maple для цього наявна функція *fsolve*.

У підпункті 2.2.3.2 дисертації, присвяченому запропонованому узагальненню кривих Безьє на основі їхньої степеневі параметризації, акцентувалась прогнозованість керування формою, розмірами та положенням вказаних ліній за допомогою показників степенів, зокрема m_1 та m_2 . На підставі описаних прийомів отримано початкові величини (A.3).

Для дистанцій x , які аналізуються в наведеній програмі,

$$x = R - \frac{R * i}{n}, \quad (\text{A.4})$$

де $i \in (2 \dots n-1)$,

для кривої (2.45) та її дефініції L_1 , див. (A.2), маємо

$$x = \frac{(1-u)^2 x_0 + w_1 2u(1-u)x_1 + u^2 x_2}{(1-u)^2 + w_1 2u(1-u) + u^2} = \frac{u^2 R}{(1-u)^2 + w_1 2u(1-u) + u^2}, \quad (\text{A.5})$$

для лінії (2.74) та її визначення L_4 , див. (A.3), одержуємо

$$\begin{aligned} x &= ((1-u^{m_1})x_0 + u^{m_1}x_1)(1-u) + u((1-u^{m_2})x_1 + u^{m_2}x_2) = \\ &= (1-u^{m_1})(1-u)R. \end{aligned} \quad (\text{A.6})$$

Рівняння (А.4) ... (А.6) дозволяють отримати належні значення параметра u , які потім надаються змінним u_1 та u_2 відповідно для першої і другої досліджуваної кривої. Надалі за виразами (2.45) та (2.74) розраховуються потрібні ординати. Максимальна абсолютна їхня різниця формується протягом циклу оброблення n ділянок.

Для аналізу взаємних відхилень опрацьовуваних ліній проведено наступний комп'ютерний обчислювальний експеримент.

Спочатку було визначено необхідну максимальну кількість n_{max} досліджуваних за один раз ділянок. Виходячи з наявних габаритів, див. рис. А.3, прийнято $n_{max}=71$ (стосовно обрання простого натурального числа пояснення наведено нижче). Тоді кроки dx і dy відповідно вздовж осі абсцис та ординат становлять

$$dx \approx \frac{R}{n_{max}} = \frac{70 \text{ мм}}{71} \approx 1 \text{ мм}, \quad dy \approx \frac{R}{n_{max}} = \frac{70 \text{ мм}}{71} \approx 1 \text{ мм}. \quad (\text{А.7})$$

На підставі величин (А.7) довжини dl ділянок кривих

$$dl \approx \sqrt{dx^2 + dy^2} \approx \sqrt{1^2 + 1^2} \text{ мм} = \sqrt{2} \text{ мм}. \quad (\text{А.8})$$

З метою досягнення компромісу між якістю отримуваних результатів та кількістю виконаних обчислень опрацьовувані ділянки для однієї комбінації (m_1, m_2) представлено множиною

$$n = (n_i)_{i=1}^{Nn_i} = (n_i)_{i=1}^5 = (11, 23, 37, 53, 71). \quad (\text{А.9})$$

Усі елементи кортежу (А.9) є простими числами, які приблизно рівномірно покривають діапазон

$$(2 \dots n_{max}).$$

Обрання простих чисел дозволяє виключати повторювані розрахунки для вже досліджених дистанцій x , див. залежності (А.5), (А.6), тобто зменшувати загальну кількість обчислень при досягненні певного задовільного результату.

Дані, подібні до (А.7) та (А.8), для множини (А.9) подано в табл. А.1.

Приблизні кроки, мм Таблиця А.1

| n | dx | dy | dl |
|-----|------|------|------|
| 11 | 6,36 | 6,36 | 9 |
| 23 | 3,04 | 3,04 | 4,3 |
| 37 | 1,89 | 1,89 | 2,68 |
| 53 | 1,32 | 1,32 | 1,87 |
| 71 | 0,99 | 0,99 | 1,39 |

Візуально оцінити розміри dl ділянок, помічених вертикальними лініями, на прикладі прямолінійного горизонтального відрізка довжиною 70 мм дозволяє рис. А.4.

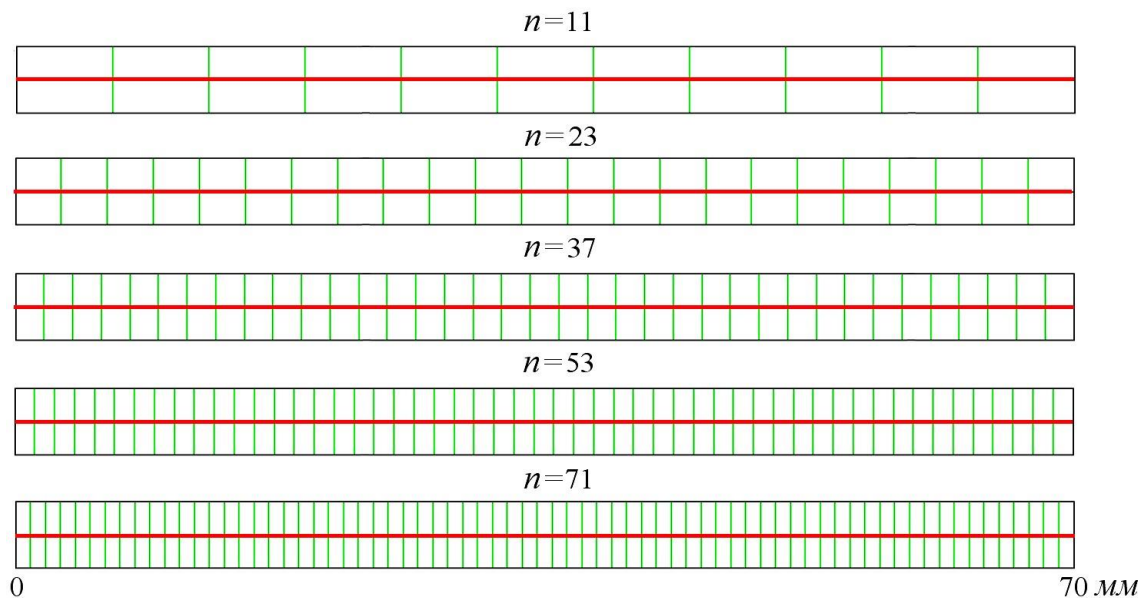


Рис. А.4. Візуалізація довжин ділянок

Бачимо, що за допомогою кортежу (А.9) з елементами із простих чисел у наведеній вище комп'ютерній програмі реалізовано змінну довжину опрацьовуваних ділянок, що підвищує достовірність отримуваних результатів. Таким чином, загальна кількість таких ділянок для кожної можливої комбінації (m_1, m_2) становить

$$n_{\text{заг}} = \sum_{i=1}^3 n_i = 11 + 23 + 37 + 53 + 71 = 195.$$

На підставі початкової точки $(m_1; m_2) = (2,25; 1,25)$, див. вираз (А.3), яку отримано візуальним коригуванням потрібного збігу кривої Безьє зі степеневою параметризацією та відповідної дуги кола, оберемо за досліджувані множини

$$m_1 = (m_{1i})_{i=1}^{Nm_1} = (m_{1i})_{i=1}^3 = (2,2; 2,25; 2,3),$$

$$m_2 = (m_{2i})_{i=1}^{Nm_2} = (m_{2i})_{i=1}^3 = (1,2; 1,25; 1,3). \quad (\text{A.10})$$

Ці кортежі свідчать, що діапазон, який аналізується, спирається в центрі на початкову точку $(m_1=2,25; m_2=1,25)$, охоплює величини, розташовані від неї вздовж m_1 та m_2 на відстанях $\Delta=0,05$.

Варіанти, які розраховуються згідно з формулами (A.10), містить декартовий добуток

$$m = m_1 \times m_2. \quad (\text{A.11})$$

Результати обчислювального експерименту за методикою (A.4) ... (A.11) представлено в табл. A.2.

Розраховані відхилення, мм

Таблиця A.2

| $m_1; m_2$ n | 2,2;1,2 | 2,2;1,25 | 2,2;1,3 | 2,25;1,2 | 2,25;1,25 | 2,25;1,3 | 2,3;1,2 | 2,3;1,25 | 2,3;1,3 |
|-------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 11 | 0,776 | 0,557 | 1,049 | 0,954 | 0,471 | 0,817 | 1,156 | 0,634 | 0,592 |
| 23 | 0,779 | 0,656 | 1,055 | 0,964 | 0,471 | 0,855 | 1,156 | 0,639 | 0,672 |
| 37 | 0,779 | 0,647 | 1,066 | 0,965 | 0,479 | 0,864 | 1,157 | 0,639 | 0,667 |
| 53 | 0,779 | 0,655 | 1,069 | 0,965 | 0,478 | 0,863 | 1,158 | 0,639 | 0,669 |
| 71 | 0,779 | 0,657 | 1,072 | 0,965 | 0,48 | 0,864 | 1,157 | 0,639 | 0,672 |
| прийнято | 0,78 | 0,66 | 1,07 | 0,97 | 0,48 | 0,86 | 1,16 | 0,64 | 0,67 |

Стосовно даних табл. A.2 підкреслимо, що не завжди кількості виконаних обчислень корелює якість одержаних результатів. Зокрема, це підтверджує при $(m_1; m_2)=(2,3; 1,3)$ відхилення для $n=23$. Мається на увазі, що при меншому числі опрацьованих ділянок знайдено максимальне відхилення між кривими, які досліджуються.

У нижньому рядку наведено прийняті для подальшого аналізу відхилення, які відповідають належним комбінаціям $(m_1; m_2)$. З метою дефініції шляхів варіювання останніх величин використано табл. A.3.

Подальше варіювання m_1, m_2 Таблиця А.3

| | | | |
|----------------------|------|-------------|------|
| $m_2 \backslash m_1$ | 1,2 | 1,25 | 1,3 |
| 2,2 | 0,78 | 0,66 | 1,07 |
| 2,25 | 0,97 | 0,48 | 0,86 |
| 2,3 | 1,16 | 0,64 | 0,67 |

З неї видно, що найменше максимальне відхилення 0,48 мм отримано при $(m_1=2,25; m_2=1,25)$. Перспективним рухом із цієї точки є напрями зменшення або збільшення m_1 . Щоб не втратити певні розв'язки, будемо опрацьовувати далі множини

$$m_1 = (m_{1i})_{i=1}^3 = (2,23; 2,25; 2,27),$$

$$m_2 = (m_{2i})_{i=1}^3 = (1,23; 1,25; 1,27). \quad (\text{A.12})$$

Останні кортежі, порівняно з попередніми (А.10), зменшили область можливих розв'язків. Її центром залишилася точка $(m_1=2,25; m_2=1,25)$. При цьому (А.12) охоплює величини, розташовані від центра вздовж m_1 і m_2 на відстанях $\Delta=0,02$.

Результати обчислень за розглянутою вище методикою на даній стадії розрахунків подано в табл. А.4 та табл. А.5.

Розраховані відхилення, мм

Таблиця А.4

| | | | | | | | | | |
|-------------------------|-------------|-------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| $m_1; m_2 \backslash n$ | 2,23;1,23 | 2,23;1,25 | 2,23;1,27 | 2,25;1,23 | 2,25;1,25 | 2,25;1,27 | 2,27;1,23 | 2,27;1,25 | 2,27;1,27 |
| 11 | 0,592 | 0,419 | 0,616 | 0,659 | 0,471 | 0,524 | 0,726 | 0,537 | 0,434 |
| 23 | 0,591 | 0,544 | 0,699 | 0,661 | 0,471 | 0,624 | 0,731 | 0,536 | 0,551 |
| 37 | 0,592 | 0,542 | 0,694 | 0,661 | 0,479 | 0,614 | 0,731 | 0,537 | 0,546 |
| 53 | 0,592 | 0,548 | 0,695 | 0,661 | 0,478 | 0,629 | 0,732 | 0,537 | 0,555 |
| 71 | 0,592 | 0,545 | 0,698 | 0,661 | 0,48 | 0,625 | 0,732 | 0,537 | 0,552 |
| прийнято | 0,59 | 0,55 | 0,7 | 0,66 | 0,48 | 0,63 | 0,73 | 0,54 | 0,56 |

Подальше варіювання m_1, m_2 Таблиця А.5

| | | | |
|----------------------|------|-------------|------|
| $m_2 \backslash m_1$ | 1,23 | 1,25 | 1,27 |
| 2,23 | 0,59 | 0,55 | 0,7 |
| 2,25 | 0,66 | 0,48 | 0,63 |
| 2,27 | 0,73 | 0,54 | 0,56 |

Аналіз останньої таблиці аналогічний виконаному для табл. А.3. Тому далі маємо

$$m_1 = (m_{1i})_{i=1}^3 = (2,24; 2,25; 2,26),$$

$$m_2 = (m_{2i})_{i=1}^3 = (1,24; 1,25; 1,26). \quad (\text{A.13})$$

Тепер область розв'язків (А.13) із центром ($m_1=2,25; m_2=1,25$) охоплює величини, розташовані від її центра вздовж m_1 та m_2 на ще менших відстанях $\Delta=0,01$.

Результати подальших обчислень наведено в табл. А.6 і табл. А.7.

Розраховані відхилення, мм

Таблиця А.6

| | | | | | | | | | |
|-------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------------|------------|-------------|
| $m_1; m_2 \backslash n$ | 2,24;1,24 | 2,24;1,25 | 2,24;1,26 | 2,25;1,24 | 2,25;1,25 | 2,25;1,26 | 2,26;1,24 | 2,26;1,25 | 2,26;1,26 |
| 11 | 0,532 | 0,438 | 0,472 | 0,565 | 0,471 | 0,426 | 0,598 | 0,504 | 0,411 |
| 23 | 0,529 | 0,507 | 0,584 | 0,564 | 0,471 | 0,547 | 0,599 | 0,502 | 0,51 |
| 37 | 0,532 | 0,51 | 0,575 | 0,565 | 0,479 | 0,544 | 0,598 | 0,504 | 0,513 |
| 53 | 0,531 | 0,513 | 0,586 | 0,565 | 0,478 | 0,551 | 0,599 | 0,504 | 0,516 |
| 71 | 0,531 | 0,512 | 0,585 | 0,565 | 0,48 | 0,549 | 0,599 | 0,504 | 0,514 |
| прийнято | 0,53 | 0,51 | 0,59 | 0,57 | 0,48 | 0,55 | 0,6 | 0,5 | 0,52 |

Подальше варіювання m_1, m_2 Таблиця А.7

| | | | |
|----------------------|------|-------------|------|
| $m_2 \backslash m_1$ | 1,24 | 1,25 | 1,26 |
| 2,24 | 0,53 | 0,51 | 0,59 |
| 2,25 | 0,57 | 0,48 | 0,55 |
| 2,26 | 0,6 | 0,5 | 0,52 |

Далі

$$m_1 = (m_{1i})_{i=1}^3 = (2,248; 2,25; 2,252),$$

$$m_2 = (m_{2i})_{i=1}^3 = (1,248; 1,25; 1,252). \quad (\text{A.14})$$

Зараз область розв'язків (A.14) із центром $(m_1=2,25; m_2=1,25)$ охоплює значення, розташовані від її центра вздовж m_1 та m_2 на відстанях $\Delta=0,002$.

Тоді маємо табл. A.8 і табл. A.9.

Розраховані відхилення, мм

Таблиця A.8

| $m_1; m_2$ n | 2,248; 1,248 | 2,248; 1,25 | 2,248; 1,252 | 2,25; 1,248 | 2,25; 1,25 | 2,25; 1,252 | 2,252; 1,248 | 2,252; 1,25 | 2,252; 1,252 |
|-------------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|---------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|
| 11 | 0,483 | 0,465 | 0,446 | 0,49 | 0,471 | 0,453 | 0,496 | 0,478 | 0,459 |
| 23 | 0,483 | 0,477 | 0,493 | 0,489 | 0,471 | 0,485 | 0,495 | 0,477 | 0,478 |
| 37 | 0,484 | 0,485 | 0,498 | 0,49 | 0,479 | 0,492 | 0,497 | 0,478 | 0,486 |
| 53 | 0,483 | 0,485 | 0,5 | 0,49 | 0,478 | 0,493 | 0,496 | 0,478 | 0,486 |
| 71 | 0,484 | 0,486 | 0,5 | 0,49 | 0,48 | 0,493 | 0,497 | 0,478 | 0,487 |
| прийнято | 0,484 | 0,486 | 0,5 | 0,49 | 0,48 | 0,493 | 0,497 | 0,478 | 0,487 |

Подальше варіювання m_1, m_2 Таблиця A.9

| m_2 m_1 | 1,248 | 1,25 | 1,252 |
|----------------|-------|--------------|-------|
| 2,248 | 0,484 | 0,486 | 0,5 |
| 2,25 | 0,49 | 0,48 | 0,493 |
| 2,252 | 0,497 | 0,478 | 0,487 |

Аналіз останньої таблиці показує, що для точності $\Delta=0,002$ визначення m_1 та m_2 найменше максимальне відхилення 0,478 мм забезпечують величини $m_1=2,252$ і $m_2=1,25$.

Таким чином, для практики остаточно можна прийняти максимальне відхилення $\delta_{max}=0,48$ мм. Тоді точність відтворення дуги кола, яке розглядається, кривою Безье зі степенною параметризацією та коефіцієнтами $m_1=2,252$ і $m_2=1,25$ становитиме

$$T = \frac{\delta_{max}}{R} \cdot 100\% = \frac{0,478 \text{ мм}}{70 \text{ мм}} \cdot 100\% \approx 0,7\%. \quad (\text{A.15})$$

В аналогічному випадку для звичайної кривої Безьє, див. рис. А.5, розрахована відповідна величина

$$T = \frac{\delta_{max}}{R} \cdot 100\% = \frac{6,865 \text{ мм}}{70 \text{ мм}} \cdot 100\% \approx 9,8\%. \quad (\text{A.16})$$

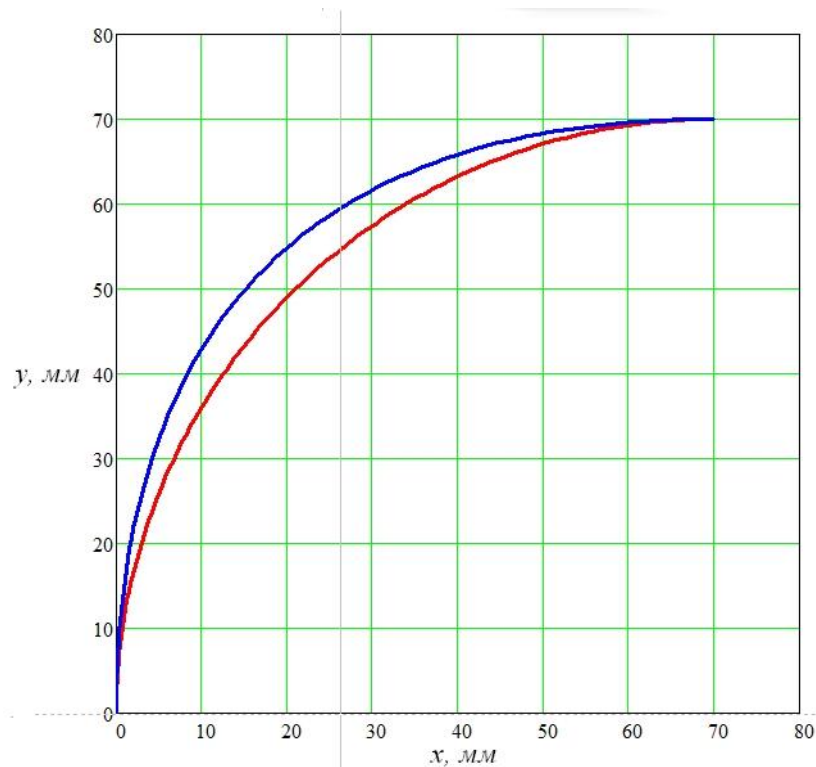


Рис. А.5. Дуга кола та звичайна крива Безьє

Порівняння значень (А.15) та (А.16) засвідчує суттєво більшу гнучкість формоутворення запропонованих кривих Безьє зі степеневою параметризацією.

Зауважимо, що нами опрацьовано застосування ліній вигляду (2.74), тобто з використанням для керування формоутворенням тільки показників степенів m_1 та m_2 . Більш загальним випадком є (2.71), де додатково вживається показник m_3 . Це підвищує гнучкість геометричних побудов. Проілюструємо останнє на конкретному розглянутому вище прикладі. Так для значень ($m_1=3,9$; $m_2=1,8$; $m_3=1,022$) досліджувана апроксимація дуги кола забезпечує найменше максимальне відхилення вже 0,3 мм, що порівняно з попереднім 0,478 мм суттєво краще. У даному випадку точність відтворення дуги кола становить

$$T = \frac{\delta_{max}}{R} \cdot 100\% = \frac{0,3 \text{ мм}}{70 \text{ мм}} \cdot 100\% \approx 0,43\%. \quad (\text{A.17})$$

Але, для впевненого застосування подібних до (A.17) результатів на практиці необхідно виконати належні аналітичні розвідки, схожі на (2.74) ... (2.85). Окреслена тематика може становити предмет подальших відповідних наукових досліджень.

A.2. Полицеві та чизельні робочі органи

У даному підрозділі додатків наведено деякі приклади практичної реалізації запропонованих засобів геометричного моделювання для полицевих і чизельних ґрунтообробних знарядь. Це продемонстровано відповідно на плугах та стрілчастих лапах.

A.2.1. Плуги

Приклад А.7. Побудова параболічних, еліптичних і гіперболічних циліндричних теоретичних поверхонь відвалів плугів, див. рис. 3.3 ... 3.5.

Опис вихідних даних для наведеної нижче програми математичного пакета Maple подано в пункті 3.2.1 дисертації.

```
restart:
with(plots):
# координати в мм
P00 := (0, 0, 0): P01 := (1000, 750, 0): P10 := (100, 0, 400): P11 := (1100,
750, 400):
P1 := (500, 200, 0): w1 := 0: P2 := (500, 200, 400): w2 := 0: P3 := (200, 0, 100):
w3 := 1: P4 := (1200, 750, 100): w4 := 1: # параболічна циліндрична поверхня
#P1 := (500, 200, 0): w1 := 0: P2 := (500, 200, 400): w2 := 0: P3 := (200, 0, 100):
w3 := 0.9: P4 := (1200, 750, 100): w4 := 0.9: # еліптична циліндрична поверхня
#P1 := (500, 200, 0): w1 := 0: P2 := (500, 200, 400): w2 := 0: P3 := (200, 0, 100):
w3 := 1.2: P4 := (1200, 750, 100): w4 := 1.2: # гіперболічна циліндрична поверхня
```

```

n1 := 11: # сітка вздовж u
n2 := 11: # сітка вздовж v
f1:= proc (u, v, n) return (1-v)*(1-u)*P00[n]+(1-v)*u*P01[n]+v*(1-u)*
P10[n]+ v*u*P11[n] end proc:
R0:= proc (u, n) return ((1-u)^2*P00[n]+2*w1*u*(1-u)*P1[n]+u^2*P01[n])/
((1-u)^2+2*w1*u*(1-u)+u^2) end proc:
R1:= proc (u, n) return ((1-u)^2*P10[n]+2*w2*u*(1-u)*P2[n]+u^2*P11[n])/
((1-u)^2+2*w2*u*(1-u)+u^2) end proc:
S0:= proc (v, n) return ((1-v)^2*P00[n]+2*w3*v*(1-v)*P3[n]+v^2*P10[n])/
((1-v)^2+2*w3*v*(1-v)+v^2) end proc:
S1:= proc (v, n) return ((1-v)^2*P01[n]+2*w4*v*(1-v)*P4[n]+v^2*P11[n])/
((1-v)^2+2*w4*v*(1-v)+v^2) end proc:
plot3d([(1-v)*R0(u, 1)+v*R1(u, 1)+(1-u)*S0(v, 1)+u*S1(v, 1)-f1(u, v, 1), (1-
v)*R0(u, 2)+v*R1(u, 2)+(1-u)*S0(v, 2)+u*S1(v, 2)-f1(u, v, 2), (1-v)*R0(u,
3)+v*R1(u, 3)+(1-u)*S0(v, 3)+u*S1(v, 3)-f1(u, v, 3)], u = 0 .. 1, v = 0 .. 1, axes =
normal, labels = [x, y, z], scaling = constrained, grid = [n1, n2], lightmodel =
light2, color = cyan, transparency = 0.1, orientation = [49, 73, 0], font = [Times,
roman, 13], labelfont = [Times, roman, 16])

```

Примітка. Вище потовщеним шрифтом виділено фрагмент програми, який надалі повторюється в інших, де на нього здійснюється тільки посилання. Це зроблено з метою забезпечення кращої наочності програмного коду та економії обсягів дисертації

Приклад А.8. Формування поверхні гіперболічного параболоїда для відвала плуга, див. рис. 3.11.

Опис вихідних даних для поданої нижче програми математичної комп'ютерної системи Maple міститься в пункті 3.2.1 дисертації.

```

restart:
with(plots):
# координати в мм

```


$P00 := (0, 0, 0)$: $P01 := (1100, 750, 0)$: $P10 := (200, 0, 350)$: $P11 := (1100, 750, 350)$:

$P1 := (500, 200, 0)$: $w1 := 0$: $P2 := (500, 200, 350)$: $w2 := 0$: $P3 := (700, 0, 100)$:
 $w3 := 0$: $P4 := (1200, 750, 100)$: $w4 := 0$: # коса площина

виділений фрагмент прикладу А.7

$plot3d([(1-v)*R0(u, 1)+v*RI(u, 1)+(1-u)*S0(v, 1)+u*SI(v, 1)-fI(u, v, 1), (1-v)*R0(u, 2)+v*RI(u, 2)+(1-u)*S0(v, 2)+u*SI(v, 2)-fI(u, v, 2), (1-v)*R0(u, 3)+v*RI(u, 3)+(1-u)*S0(v, 3)+u*SI(v, 3)-fI(u, v, 3)], u = 0 .. 1, v = 0 .. 1, axes = normal, labels = [x, y, z], scaling = constrained, grid = [n1, n2], lightmodel = light1, color = COLOR(RGB, 0.1, 0.9, 1), transparency = 0.1, orientation = [49, 73, 0], font = [Times, roman, 13], labelfont = [Times, roman, 16])$

Приклад А.9. Побудова графіка змінювання кута γ зсуву ґрунту вздовж висоти проєктованих робочих циліндричних поверхонь відвалів плугів.

Подана нижче комп'ютерна програма для математичної системи Maple опрацьовує зображені на рис. 3.3 ... 3.5 фігури. Результат її роботи показано на рис 3.14.

restart:

with(plottools); with(plots); with(CurveFitting):

координати в мм

$P00 := (0, 0, 0)$: $P01 := (1000, 750, 0)$: $P10 := (100, 0, 400)$: $P11 := (1100, 750, 400)$:

$P1 := (500, 200, 0)$: $w1 := 0$: $P2 := (500, 200, 400)$: $w2 := 0$: $P3 := (200, 0, 100)$:
 $w3 := 1$: $P4 := (1200, 750, 100)$: $w4 := 1$: # параболічна циліндрична поверхня

$\#P1 := (500, 200, 0)$: $w1 := 0$: $P2 := (500, 200, 400)$: $w2 := 0$: $P3 := (200, 0, 100)$:
 $w3 := 0.9$: $P4 := (1200, 750, 100)$: $w4 := 0.9$: # еліптична циліндрична поверхня

$\#P1 := (500, 200, 0)$: $w1 := 0$: $P2 := (500, 200, 400)$: $w2 := 0$: $P3 := (200, 0, 100)$:
 $w3 := 1.2$: $P4 := (1200, 750, 100)$: $w4 := 1.2$: # гіперболічна циліндрична поверхня

виділений фрагмент прикладу А.7

$plot3d([(1-v)*R0(u, 1)+v*RI(u, 1)+(1-u)*S0(v, 1)+u*SI(v, 1)-fI(u, v, 1), (1-$

$v) * R0(u, 2) + v * R1(u, 2) + (1-u) * S0(v, 2) + u * S1(v, 2) - f1(u, v, 2)$, $(1-v) * R0(u, 3) + v * R1(u, 3) + (1-u) * S0(v, 3) + u * S1(v, 3) - f1(u, v, 3]$, $u = 0 .. 1$, $v = 0 .. 1$, *axes = normal*, *labels = [x, y, z]*, *scaling = constrained*, *grid = [n1, n2]*, *lightmodel = light2*, *color = cyan*, *transparency = 0.1*, *style = surface*, *orientation = [47, 77, 0]*, *font = [Times, roman, 19]*, *labelfont = [Times, roman, 23]*):

$n := 10$: # число ділянок

$k := n + 1$: # кількість ліній

$L := \text{Array}(1 .. k)$: # масив ліній

$Zk := \text{Array}(1 .. k)$: # масив координат z

$G := \text{Array}(1 .. k)$: # масив кутів G

for j from 1 by 1 to k do $v := (j-1)/n$; $L(j) := \text{line}([S0(v, 1), S0(v, 2), S0(v, 3)], [S1(v, 1), S1(v, 2), S1(v, 3)], \text{color} = \text{red})$; $Zk(j) := S0(v, 3)$; $G(j) := \arctan(\text{abs}(S1(v, 2) - S0(v, 2)) / \text{abs}(S1(v, 1) - S0(v, 1))) * 180 / \text{Pi}$ end do:

$LS := \text{seq}(L[i], i=1..k)$:

$\text{display}(S, LS)$

$p := \text{plot}([\text{seq}([Zk[i], G[i]], i=1 .. k)], z = \text{min}(Zk) .. \text{max}(Zk), \text{style} = \text{point}, \text{color} = \text{red}, \text{symbolsize} = 10)$:

$f2 := \text{LeastSquares}(Zk, G, z, \text{curve} = a * z^2 + b * z + c)$:

$\#f2 := \text{evalf}(\text{LeastSquares}(Zkk, Bk, z, \text{curve} = a * z^3 + b * z^2 + c * z + d))$

$PG := \text{plot}(f2, z = \text{min}(Zk) .. \text{max}(Zk), \text{color} = \text{red})$:

$\text{display}(\{PG, p\}, \text{font} = [\text{Times}, \text{roman}, 19], \text{labelfont} = [\text{Times}, \text{italic}, 22], \text{labels} = ["z", "\gamma^0"], \text{labeldirections} = ["horizontal", "vertical"], \text{view} = [\text{min}(Zk) .. \text{max}(Zk), 0 .. 90])$

Приклад А.10. Визначення змінювання кута β обертання ґрунту для робочих циліндричних поверхонь відвалів плугів.

Подана нижче комп'ютерна програма в математичному пакеті Maple для зображених на рис. 3.3 ... 3.5 фігур будує графіки змінювання кута β залежно від висоти z відвалу. Результат її роботи показано на рис. 3.15 ... 3.20.

restart:

```

with(plottools); with(plots); with(CurveFitting):
# координати в мм
P00 := (0, 0, 0): P01 := (1000, 750, 0): P10 := (100, 0, 400): P11 := (1100,
750, 400):
P1 := (500, 200, 0): w1 := 0: P2 := (500, 200, 400): w2 := 0: P3 := (200, 0, 100):
w3 := 1: P4 := (1200, 750, 100): w4 := 1: # параболічна циліндрична поверхня
#P1 := (500, 200, 0): w1 := 0: P2 := (500, 200, 400): w2 := 0: P3 := (200, 0, 100):
w3 := 0.9: P4 := (1200, 750, 100): w4 := 0.9: # еліптична циліндрична поверхня
#P1 := (500, 200, 0): w1 := 0: P2 := (500, 200, 400): w2 := 0: P3 := (200, 0, 100):
w3 := 1.2: P4 := (1200, 750, 100): w4 := 1.2: # гіперболічна циліндрична поверхня
# виділений фрагмент прикладу A.7
plot3d([(1-v)*R0(u, 1)+v*R1(u, 1)+(1-u)*S0(v, 1)+u*S1(v, 1)-f1(u, v, 1), (1-
v)*R0(u, 2)+v*R1(u, 2)+(1-u)*S0(v, 2)+u*S1(v, 2)-f1(u, v, 2), (1-v)*R0(u, 3)+v*R1(u,
3)+(1-u)*S0(v, 3)+u*S1(v, 3)-f1(u, v, 3)], u = 0 .. 1, v = 0 .. 1, axes=normal, labels
=[x, y, z], scaling=constrained, grid=[n1, n2], lightmodel=light1, color=cyan,
style=surface, orientation=[50, 75, 0], font=[Times, roman, 19], labelfont=[Times,
roman, 23], transparency=0.5):
xP := 500: # січна площина повинна перетинати всі твірні поверхні
n := 10: # число ділянок
k := n+1: # кількість ліній
kk := 0: # кількість розрахованих кутів
L := Array(1 .. k): # масив ліній
Yk := Array(1 .. k): # масив координат y
Zk := Array(1 .. k): # масив координат z
B := Array(1 .. k): # масив кутів B
for j from 1 by 1 to k do vv := (j-1)/n: L(j):=line([S0(vv, 1), S0(vv, 2), S0(vv,
3)], [S1(vv, 1), S1(vv, 2), S1(vv, 3)], color=red, transparency= 0): Zk:=S0(vv, 3):
X1:= S0(vv, 1): Y1 := S0(vv, 2): X2 := S1(vv, 1): Y2 := S1(vv, 2): al := (Y2-Y1)/(X2-
X1): bl := Y1- al*X1: Yk (j):=al*xP+bl: if j <> 1 then kk:=kk+1 end if: if j<>1 and

```

```

Yk(j)<Yk(j-1) then B(kk):=arctan(abs(Zk(j)-Zk(j-1))/abs(Yk(j)-Yk(j-1)))/Pi*180 end
if: if j<>1 and Yk(j)>Yk(j-1) then B(kk):=90+arctan(abs(Yk(j)-Yk(j-1))/abs(Zk(j)-
Zk(j-1)))/Pi*180 end if: end do:

```

```

LS := seq(L[i], i=1 .. k):

```

```

PL:=plot3d([xP, (min(P00[2], P10[2])+0)*(1-u)+u*(max(P01[2], P11[2])-
330), min(P00[3], P01[3])*(1-v)+v*max(P10[3], P11[3])], u=0 .. 1, v=0 .. 1, color=
green, style= surface, transparency = 0):

```

```

display(PL, S, LS, transparency = 0)

```

```

p:=plot([seq([Zk[i], B[i]], i=1..kk)], z=min(Zk)..max(Zk), style=point, color=red,
symbolsize=10):

```

```

Zkk :=Array(1 .. kk):

```

```

Bk :=Array(1 .. kk):

```

```

for j from 1 by 1 to kk do Zkk(j):= Zk(j): Bk(j):=B(j:) end do:

```

```

f2:=evalf(LeastSquares(Zkk, Bk, z, curve=a*z^2+b*z+c)):

```

```

#f2 := evalf(LeastSquares(Zkk, Bk, z, curve = a*z^3+b*z^2+c*z+d))

```

```

PG :=plot(f2, z=min(Zkk) .. max(Zkk), color= red):

```

```

display({PG, p}, font=[Times, roman, 19], labelfont=[Times, italic, 22],
labels=["z", " $\gamma$ °"], labeldirections=["horizontal", "vertical"], view=[min(Zk) ..
max(Zk), 0 .. 120])

```

Приклад А.11. Визначення змінювання кута α розпушення ґрунту для робочих циліндричних поверхонь відвалів плугів.

Подана нижче комп'ютерна програма системи Maple для показаних на рис. 3.3 ... рис. 3.5 фігур будує графіки змінювання кута α розпушення ґрунту залежно від висоти z . Результат її роботи показано на рис. 3.21 ... рис. 3.24.

```

restart:

```

```

with(plottools); with(plots); with(CurveFitting):

```

```

# координати в мм

```

```

P00 := (0, 0, 0): P01 := (1000, 750, 0): P10 := (100, 0, 400): P11 := (1100,
750, 400):

```

$P1 := (500, 200, 0)$: $w1 := 0$: $P2 := (500, 200, 400)$: $w2 := 0$: $P3 := (200, 0, 100)$:
 $w3 := 1$: $P4 := (1200, 750, 100)$: $w4 := 1$: # параболічна циліндрична поверхня

$P1 := (500, 200, 0)$: $w1 := 0$: $P2 := (500, 200, 400)$: $w2 := 0$: $P3 := (200, 0, 100)$:
 $w3 := 0.9$: $P4 := (1200, 750, 100)$: $w4 := 0.9$: # еліптична циліндрична поверхня

$P1 := (500, 200, 0)$: $w1 := 0$: $P2 := (500, 200, 400)$: $w2 := 0$: $P3 := (200, 0, 100)$:
 $w3 := 1.2$: $P4 := (1200, 750, 100)$: $w4 := 1.2$: # гіперболічна циліндрична поверхня

виділений фрагмент прикладу А.7

$plot3d([(1-v)*R0(u, 1)+v*R1(u, 1)+(1-u)*S0(v, 1)+u*S1(v, 1)-f1(u, v, 1), (1-v)*R0(u, 2)+v*R1(u, 2)+(1-u)*S0(v, 2)+u*S1(v, 2)-f1(u, v, 2), (1-v)*R0(u, 3)+v*R1(u, 3)+(1-u)*S0(v, 3)+u*S1(v, 3)-f1(u, v, 3)], u = 0 .. 1, v = 0 .. 1, axes=normal, labels=[x, y, z], scaling=constrained, grid=[n1, n2], lightmodel=light1, color=cyan, style=surface, orientation=[50, 75, 0], font=[Times, roman, 19], labelfont=[Times, roman, 23], transparency=0.5):$

$yP := 300$: # січна площина повинна перетинати всі твірні поверхні

$n := 10$: # число ділянок

$k := n+1$: # кількість ліній

$kk := 0$: # кількість розрахованих кутів

$L := Array(1 .. k)$: # масив ліній

$Xk := Array(1 .. k)$: # масив координат x

$Zk := Array(1 .. k)$: # масив координат z

$A := Array(1 .. k)$: # масив кутів A

for j from 1 by 1 to k do $vv := (j-1)/n$: $L(j) := line([S0(vv, 1), S0(vv, 2), S0(vv, 3)], [S1(vv, 1), S1(vv, 2), S1(vv, 3)], color=red, transparency= 0)$: $Zk := S0(vv, 3)$:
 $X1 := S0(vv, 1)$: $Y1 := S0(vv, 2)$: $X2 := S1(vv, 1)$: $Y2 := S1(vv, 2)$: $al := (Y2-Y1)/(X2-X1)$:
 $bl := Y1 - al*X1$: $Xk(j) := (yP-bl)/al$: if $j <> 1$ then $kk := kk+1$ end if: if $j <> 1$ and
 $Xk(j) > Xk(j-1)$ then $A(kk) := arctan(abs(Zk(j)-Zk(j-1))/abs(Xk(j)-Xk(j-1)))/Pi*180$ end
if: if $j <> 1$ and $Xk(j) < Xk(j-1)$ then $A(kk) := 90+arctan(abs(Xk(j)-Xk(j-1))/abs(Zk(j)-Zk(j-1)))/Pi*180$ end if: end do:

$LS := seq(L[i], i=1 .. k)$:

$PL := plot3d([(min(P00[1], P10[1])+390)*(1-u)+u*(max(P01[1], P11[1])-$

400), y_P , $\min(P00[3], P01[3]) \cdot (1-v) + v \cdot \max(P10[3], P11[3])$, $u=0 \dots 1$, $v=0 \dots 1$,
color= green, style=surface, transparency= 0):

display(PL, S, LS, transparency=0)

*p:=plot([seq([Zk[i], A[i]], i=1..kk)], z=min(Zk)..max(Zk), style=point, color=red,
symbolsize=10):*

Zkk :=Array(1 .. kk):

Ak :=Array(1 .. kk):

for j from 1 by 1 to kk do Zkk(j):= Zk(j): Ak(j):=A(j:) end do:

*f2:=evalf(LeastSquares(Zkk, Ak, z, curve=a*z^2+b*z+c)):*

*#f2 := evalf(LeastSquares(Zkk, Ak, z, curve = a*z^3+b*z^2+c*z+d))*

PG :=plot(f2, z=min(Zkk) .. max(Zkk), color= red):

*display({PG, p}, font=[Times, roman, 19], labelfont=[Times, italic, 22],
labels=["z", " α , 0 "], labeldirections=["horizontal", "vertical"], view=[min(Zk) ..
max(Zk), 0 .. 120])*

Приклад А.12. Математичний зміст формули (3.83).

Наведені нижче вирази докладно описують вказану залежність для
величини $w_{31}=0,5$.

$$\beta(w_4, x, z) = \sum_{i=0}^5 b_i(w_4, x) z^i,$$

де

$$b_i(w_4, x) = c_{2_i}(w_4)x^2 + c_{1_i}(w_4)x + c_{0_i}(w_4),$$

$$c_{20}(w_4) = 3,967 \cdot 10^{-6} w_4^2 + 5,845 \cdot 10^{-6} w_4 - 3,942 \cdot 10^{-6};$$

$$c_{10}(w_4) = 0,017194 w_4^2 - 0,072735 w_4 + 0,032719;$$

$$c_{00}(w_4) = -0,97367 w_4^2 + 1,74241 w_4 + 37,06;$$

$$c_{21}(w_4) = -0,118593 \cdot 10^{-6} w_4^2 - 0,3955 \cdot 10^{-6} w_4 + 0,25135 \cdot 10^{-6};$$

$$c_{11}(w_4) = -0,22765 \cdot 10^{-3} w_4^2 + 1,524 \cdot 10^{-3} w_4 - 0,45965 \cdot 10^{-3};$$

$$c_{01}(w_4) = 7,9633 \cdot 10^{-3} w_4^2 + 0,06494 w_4 + 0,77823;$$

$$c_{22}(w_4) = 1,7804 \cdot 10^{-9} w_4^2 + 5,50563 \cdot 10^{-9} w_4 - 3,47835 \cdot 10^{-9};$$

$$c_{12}(w_4) = 0,86128 \cdot 10^{-6} w_4^2 - 0,013874 \cdot 10^{-3} w_4 + 4,5969 \cdot 10^{-6};$$

$$c_{02}(w_4) = -0,0941 \cdot 10^{-3} w_4^2 - 0,97943 \cdot 10^{-3} w_4 - 7,26927 \cdot 10^{-3};$$

$$c_{23}(w_4) = -13,04896 \cdot 10^{-12} w_4^2 - 29,75126 \cdot 10^{-12} w_4 - 19,4412 \cdot 10^{-12};$$

$$c_{13}(w_4) = 2,2937 \cdot 10^{-9} w_4^2 + 61,3517 \cdot 10^{-9} w_4 - 21,3901 \cdot 10^{-9};$$

$$c_{03}(w_4) = 0,464779 \cdot 10^{-6} w_4^2 + 5,58615 \cdot 10^{-6} w_4 + 35,9079 \cdot 10^{-6};$$

$$c_{24}(w_4) = 0,042818 \cdot 10^{-12} w_4^2 + 0,069634 \cdot 10^{-12} w_4 - 0,04842 \cdot 10^{-12};$$

$$c_{14}(w_4) = -22,30375 \cdot 10^{-12} w_4^2 - 0,127 \cdot 10^{-9} w_4 + 47,268 \cdot 10^{-12};$$

$$c_{04}(w_4) = -0,36954 \cdot 10^{-9} w_4^2 - 14,92578 \cdot 10^{-9} w_4 - 83,5659 \cdot 10^{-9};$$

$$c_{25}(w_4) = -50,02385 \cdot 10^{-18} w_4^2 - 60,5685 \cdot 10^{-18} w_4 + 45,15272 \cdot 10^{-18};$$

$$c_{15}(w_4) = 34,568 \cdot 10^{-15} w_4^2 + 0,106313 \cdot 10^{-12} w_4 - 43,5482 \cdot 10^{-15};$$

$$c_{05}(w_4) = -0,63306 \cdot 10^{-12} w_4^2 + 14,2043 \cdot 10^{-12} w_4 + 74,6905 \cdot 10^{-12}.$$

Приклад А.13. Компоненти співвідношення (3.84).

Подані далі формули розкривають зміст зазначеної залежності для величини $w_{31}=1,5$.

$$\beta(w_4, x, z) = \sum_{i=0}^5 b_i(w_4, x) z^i,$$

де

$$b_i(w_4, x) = c_{2_i}(w_4) x^2 + c_{1_i}(w_4) x + c_{0_i}(w_4),$$

$$c_{20}(w_4) = 19,20547 \cdot 10^{-6} w_4^2 - 53,479 \cdot 10^{-6} w_4 + 36,9118 \cdot 10^{-6};$$

$$c_{10}(w_4) = -5,74451 \cdot 10^{-3} w_4^2 - 4,71886 \cdot 10^{-3} w_4 + 20,3255 \cdot 10^{-3};$$

$$c_{00}(w_4) = 0,967642 w_4^2 - 2,22406 w_4 + 35,163;$$

$$c_{21}(w_4) = -0,399434 \cdot 10^{-6} w_4^2 + 1,13572 \cdot 10^{-6} w_4 - 0,802673 \cdot 10^{-6};$$

$$c_{11}(w_4) = 0,4901721 \cdot 10^{-3} w_4^2 - 0,826037 \cdot 10^{-3} w_4 + 0,127698 \cdot 10^{-3};$$

$$c_{01}(w_4) = -64,607 \cdot 10^{-3} w_4^2 + 0,215712 w_4 - 0,024126;$$

$$\begin{aligned}
c_{22}(w_4) &= 3,020873 \cdot 10^{-9} w_4^2 - 8,93712 \cdot 10^{-9} w_4 + 6,83403 \cdot 10^{-9}; \\
c_{12}(w_4) &= -5,72285 \cdot 10^{-6} w_4^2 + 11,11142 \cdot 10^{-6} w_4 - 1,7383 \cdot 10^{-6}; \\
c_{02}(w_4) &= 0,51671 \cdot 10^{-3} w_4^2 - 2,05404 \cdot 10^{-3} w_4 + 5,2464 \cdot 10^{-3}; \\
c_{23}(w_4) &= -10,10396 \cdot 10^{-12} w_4^2 + 32,32037 \cdot 10^{-12} w_4 - 28,3655 \cdot 10^{-12}; \\
c_{13}(w_4) &= 23,63006 \cdot 10^{-9} w_4^2 - 49,22693 \cdot 10^{-9} w_4 + 7,25722 \cdot 10^{-9}; \\
c_{03}(w_4) &= -0,64693 \cdot 10^{-6} w_4^2 + 5,816567 \cdot 10^{-6} w_4 - 30,078 \cdot 10^{-6}; \\
c_{24}(w_4) &= 14,84783 \cdot 10^{-15} w_4^2 - 54,92057 \cdot 10^{-15} w_4 + 57,72 \cdot 10^{-15}; \\
c_{14}(w_4) &= -42,2364 \cdot 10^{-12} w_4^2 + 99,339 \cdot 10^{-9} w_4 - 20,8686 \cdot 10^{-12}; \\
c_{04}(w_4) &= -2,76793 \cdot 10^{-9} w_4^2 - 4,12063 \cdot 10^{-9} w_4 + 68,2703 \cdot 10^{-9}; \\
c_{25}(w_4) &= -7,736109 \cdot 10^{-18} w_4^2 + 36,24505 \cdot 10^{-18} w_4 - 46,2765 \cdot 10^{-18}; \\
c_{15}(w_4) &= 28,8507 \cdot 10^{-15} w_4^2 - 79,79983 \cdot 10^{-15} w_4 + 25,8343 \cdot 10^{-15}; \\
c_{05}(w_4) &= 5,34146 \cdot 10^{-12} w_4^2 - 2,403446 \cdot 10^{-12} w_4 - 56,7497 \cdot 10^{-12}.
\end{aligned}$$

A.2.2. Стрілчасті лапи

Приклад А.14. Побудова теоретичної поверхні плоскорізальної лапи у вигляді косої площини, див. рис. 3.56.

Опис вихідних даних для наведеної нижче програми математичного пакета Maple подано в пункті 3.3.1 дисертації.

```

restart:
with(plottools); with(plots):
# координати в мм
P00 := (0, 0, 0): P01 := (140, 90, 0): P10 := (70, 0, 9): P11 := (155, 90, 4):
P1 := (75, 100, 0): w1 := 0: P2 := (150, 40, 5.25): w2 := 0: P3 := (25, 0, 15):
w3 := 0: P4 := (200, 100, 15): w4 := 0:
n1 := 16: # сітка вздовж u
n2 := 9: # сітка вздовж v

```



```
f1:= proc (u, v, n) return (1-v)*(1-u)*P00[n]+(1-v)*u*P01[n]+v*(1-u)*
P10[n]+ v*u*P11[n] end proc:
```

```
R0:= proc (u, n) return ((1-u)^2*P00[n]+2*w1*u*(1-u)*P1[n]+u^2*P01[n])/
((1-u)^2+2*w1*u*(1-u)+u^2) end proc:
```

```
R1:= proc (u, n) return ((1-u)^2*P10[n]+2*w2*u*(1-u)*P2[n]+u^2*P11[n])/
((1-u)^2+2*w2*u*(1-u)+u^2) end proc:
```

```
S0:= proc (v, n) return ((1-v)^2*P00[n]+2*w3*v*(1-v)*P3[n]+v^2*P10[n])/
((1-v)^2+2*w3*v*(1-v)+v^2) end proc:
```

```
S1:= proc (v, n) return ((1-v)^2*P01[n]+2*w4*v*(1-v)*P4[n]+v^2*P11[n])/
((1-v)^2+2*w4*v*(1-v)+v^2) end proc:
```

```
S:=plot3d([(1-v)*R0(u, 1)+v*R1(u, 1)+(1-u)*S0(v, 1)+u*S1(v, 1)-f1(u, v, 1),
(1-v)*R0(u, 2)+v*R1(u, 2)+(1-u)*S0(v, 2)+u*S1(v, 2)-f1(u, v, 2), (1-v)*R0(u,
3)+v*R1(u, 3)+(1-u)*S0(v, 3)+u*S1(v, 3)-f1(u, v, 3)], u = 0 .. 1, v = 0 .. 1, axes =
normal, labels = [x, y, z], scaling = constrained, grid = [n1, n2], color = cyan,
transparency = 0.1, orientation = [32, 72, 0], font = [Times, roman, 13], labelfont
= [Times, roman, 15], view = [0 .. 200, 0 .. 100, 0 .. 30]):
```

```
display(S)
```

Приклад А.15. Створення поверхні плоскорізальної лапи, показаної на першому зображенні рис. 3.57.

Програма відрізняється від попереднього прикладу тільки четвертим рядком

```
P00 := (0, 0, 0): P01 := (140, 90, 0): P10 := (40, 0, 5): P11 := (155, 90, 4):
```

Приклад А.16. Формування поверхні лапи другого зображення рис. 3.57.

Відмінність від прикладу А.14 полягає лише в рядках

```
P00 := (0, 0, 0): P01 := (140, 90, 0): P10 := (40, 0, 5): P11 := (140, 85, 1):
```

```
n1 := 14: # сітка вздовж u
```

```
n2 := 8: # сітка вздовж v
```

Приклад А.17. Побудова теоретичної поверхні універсальної лапи першого зображення рис. 3.58.

Програма для математичного пакета Maple.

```
restart:
with(plottools); with(plots):
# координати в мм
P00 :=(0, 0, 0): P01:= (220, 140, 0): P10:= (100, 0, 25): P11:= (230, 130, 6):
P1:= (75, 100, 0): w1:=0: P2:= (150, 40, 5.25): w2:=0: P3 :=(25, 0, 15): w3:= 0:
P4:= (200, 100, 15): w4:=0:
n1 := 16: # сітка вздовж u
n2 := 7: # сітка вздовж v
# виділений фрагмент прикладу А.14
S:=plot3d([(1-v)*R0(u, 1)+v*R1(u, 1)+(1-u)*S0(v, 1)+u*S1(v, 1)-f1(u, v, 1),
(1-v)*R0(u, 2)+v*R1(u, 2)+(1-u)*S0(v, 2)+u*S1(v, 2)-f1(u, v, 2), (1-v)*R0(u,
3)+v*R1(u, 3)+(1-u)*S0(v, 3)+u*S1(v, 3)-f1(u, v, 3)], u = 0 .. 1, v = 0 .. 1, axes =
normal, labels = [x, y, z], scaling = constrained, grid = [n1, n2], color = yellow,
transparency = 0.1, orientation = [32, 72, 0], font = [Times, roman, 13], labelfont
= [Times, roman, 15], view = [0 .. 250, 0 .. 150, 0 .. 30]):
display(S)
```

Приклад А.18. Створення поверхні універсальної лапи другого зображення рис. 3.58.

Ця програма для системи Maple від попереднього прикладу відрізняється тільки четвертим рядком

```
P00 :=(0, 0, 0): P01:= (220, 140, 0): P10:= (80, 0, 20): P11:= (220, 130, 8):
```

Приклад А.19. Формування універсальної лапи з криволінійними обводами першого зображення рис. 3.59.

Програма для математичного пакета Maple.

```
restart:
with(plottools); with(plots):
```

```

# координати в мм
P00 :=(0, 0, 0): P01:= (220, 140, 0): P10:= (100, 0, 25): P11:= (230, 130, 6):
P1:= (100, 50, 0): w1:=1: P2:= (150, 40, 5.25): w2:=0: P3 :=(25, 0, 15): w3:= 0:
P4:= (200, 100, 15): w4:=0:

n1 := 16: # сітка вздовж u
n2 := 7: # сітка вздовж v

# виділений фрагмент прикладу A.14
P := point([P1], color = red, symbol = solidsphere, symbolsize = 5):
S:=plot3d([(1-v)*R0(u, 1)+v*R1(u, 1)+(1-u)*S0(v, 1)+u*S1(v, 1)-f1(u, v, 1),
(1-v)*R0(u, 2)+v*R1(u, 2)+(1-u)*S0(v, 2)+u*S1(v, 2)-f1(u, v, 2), (1-v)*R0(u,
3)+v*R1(u, 3)+(1-u)*S0(v, 3)+u*S1(v, 3)-f1(u, v, 3)], u = 0 .. 1, v = 0 .. 1, axes =
normal, labels = [x, y, z], scaling = constrained, grid = [n1, n2], color = green,
transparency = 0.1, orientation = [32, 72, 0], font = [Times, roman, 13], labelfont
= [Times, roman, 15], view = [0 .. 250, 0 .. 150, 0 .. 30]):

display(P, S)

```

Приклад А.20. Побудова поверхні лапи другого зображення рис. 3.59.

Від попереднього прикладу дана програма системи Maple відрізняється рядками

```

P1:= (100, 50, 0): w1:=1: P2:= (150, 40, 5.25): w2:=0: P3 :=(50, 0, 1): w3:=1:
P4:= (200, 100, 15): w4:=0:

P := point([P3], color = red, symbol = solidsphere, symbolsize = 5):

```

Приклад А.21. Подальша модифікація теоретичної поверхні лапи (третє зображення рис. 3.59).

Наступні зміни програми математичного пакета Maple:

```

P1:= (100, 50, 0): w1:=1: P2:= (180, 60, 12): w2:=1: P3 :=(50, 0, 1): w3:=1:
P4:= (200, 100, 15): w4:=0:

P := point([P2], color = red, symbol = solidsphere, symbolsize = 5):

```

Приклад А.22. Завершальний варіант поверхні стрілкової лапи (четверте зображення рис. 3.59).

Кореговані рядки програми системи Maple:

```
P1:=(100, 50, 0): w1:=1: P2:=(180, 60, 12): w2:=1: P3 :=(50, 0, 1): w3:=1:
P4:=(250, 170, 3): w4:=1:
```

```
P := point([P4], color = red, symbol = solidsphere, symbolsize = 5):
```

```
S:=plot3d([(1-v)*R0(u, 1)+v*R1(u, 1)+(1-u)*S0(v, 1)+u*S1(v, 1)-f1(u, v, 1),
(1-v)*R0(u, 2)+v*R1(u, 2)+(1-u)*S0(v, 2)+u*S1(v, 2)-f1(u, v, 2), (1-v)*R0(u,
3)+v*R1(u, 3)+(1-u)*S0(v, 3)+u*S1(v, 3)-f1(u, v, 3)], u = 0 .. 1, v = 0 .. 1, axes =
normal, labels = [x, y, z], scaling = constrained, grid = [n1, n2], color = green,
transparency = 0.1, orientation = [32, 72, 0], font = [Times, roman, 13], labelfont
= [Times, roman, 15], view = [0 .. 250, 0 .. 200, 0 .. 30]):
```

А.3. Грунтообробні диски

У цій частині праці наведено деякі матеріали, що доповнюють подані в четвертому розділі дисертації відомості стосовно геометричного моделювання грунтообробних дисків.

А.3.1. До питання раціонального вибору типу грунтообробних знарядь

Даний пункт ілюструє варіювання вагою впливу оцінок ротаційних робочих органів, проаналізованих у підрозділ 4.1, шляхом використання в розглянутих графоаналітичних моделях не сталих, а змінних кутів між осями, див. рис. А.6 ... А.10. Збільшення цих кутів підвищує вагу відповідних оцінок. Застосований математичний апарат аналогічний поданому в зазначеній вище частині дисертації.

Отримані числові дані мають вигляд для ротаційного робочого органа:

– суцільного диска

$$S_1 = 2,3; \bar{S}_{1,1} = 0,217; \bar{S}_{1,2} = 0,217; \bar{S}_{1,3} = 0,188; \bar{S}_{1,4} = 0,188; \bar{S}_{1,5} = 0,188; \quad (\text{A.18})$$

– кільцевого пасивного типу

$$S_2 = 3,23; \bar{S}_{2,1} = 0,232; \bar{S}_{2,2} = 0,232; \bar{S}_{2,3} = 0,221;$$

$$\bar{S}_{2,4} = 0,133; \bar{S}_{2,5} = 0,181; S_2 / S_1 = 1,4; \quad (\text{A.19})$$

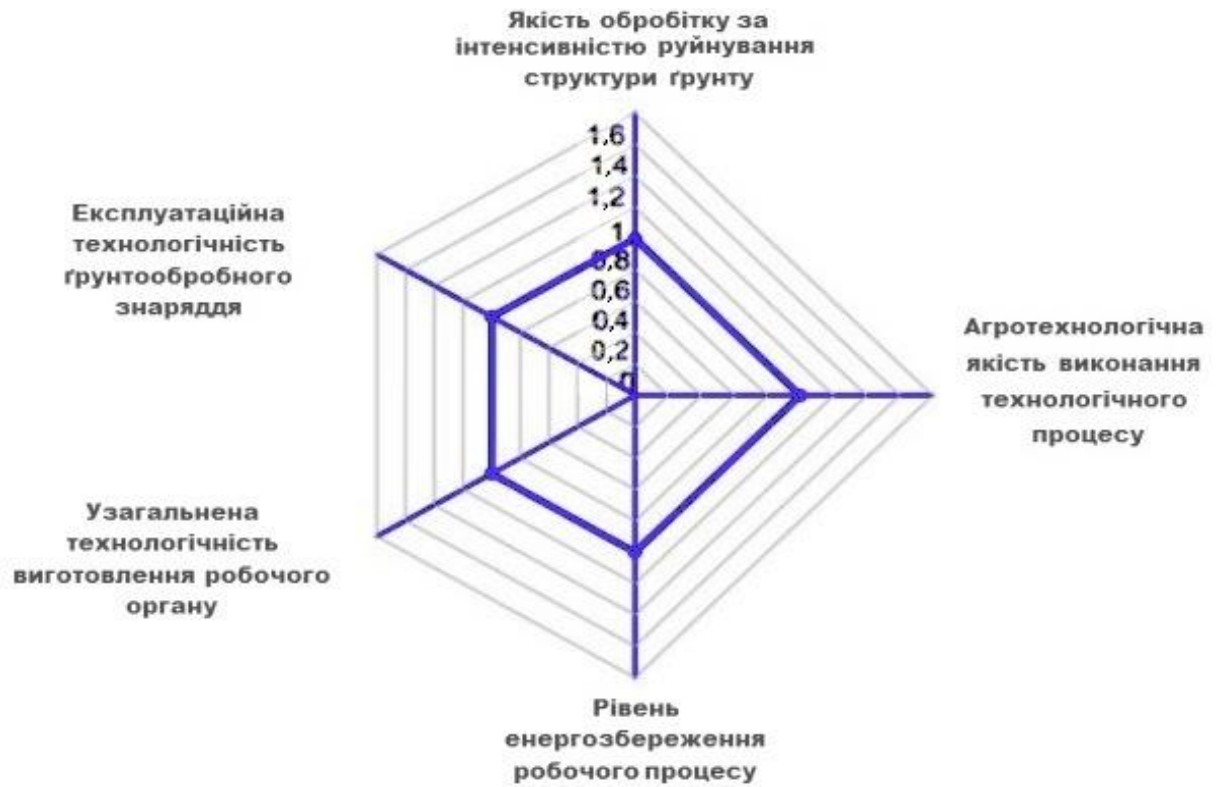


Рис. А.6. Суцільний диск

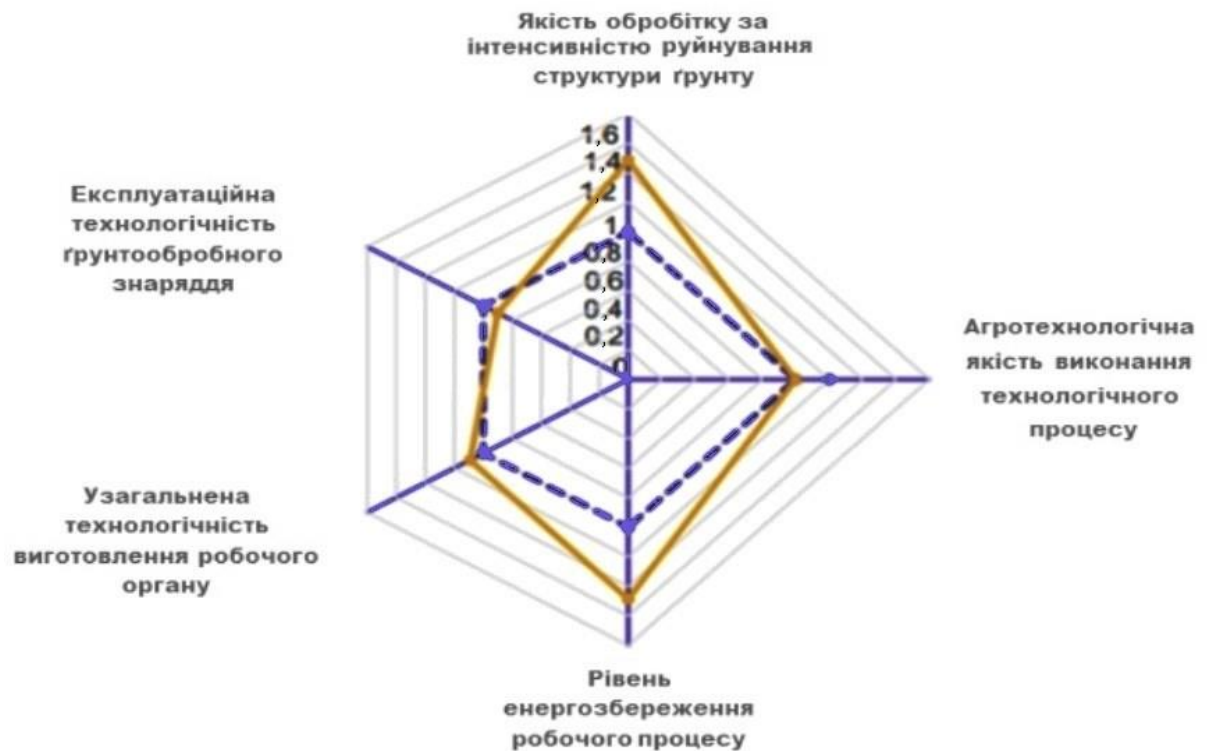


Рис. А.7. Кільцевий пасивного типу

– голчастого пасивного типу

$$S_3 = 2,5; \bar{S}_{3,1} = 0,208; \bar{S}_{3,2} = 0,208; \bar{S}_{3,3} = 0,203;$$

$$\bar{S}_{3,4} = 0,156; \bar{S}_{3,5} = 0,225; S_3 / S_1 = 1,09; \quad (A.20)$$

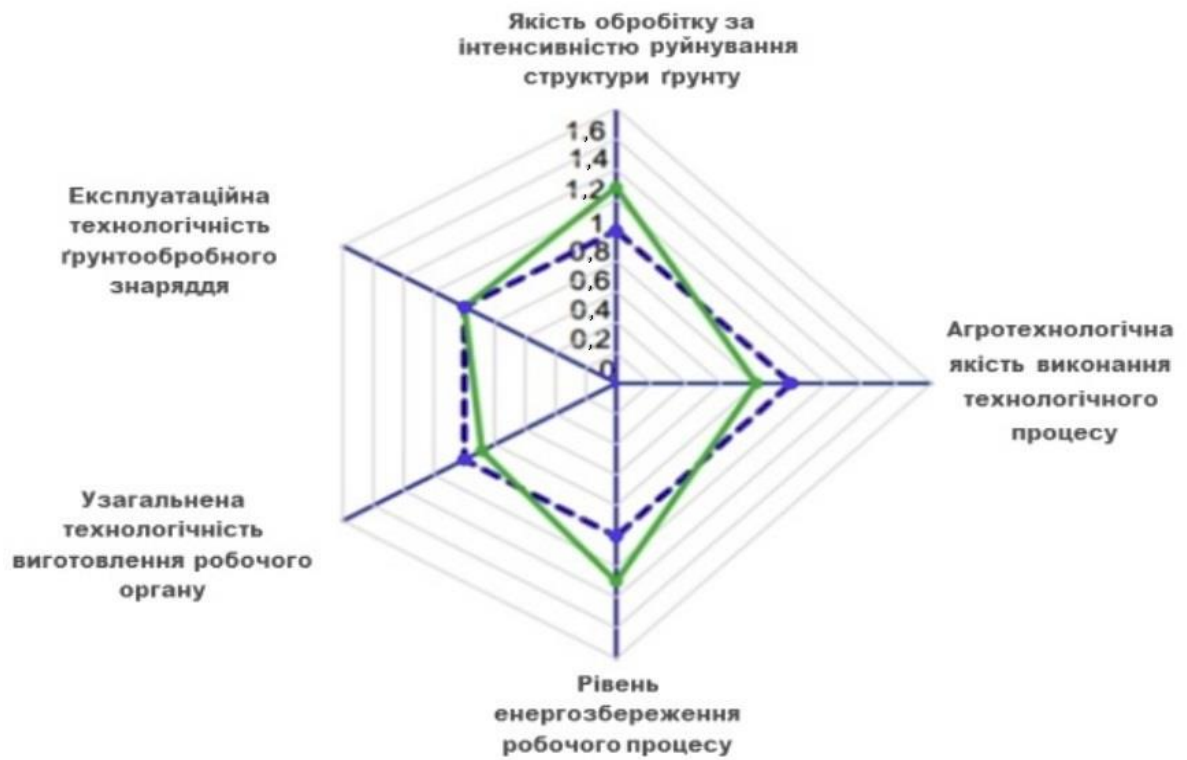


Рис. А.8. Голчастий пасивного типу

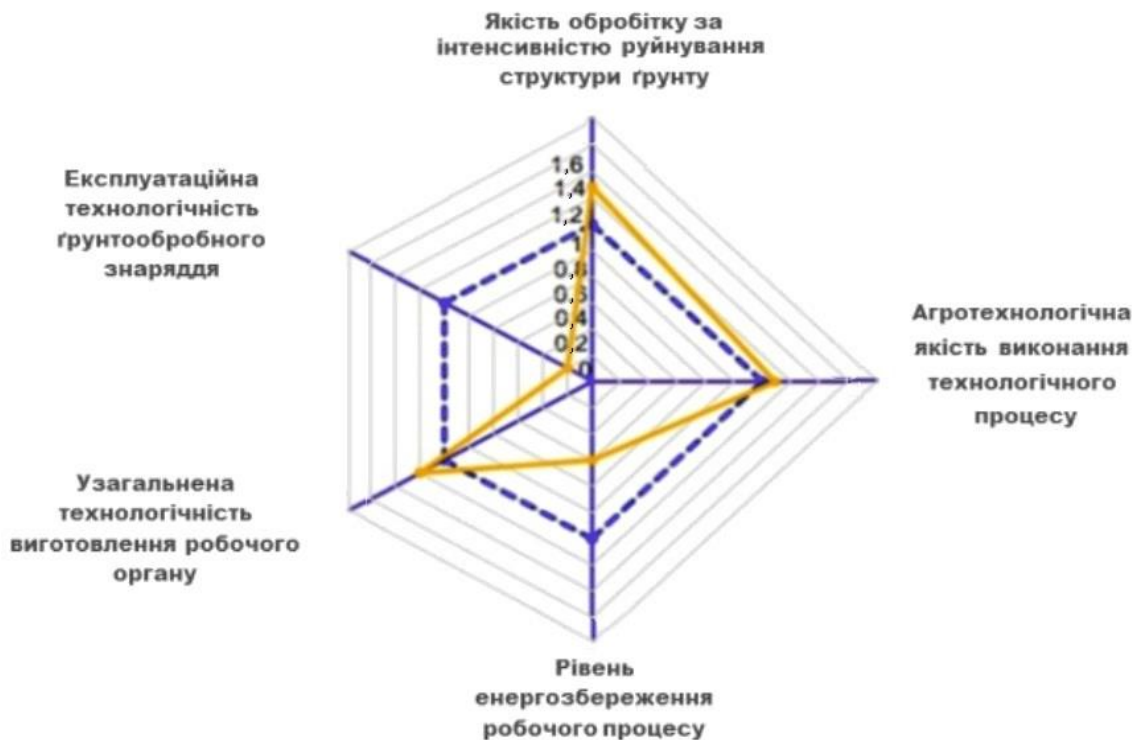


Рис. А.9. Кільцевий активного типу

– кільцевого активного типу

$$S_4 = 1,57; \bar{S}_{4,1} = 0,454; \bar{S}_{4,2} = 0,21; \bar{S}_{4,3} = 0,198;$$

$$\bar{S}_{4,4} = 0,066; \bar{S}_{4,5} = 0,072; S_4 / S_1 = 0,68; \quad (\text{A.21})$$

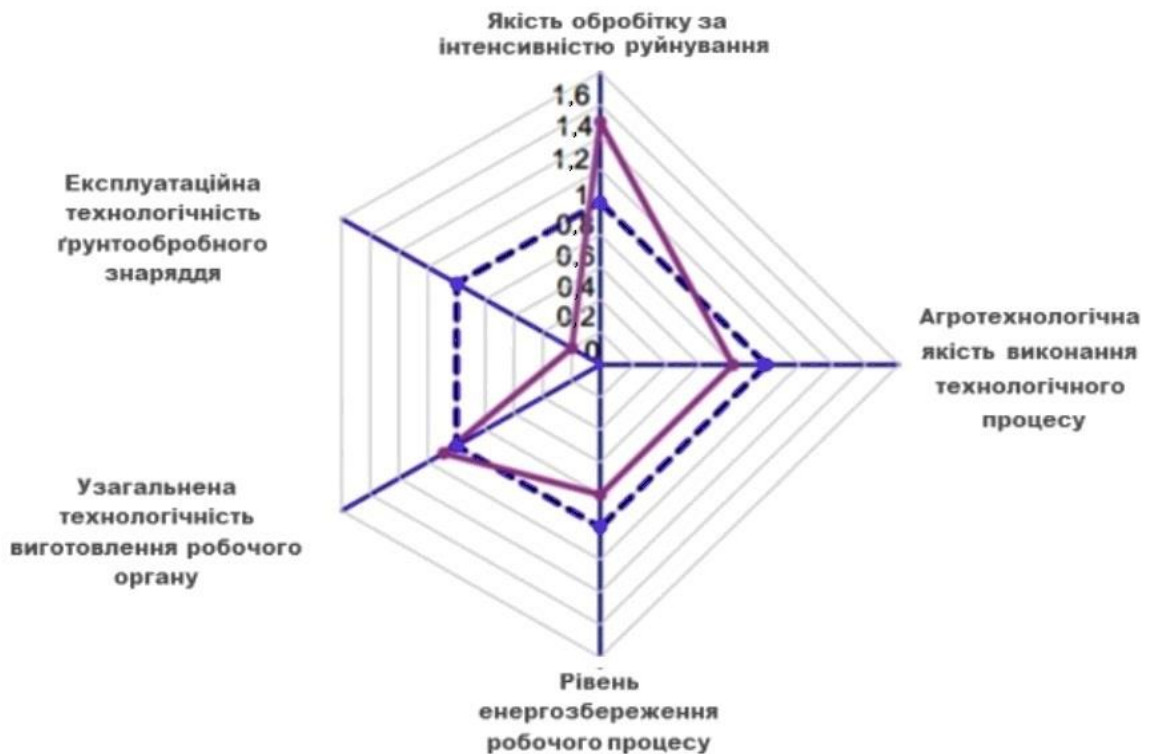


Рис. А.10. Голчастий активного типу

– голчастого активного типу

$$S_5 = 1,53; \bar{S}_{5,1} = 0,393; \bar{S}_{5,2} = 0,21; \bar{S}_{5,3} = 0,25;$$

$$\bar{S}_{5,4} = 0,062; \bar{S}_{5,5} = 0,085; S_5 / S_1 = 0,66. \quad (\text{A.22})$$

Рис. А.6 ... А.10 та величини (А.18) ... (А.22) дають уявлення про вплив виконаних модифікацій розглянутої моделі на досліджувані характеристики проаналізованих сільськогосподарських знарядь.

А.3.2. Деякі опрацьовані ґрунтообробні диски

На рис. А.11 ... А.14 показано варіанти комп'ютерних твердотільних геометричних моделей ґрунтообробних дисків, які корелюють із зображеннями рис. 4.7 ... 4.10. Відмінність полягає в застосуванні більш різноманітних отворів (квадратних і круглих).

На рис. А.11 для кожного диска застосовано по чотири круглих отвори, а на двох наступних рисунках – по шість круглих отворів. Рис. А.14 ілюструє використання комбінованих отворів, у даному випадку квадратного центрального та чотирьох круглих навколо нього.

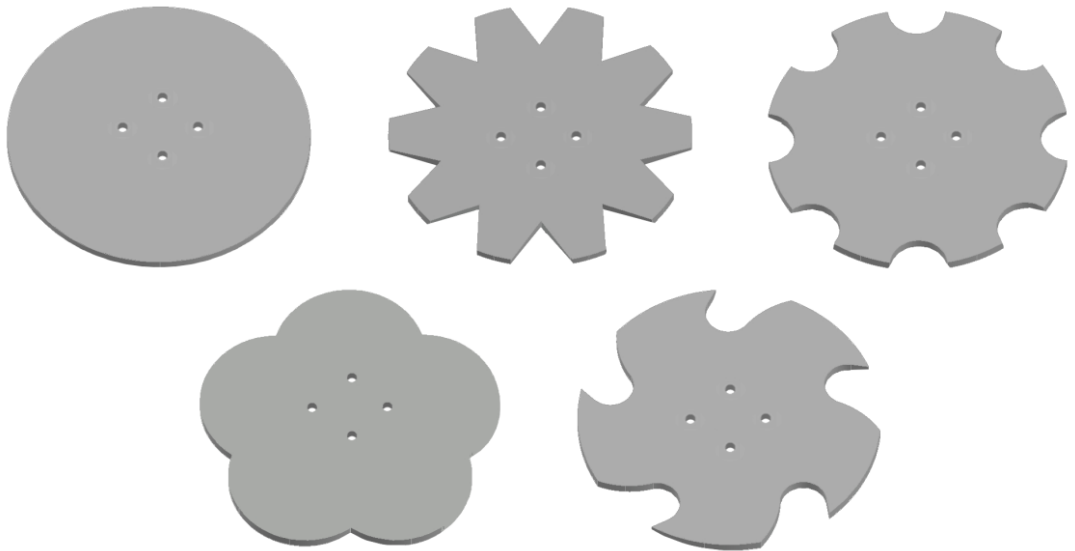


Рис. А.11. Плоска базова поверхня

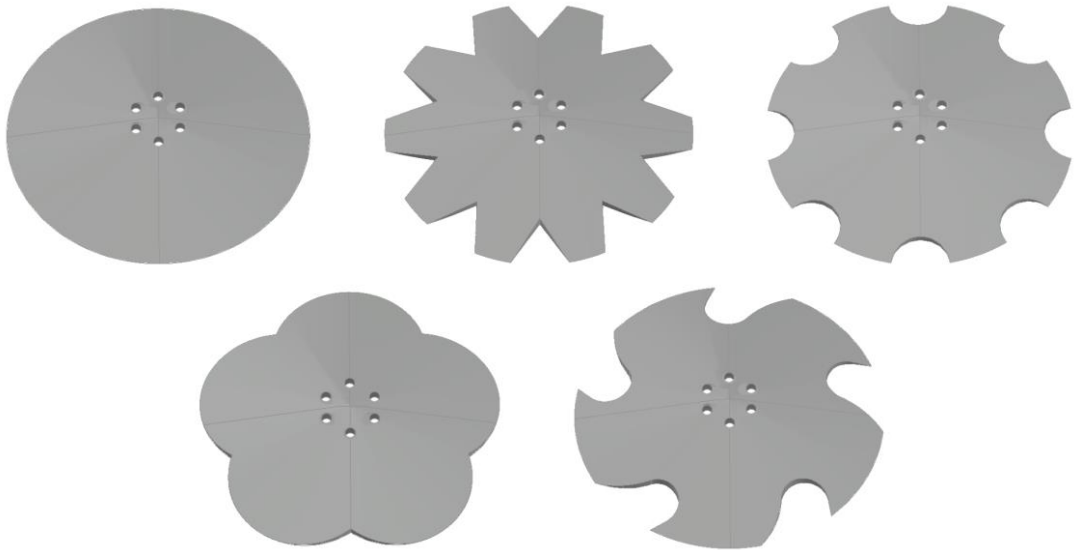


Рис. А.12. Конічна базова поверхня

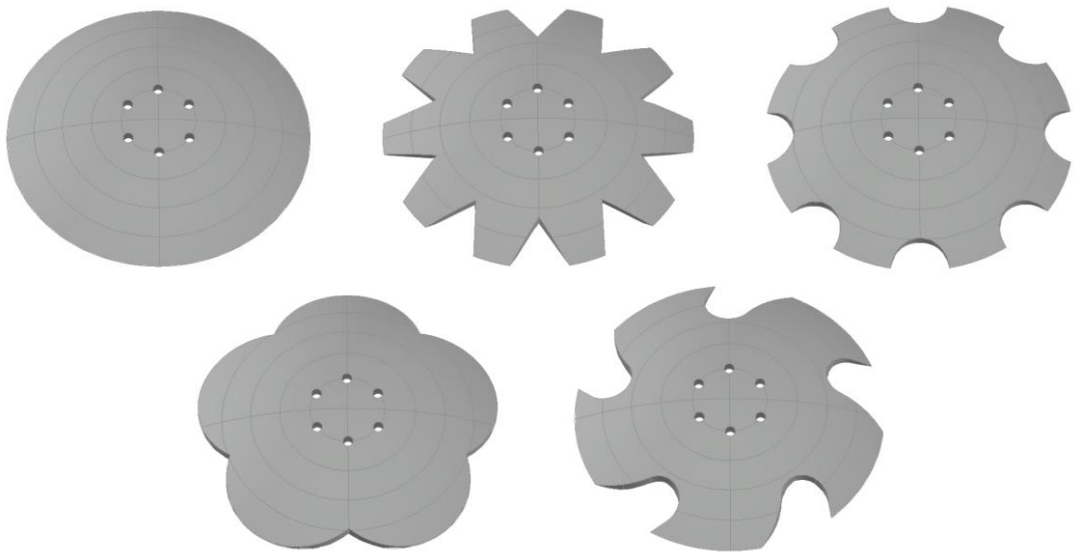


Рис. А.13. Сферична базова поверхня

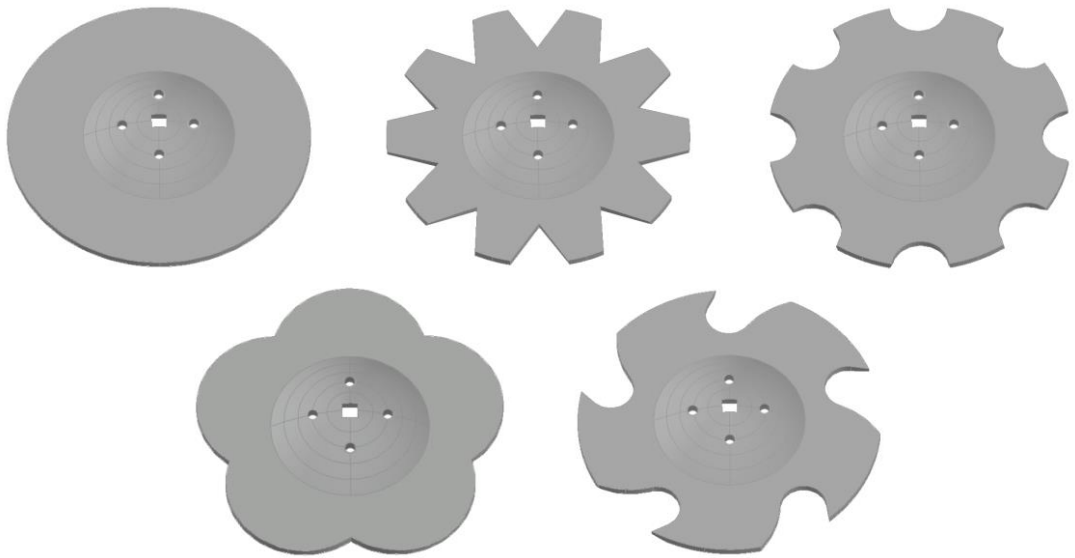


Рис. А.14. Комбінована базова поверхня

Можливі також інші варіанти для дисків, як базових поверхонь, так і вирізів та отворів.

А.3.3. Приклади креслеників

Нижче приведені приклади креслеників ґрунтообробних дисків.

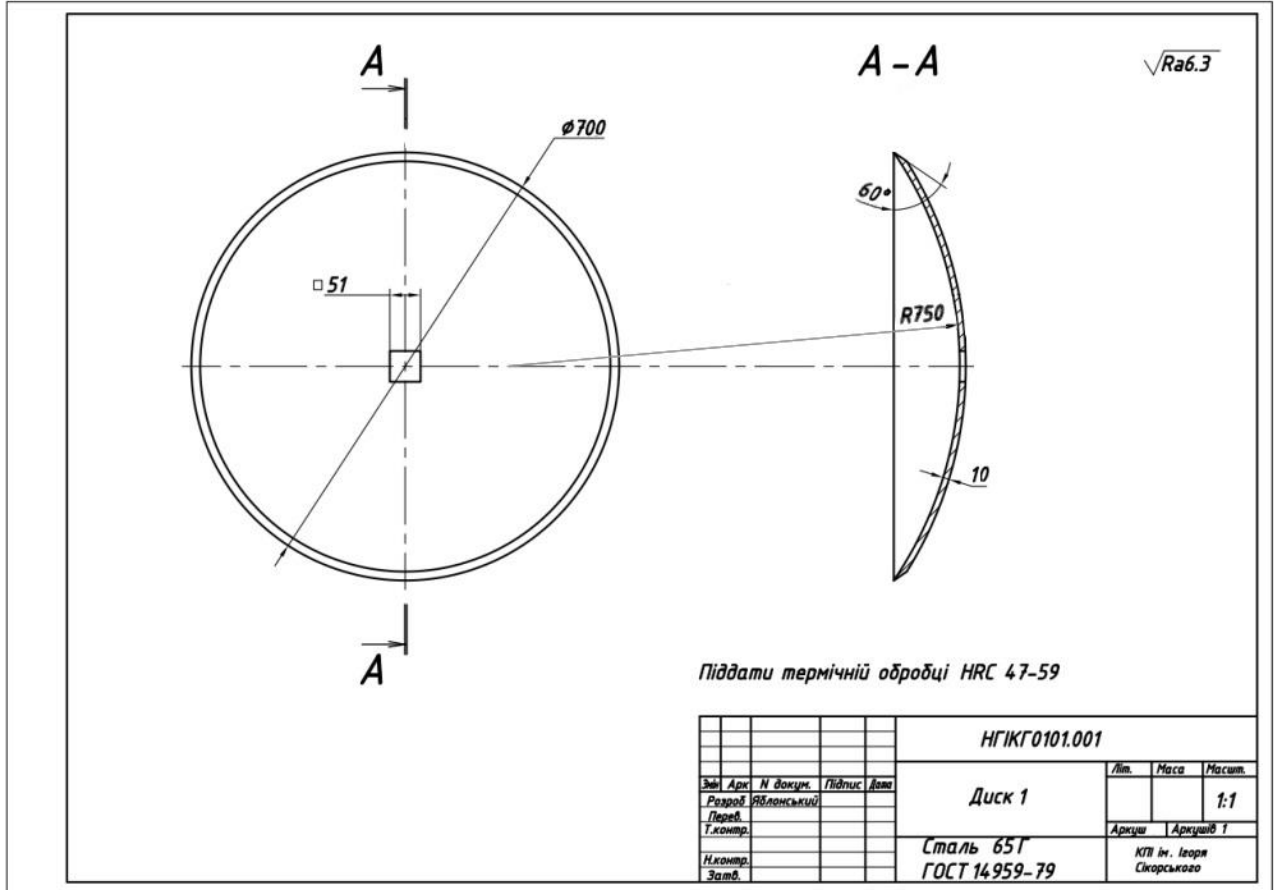


Рис. А.15. Диск 1

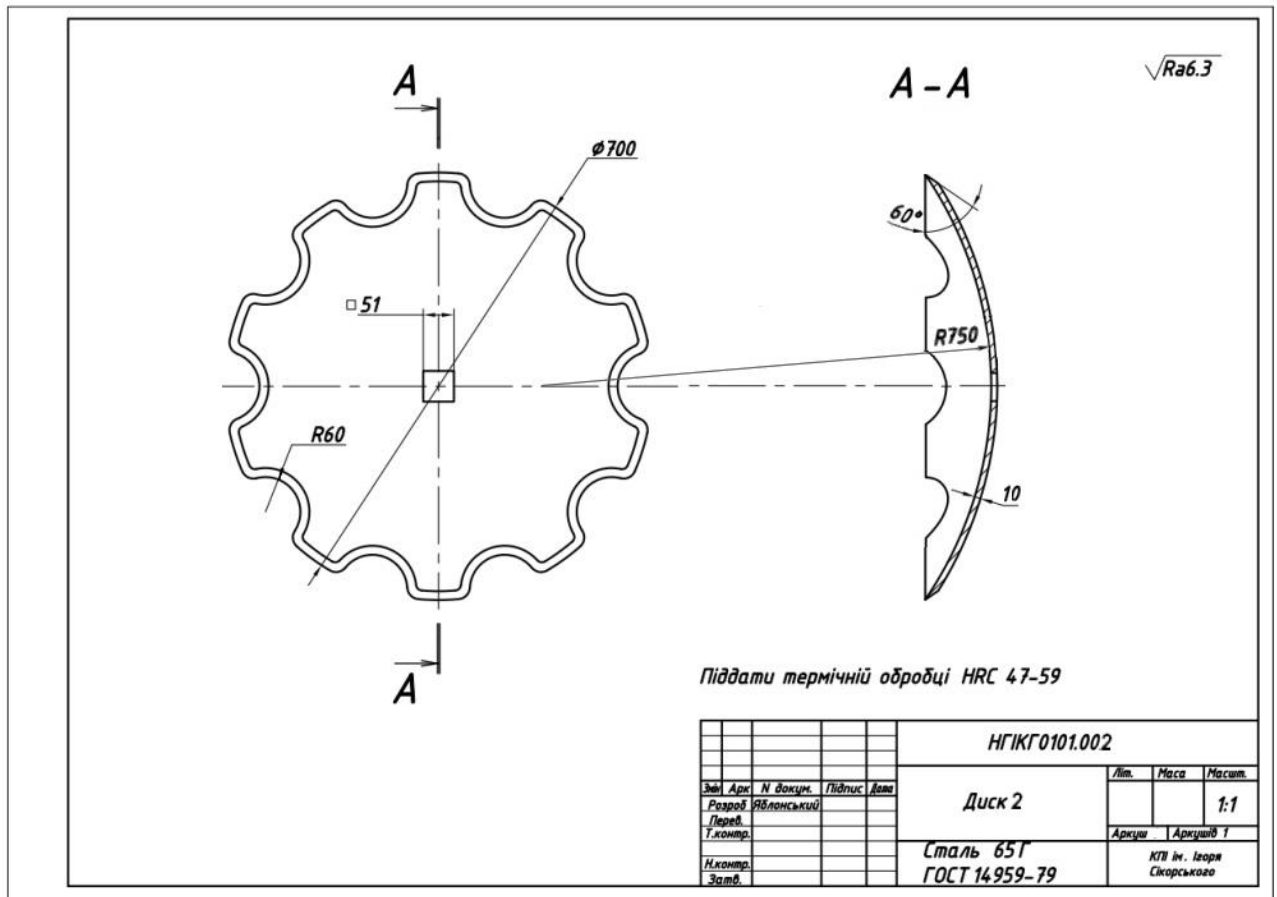


Рис. А.16. Диск 2

Диск 1 є сферичним без вирізів, а диск 2 – з круговими вирізами. Решта їхніх параметрів ідентичні.

А.4. До моделювання процесів обробітку ґрунту

Ця частина додатків містить деякі ілюстрації до наведених у п'ятому розділі дисертації відомостей щодо опрацювання розглянутих процесів обробітку ґрунту. Стосується проектування, конструювання та експлуатації лемішно-полицевих плугів, ґрунтообробних дискових знарядь, лапових культиваторів і культиваторів-сошників.

Лемішно-полицеві плуги

На рис. А.17 ... А.20 подано компоненти конструкції, зображеного на рис. 5.12 плуга. Мається на увазі рама (рис. А.17), корпус (рис. А.18), опорне колесо (рис. А.19) та начіпний пристрій (рис. А.20). Зазначені технічні об'єкти розраховуються на міцність у комп'ютерних системах методом скінченних елементів.

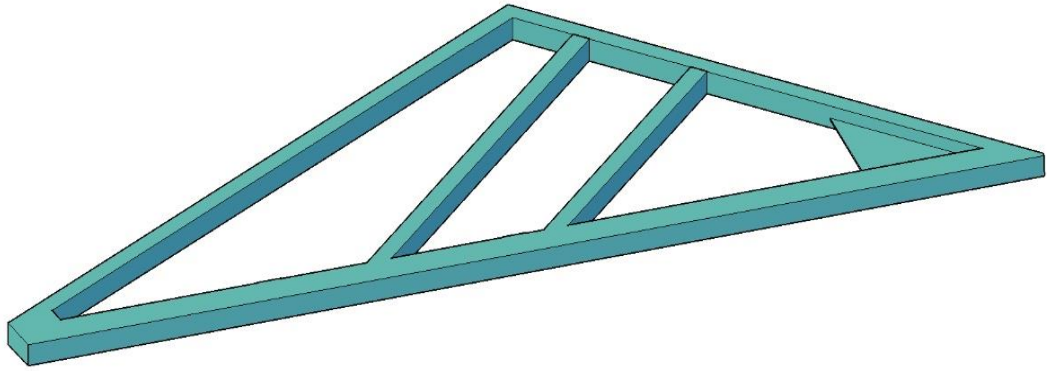


Рис. А.17. Рама

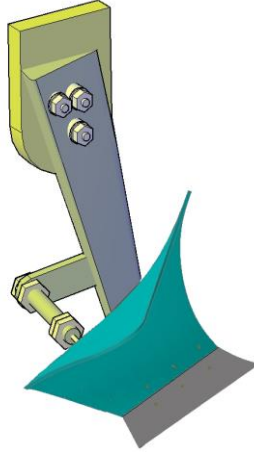


Рис. А.18. Корпус

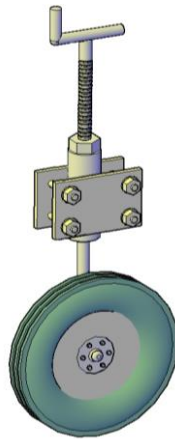


Рис. А.19. Опорне колесо з гвинтовим механізмом

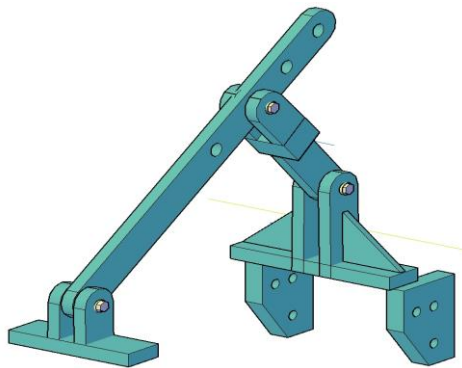


Рис. А.20. Начіпний пристрій

Зауважимо, що показані вище деталі відносяться до стадії ескізного проєктування плуга, тому мають спрощений концептуальний характер. Це також полегшує проведення та підвищує продуктивність виконання різноманітних варіантних розрахунків, зокрема, на міцність, вагових, економічних і т. д. Після визначення раціонального різновиду плуга переходять до стадії технічного проєкта, яка забезпечує формуванням повного уявлення про даний об'єкт, Завершальним, із точки зору конструювання, є створення належного комплексу робочої документації.

Ґрунтообробні дискові знаряддя

Тут наведено, для порівняння з викладеними в пункті 5.3.1 дисертації відомостями стосовно диска діаметром $D=700$ мм, відповідну інформацію про диск діаметром $D=500$ мм.

Для висоти гребенів $c=50$ мм

$$D_c = 2\sqrt{c(D-c)} = 2\sqrt{50 \text{ мм} \cdot (500 \text{ мм} - 50 \text{ мм})} \approx 300 \text{ мм};$$

$$u_{\min} = \arcsin\left(1 - \frac{2c}{D \cos \beta}\right) \cdot 180 / \pi^\circ =$$

$$\arcsin\left(1 - \frac{2 \cdot 50 \text{ мм}}{500 \text{ мм} \cdot \cos 0^\circ}\right) \cdot 180 / \pi^\circ \approx 53,13^\circ.$$

Тоді маємо для:

$$- \beta = 15^\circ$$

$$c_\beta = c \cdot \cos \beta = 50 \text{ мм} \cdot \cos(15^\circ) \approx 48,3 \text{ мм};$$

$$- \beta = 30^\circ$$

$$c_\beta = c \cdot \cos \beta = 50 \text{ мм} \cdot \cos(30^\circ) \approx 43,3 \text{ мм};$$

$$- \alpha = 30^\circ$$

$$b_c = D_c \cdot \sin \alpha = 300 \text{ мм} \cdot \sin 30^\circ = 150 \text{ мм};$$

$$- \alpha = 40^\circ$$

$$b_c = D_c \cdot \sin \alpha = 300 \text{ мм} \cdot \sin 40^\circ \approx 192,84 \text{ мм};$$

$$- \alpha = 50^\circ$$

$$b_c = D_c \cdot \sin \alpha = 300 \text{ мм} \cdot \sin 50^\circ \approx 229,81 \text{ мм}.$$

Отримані профілі борозни показано на рис. А.21.

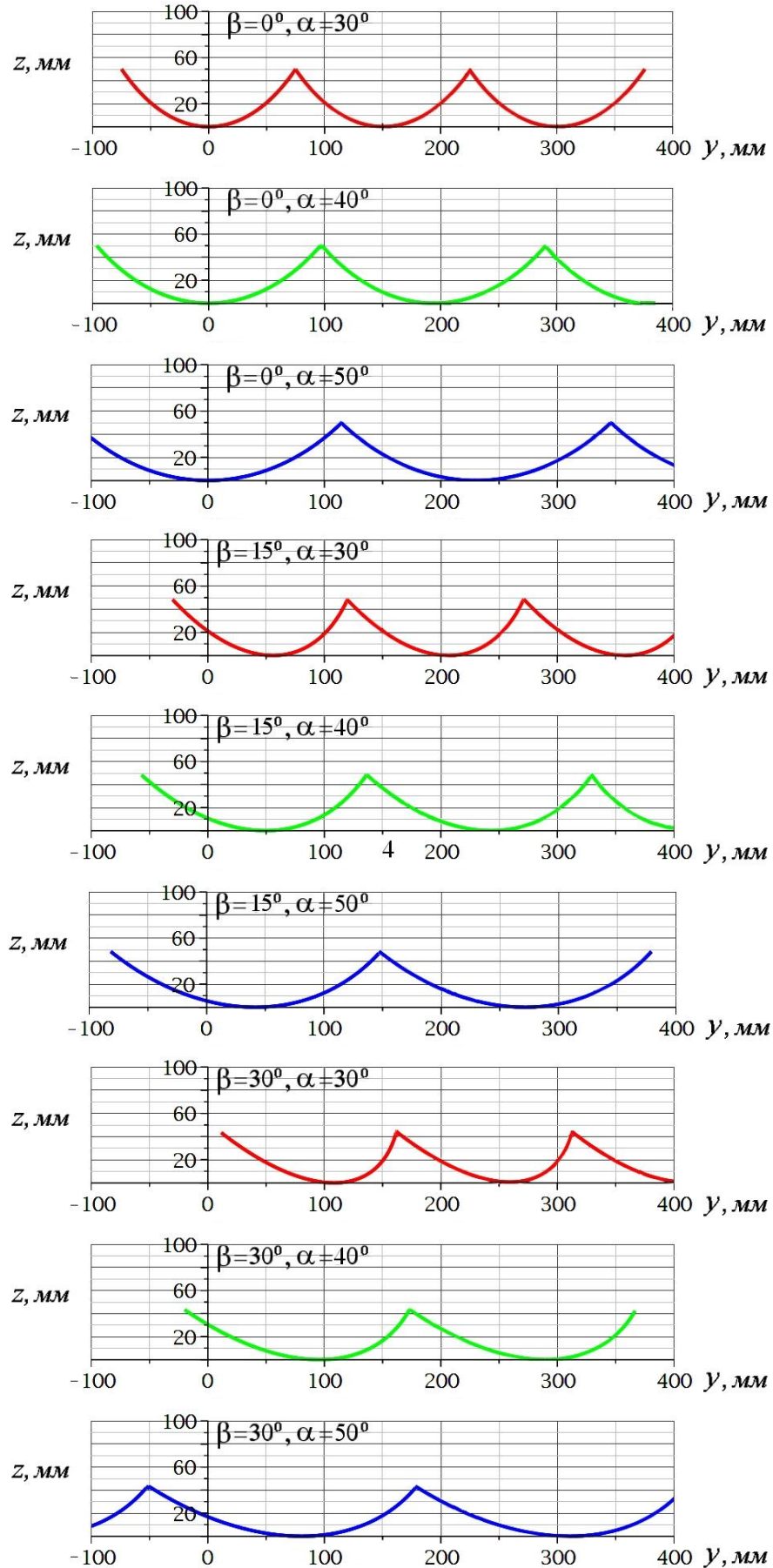


Рис. А.21. Профілі борозни диска діаметром $D=500$ мм

Лапові культиватори

На рис. А.22 та рис. А.23 наведено приклади компоновання розглянутого в підрозділі 5.4 культиватора суцільного обробітку ґрунту різними стрічастими лапами.

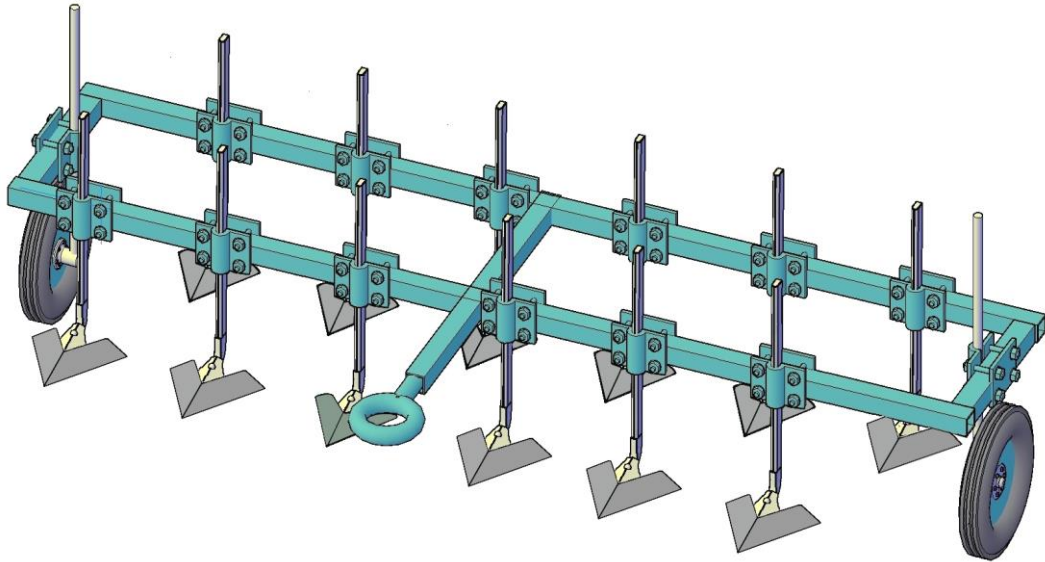


Рис. А.22. Компоновання лапами 1

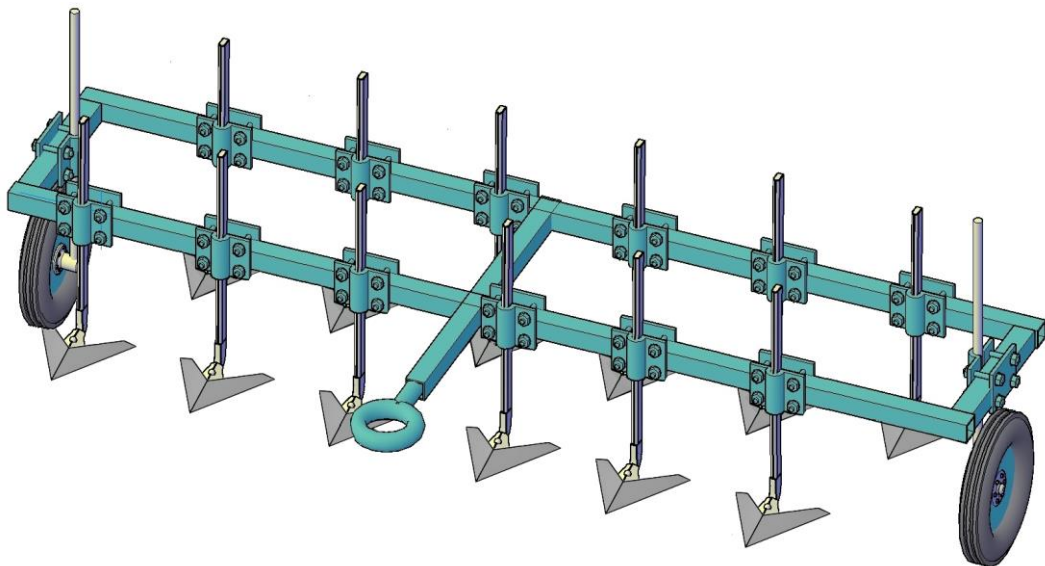


Рис. А.23. Компоновання лапами 2

Як зазначалось, це дозволяє підвищувати ефективність практичного використання сільськогосподарських знарядь шляхом гнучкого їхнього адаптування до умов експлуатації в залежності від типу та агрофізичного стану оброблюваних ґрунтів, наявних агротехнічних вимог, існуючого тракторного парку і т. д.

Культиватори-сошники

Базові типи стрілочастих лап відповідно до виконуваних ними технологічних процесів приведені в табл. А.10.

Стрілочасті лапи *Таблиця А.10*

| <i>Назва</i> | <i>Вигляд</i> | <i>Призначення</i> |
|--------------------|---|---|
| Плоскорізальна |  | Підрізання кореневищ бур'янів |
| Розпушувальна |  | Розпушування та подрібнення ґрунту |
| Підживлювальна |  | Підживлення рослин рідкими добривами |
| Полицева |  | Присипання бур'янів у захисних зонах рядків |
| Підгортувальна |  | Підгортання рослин при вирощуванні |
| Культиватор-сошник |  | Пряма сівба |

Головним призначенням стрілочастих лап від початку їхньої появи було знищення бур'янів шляхом підрізання кореневої системи та розпушення ґрунту при суцільному основному та поверхневому обробітку. Для міжрядь згодом почали використовувати культиватори з лапами-підживлювачами, що одночасно з розпушенням ґрунту забезпечують внесення добрив. Подальші вдосконалення форми стрілочастих лап проривних культиваторів пов'язані з агротехнічними

прийомами міжрядного обробітку посівів. З метою присипання бур'янів або підгортання рослин ґрунт за допомогою полицевих поверхонь-підгортачів переміщується з міжряддя в захисну зону рядків. Упродовж останніх років закордонні й вітчизняні фермери почали широко впроваджувати у виробництво просапних технічних культур технологію прямої сівби, де також застосовуються виконані у формі стрілчастих лап-культиваторів комбіновані сошники, див. рис. А.24.

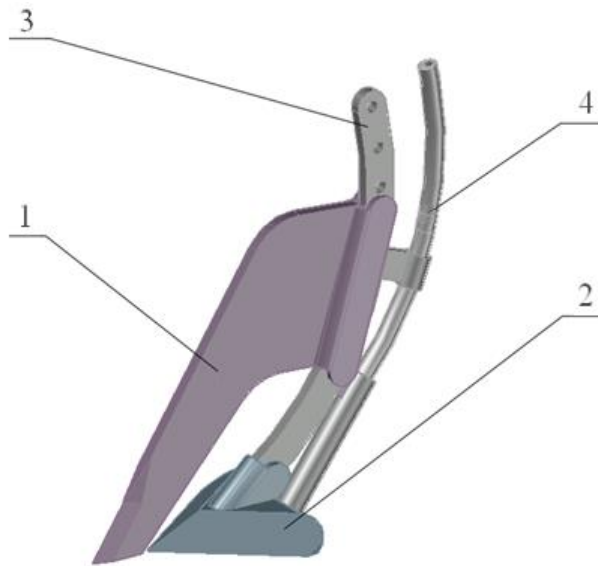


Рис А.24. Комбінований сошник сівалки:

1 – розпушувальний зуб; 2 – стрілчаста лапа; 3 – стояк; 4 – насіннепровід

Під час руху зуб 1 формує щілину у стерні та частково розпушує ґрунт. Стрілчаста лапа 2 підрізає бур'яни, вирівнює дно борозни, ущільнюючи ложе для насіння, яке подається через насіннепровід 4, рівномірно вкладається вздовж борозни й накривається шаром ґрунту, що сходить зі стрілчастої лапи.

Для визначення тягового опору комбінованого сошника технологічний процес розглядається за умови однорідності ґрунту, рівномірності глибини обробітку та швидкості сівалки. Тоді загальну величину тягового опору сошника можна представити як

$$R_c = R_z + R_l, \quad (\text{A.23})$$

де R_z та R_l – тяговий опір відповідно розпушувального зуба та лапи, κH .

У виразі (А.23) другий доданок залежить від коефіцієнта, який назвемо *динамічним показником впливу на деформацію ґрунту* встановленого спереду лапи зуба, що полегшує її роботу

$$R_{л} = R_{сл} - k \cdot R_{сл} = (1 - k) \cdot R_{сл}, \quad (\text{А.24})$$

де $R_{сл}$ – тяговий опір безпосередньо окремої стрілкової лапи, κH ;

k – динамічний коефіцієнт, що залежить від величини деформації ґрунту розпушувальним зубом.

Значення k у формулі (А.24) визначається залежністю

$$k = \frac{S_3}{S_{л}} = \frac{(b_3 + b_{д}) \cdot a}{B \cdot a} = \frac{b_3 + b_{д}}{B}, \quad (\text{А.25})$$

де S_3 , $S_{л}$ – площі зон деформації зубом і лапою в поперечно-вертикальній площині, m^2 ;

b_3 – ширина зуба, m ;

$b_{д}$ – величина розповсюдження деформації ґрунту, m ;

B – ширина захвату стрілкової лапи, m ;

a – глибина обробітку ґрунту, m .

Аналіз співвідношень (А.23) ... (А.25) показує, що при:

– $k=0$, тобто відсутності розпушувального зуба, тяговий опір сошника дорівнює тяговому опору окремої стрілкової лапи

$$R_c = R_{сл}, \quad (\text{А.26})$$

оскільки в даному випадку

$$R_3 = 0. \quad (\text{А.27})$$

– $k=1$, тобто ширині зуба з розповсюдженою деформацією ґрунту, які в сумі дорівнюють ширині захвату стрілкової лапи, тяговий опір сошника дорівнює тяговому опору розпушувального зуба

$$R_c = R_3. \quad (\text{А.28})$$

У реальних умовах $0 < k < 1$. Отже, залежності (А.23) ... (А.28) належним чином описують вплив розглянутих геометричних параметрів на силові показники наведеного комбінованого культиватора-сошника.

А.5. Отримані патенти на корисні моделі



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **150362** (13) **U**
 (51) МПК (2022.01)
A01B 9/00

НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН
 ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
 ВЛАСНОСТІ
 ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО
 "УКРАЇНСЬКИЙ ІНСТИТУТ
 ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
 ВЛАСНОСТІ"

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: **u 2021 05694**
 (22) Дата подання заявки: **08.10.2021**
 (24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності: **03.02.2022**
 (46) Публікація відомостей про державну реєстрацію: **02.02.2022, Бюл.№ 5**

(72) Винахідник(и):
**Ванін Володимир Володимирович (UA),
 Вірченко Геннадій Анатолійович (UA),
 Козловський Андрій Геннадійович (UA),
 Кувшинов Олексій Валентинович (UA),
 Юрчук Володимир Петрович (UA),
 Яблонський Петро Миколайович (UA)**
 (73) Володілець (володільці):
**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ
 УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ "КИЇВСЬКИЙ
 ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ
 СІКОРСЬКОГО",
 просп. Перемоги, 37, Київ-56, 03056 (UA)**
 (74) Представник:
Пасічник Віталій Анатолійович

(54) ПЛУГ РОТАЦІЙНИЙ ҐРУНТООБРОБНИЙ**(57) Реферат:**

Плуг ротаційний ґрунтообробний містить змонтований на рамі привідний барабан із горизонтальною віссю обертання та закріплені на ньому ножі П-подібної форми з робочими (активними) пластинами, що кріпляться за напрямками дотичних до привідного барабана ротаційного плуга. При цьому кожна із активних пластин розділена в периферійній частині на щонайменше дві або більше окремі, зігнуті до центра обертання, ділянки.

UA 150362 U



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **81749** (13) **U**
 (51) МПК (2013.01)
B23K 10/00

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА
 ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
 ВЛАСНОСТІ
 УКРАЇНИ

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: **u 2013 00775**
 (22) Дата подання заявки: **22.01.2013**
 (24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: **10.07.2013**
 (46) Публікація відомостей про видачу патенту: **10.07.2013, Бюл.№ 13**

(72) Винахідник(и):
**Юрчук Володимир Петрович (UA),
 Карпюк Віталій Володимирович (UA),
 Бакалова Валентина Миколаївна (UA),
 Яблонський Петро Миколайович (UA),
 Святина Михайло Анатолійович (UA)**
 (73) Власник(и):
**Юрчук Володимир Петрович,
 вул. Борщагівська, 97-а, корп. 2, кв. 33, м.
 Київ-56, 03056 (UA),
 Карпюк Віталій Володимирович,
 вул. Мельникова, 36/1, кв. 5, м. Київ, 03046
 (UA),
 Бакалова Валентина Миколаївна,
 вул. Флоренції, 12-а, кв. 16, м. Київ-002,
 02002 (UA),
 Яблонський Петро Миколайович,
 пр. Правди, 3, кв. 166, м. Київ, 03074 (UA),
 Святина Михайло Анатолійович,
 вул. Волкова, 20-а, кв. 24, м. Київ, 02166
 (UA)**
 (74) Представник:
Юрчук Володимир Петрович

(54) КОМБІНОВАНИЙ ҐРУНТООБРОБНИЙ ДИСК**(57) Реферат:**

Комбінований ґрунтообробний диск геометрично складається із сферичних поясів, послідовно поєднаних між собою. Сферичні пояси у сукупності утворюють у радіальному напрямку від периферії до осі обертання диска випукло-ввігнутий профіль твірної диска.

UA 81749 U



ДЕРЖАВНА СЛУЖБА
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ
УКРАЇНИ

УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **84233** (13) **U**
(51) МПК (2013.01)
A01B 7/00

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

| | |
|--|---|
| <p>(21) Номер заявки: u 2013 05691</p> <p>(22) Дата подання заявки: 30.04.2013</p> <p>(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: 10.10.2013</p> <p>(46) Публікація відомостей про видачу патенту: 10.10.2013, Бюл.№ 19</p> | <p>(72) Винахідник(и): Юрчук Володимир Петрович (UA), Карпюк Віталій Володимирович (UA), Яблонський Петро Миколайович (UA), Макаров Василій Іванович (UA), Святина Михайло Анатолійович (UA)</p> <p>(73) Власник(и): Юрчук Володимир Петрович, вул. Борщагівська, 97-а, к. 2, кв. 33, м. Київ, 03056 (UA), Карпюк Віталій Володимирович, вул. Мельникова, 36/1, кв. 5, м. Київ, 02035 (UA), Яблонський Петро Миколайович, пр. Правди, 3, кв. 166, м. Київ, 04074 (UA), Макаров Василій Іванович, вул. Лайоша Гаєро, 9-є, кв. 119, м. Київ, 04211 (UA), Святина Михайло Анатолійович, вул. Волкова, 20-а, кв. 24, м. Київ, 01166 (UA)</p> <p>(74) Представник: Юрчук Володимир Петрович</p> |
|--|---|

(54) ДИСКОВИЙ КОПАЧ**(57) Реферат:**

Дисковий копач містить стійку, підшипникові вузли, редуктор приводу та два диски. Кожен із дисків конструктивно складається із двох плоскопаралельних кілець: зовнішнього кільця-обода та внутрішнього кільця-маточини, що з'єднані між собою випуклою поверхнею обертання.

UA 84233 U



ДЕРЖАВНА СЛУЖБА
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ
УКРАЇНИ

УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **85964** (13) **U**
(51) МПК (2013.01)
A01B 7/00

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

| | |
|--|---|
| <p>(21) Номер заявки: u 2013 06664</p> <p>(22) Дата подання заявки: 28.05.2013</p> <p>(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: 10.12.2013</p> <p>(46) Публікація відомостей про видачу патенту: 10.12.2013, Бюл.№ 23</p> | <p>(72) Винахідник(и): Юрчук Володимир Петрович (UA), Вознюк Тарас Анатолійович (UA), Яблонський Петро Миколайович (UA), Святина Михайло Анатолійович (UA), Ізволєнська Ада Євгенівна (UA), Глінський Євген Миколайович (UA)</p> <p>(73) Власник(и): Юрчук Володимир Петрович, вул. Борщагівська, 97-а, корп. 2, кв. 33, м. Київ-56, 03056 (UA), Вознюк Тарас Анатолійович, вул. Тарасівська, 36, кв. 7, м. Київ-33, 01033 (UA), Яблонський Петро Миколайович, пр. Правди, 3, кв. 166, м. Київ-54, 03054 (UA), Святина Михайло Анатолійович, вул. Волкова, 20-а, кв. 24, м. Київ-66, 02660 (UA), Ізволєнська Ада Євгенівна, пр. Перемоги, 19, кв. 110, м. Київ-56, 03056 (UA), Глінський Євген Миколайович, вул. Металістів, 5, гурт. 15, кв. 6-11, м. Київ- 56, 03056 (UA)</p> |
|--|---|

(54) ДИСКОВА БОРОНА**(57) Реферат:**

Дискова борона містить сталеві загострені диски, закріплені на осі, у кожному з яких є щільні отвори, в яких змонтовані різальні ножі. Напрямок лінії розміщення різальних ножів виконаний по циклоїді.

UA 85964 U



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **138616** (13) **U**

(51) МПК (2019.01)

B07B 1/36 (2006.01)**B07B 7/00****B07B 7/083** (2006.01)

МІНІСТЕРСТВО РОЗВИТКУ
ЕКОНОМІКИ, ТОРГІВЛІ ТА
СІЛЬСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА
УКРАЇНИ

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

| | |
|---|---|
| (21) Номер заявки: u 2019 04387 | (72) Винахідник(и): Кувшинов Олексій Валентинович (UA), Юрчук Володимир Петрович (UA), Яблонський Петро Миколайович (UA) |
| (22) Дата подання заявки: 23.04.2019 | (73) Власник(и): НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ "КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО", просп. Перемоги, 37, м. Київ-56, 03056 (UA) |
| (24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: 10.12.2019 | |
| (46) Публікація відомостей про видачу патенту: 10.12.2019, Бюл.№ 23 | |

(54) СОРТУВАЛЬНИЙ СТІЛ КАРТОПЛЕЗБИРАЛЬНОГО КОМБАЙНА**(57) Реферат:**

Сортувальний стіл картоплезбирального комбайна складається з підпружинених дисків для видалення бадилля, просіюючого транспортера, транспортера для видалення бадилля, очищувальних транспортерів, транспортера-вантажника та струшувачів. Транспортувальний стіл містить чотирирядні калібровані диски певного діаметра, на яких встановлені прямокутні комірки, зазор між якими змінюється залежно від розміру картоплі.

UA 138616 U

ДОДАТОК Б
ДОКУМЕНТИ ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ
ДИСЕРТАЦІЙНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

Розроблені в дисертації теоретичні положення, способи, прийоми, алгоритми та методики інтегрованого комплексного геометричного моделювання ґрунтообробних знарядь впроваджено:

– в Іванівській дослідно-селекційній станції Інституту біоенергетичних культур і цукрових буряків Національної академії аграрних наук України при виконанні обробітку ґрунту перед сівбою сільськогосподарських культур дисковими робочими органами, виготовленими за запропонованими в дисертаційній роботі геометричними моделями. Результати практичного застосування на різних полях загальною площею 150 га в порівнянні з серійними дисковими луцильниками ЛДГ-10 показали покращення показників якості кришення ґрунтів за умов різної твердості й вологості та зниження витрат пального;

– у фермерському господарстві «Павільйон флори» Миргородського району Полтавської області під час проведення лабораторно-польових експериментальних досліджень, виконаних за темою дисертаційної роботи. Дискова робоча поверхня ґрунтообробного знаряддя типу «ромашка» була виконана згідно з геометричною моделлю, розробленою здобувачем, випробувана у складі луцильника ЛДГ-10. Отримані результати не поступаються серійному культиватору УСМК-5,4Б за показниками агротехнічних вимог до проведення передпосівного обробітку ґрунту. У разі підвищеної твердості (3,5–3,75 МПа) та низької вологості (16-18,5 %) ґрунту переважають серійні робочі органи за показником кількості грудочок діаметром до 25 мм у розпушеному поверхневому шарі. Це забезпечило покращення якості кришення ґрунту і, як наслідок, підвищення польової схожості насіння. Результати дисертаційного дослідження впроваджені в технології виробництва просапних технічних культур протягом 2019–2021 рр. на площі 450 га;

– у навчальний процес Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» у вигляді запропонованих інваріантних узагальнених методик інтегрованого комплексного

геометричного моделювання технічних об'єктів при викладанні дисципліни «Інженерна та комп'ютерна графіка» студентам машинобудівних спеціальностей, створення ними деталей і складаних одиниць комп'ютерними засобами;

– у навчальний процес факультету інформатики та обчислювальної техніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» у вигляді запропонованих методик формування комплексних комп'ютерних геометричних моделей технічних об'єктів під час викладання дисциплін «Комп'ютерна графіка та обробка зображень» і «Комп'ютерна графіка та мультимедіа». Зазначений підхід сприяє отриманню здобувачами вищої освіти практичних навичок опрацювання реальних промислових виробів у середовищі сучасних систем автоматизованого проєктування;

– у ТОВ «Інноваційні інженерні рішення» м. Києва у вигляді запропонованих способів і прийомів інтегрованого комплексного комп'ютерного моделювання при створенні проєктів будівельно-монтажних робіт, що дозволяє підвищити їхні техніко-економічні показники за рахунок продуктивного автоматизованого варіантного опрацювання застосовуваного електромонтажного обладнання та устаткування;

– у Науково-виробничому підприємстві «Техногаз» м. Полтави у вигляді розробленого комплексного підходу та способів інтегрованого комп'ютерного моделювання, що сприяє покращенню інтеграції таких складових комплексної підготовки газу, як блок сепарації, установки очищення, осушення, охолодження газу та дотискні компресорні станції. За рахунок цього підвищується ефективність забезпечення дотримання належних параметрів технологічного процесу підготовки природного газу.

Відповідні акти впровадження результатів дисертаційної роботи наведено на наступних аркушах.



Україна

ІВАНІВСЬКА ДОСЛІДНО-СЕЛЕКЦІЙНА СТАНЦІЯ
Інституту біоенергетичних культур і цукрових буряків
Національної академії аграрних наук України

Вул.П.І.Харитоненка, буд.1, с. Сонячне Охтирського р-ну Сумської області, 42768
 Розрахунковий рахунок UA77337568000000026000008605 у ТББВ 10018/050 АТ
 «Ощадбанк» у м.Суми
 МФО 337568 Код ЄДРПОУ 00729899
 тел./факс: 05446 96242, idssibk.com.ua, email: idssibk@gmail.com

20.06.2021 № 11

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Директор Іванівської ДСС
 Інституту біоенергетичних культур і цукрових
 буряків
 Національної академії аграрних наук України
 М.В. СОЛОШЕНКО
 20 червня 2021 року

**АКТ**

впровадження результатів дисертаційної роботи здобувача
 Яблонського Петра Миколайовича на тему «Інтегроване комплексне геометричне
 моделювання ґрунтообробних знарядь»

Комісія у складі:

голова комісії:

Власенко С.І. - заступник директора з наукової роботи, к.с.-г.н., с.н.с.;

члени комісії:


Борисов Д.В. – старший науковий співробітник Іванівської ДСС

Яблонський П. М. – здобувач, к.т.н., доцент кафедри нарисної геометрії,
інженерної та комп'ютерної графіки НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського»

Цим Актом засвідчуємо, що на Іванівській дослідно-селекційній станції ІБКіЦБ
 НААН при виконанні обробітку ґрунту перед сівбою сільськогосподарських

культур дисковими робочими органами, виготовленими за запропонованими в дисертаційній роботі здобувача Яблонського П. М. геометричними моделями, отримані позитивні результати. На різних полях загальною площею 150 га в порівнянні з серійним дисковим лушильником ЛДГ-10 експериментальний зразок дискової борони-культиватора забезпечив покращення показників якості кришення ґрунту за умов підвищеної твердості й вологості та зниження витрат пального.

Голова комісії

заступник директора з наукової роботи, к.с.-г.н., с.н.с.  Сергій Власенко

Члени комісії

старший науковий співробітник Іванівської ДСС  Дмитро Борисов

здобувач, к.т.н, доцент кафедри нарисної геометрії,


інженерної та комп'ютерної графіки НТУУ

«КПІ імені Ігоря Сікорського



Петро Яблонський

Гітиса заєвірко
начальник бюро
Власенко





Фермерське господарство "Павільйон Флори"

ЄДРПОУ 33368679

тел.0660172155

37600 м. Миргород, Полтавська

обл., вул.Комишнянська,221

lishchenko2017@gmail.com

Вих.№ 145

Від «27» вересня 2021 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ
Голова ФГ «Павільйон Флори»
Коваль В.С.
«27» вересня 2021 року

АКТ

про практичне впровадження результатів докторської дисертації «Інтегроване комплексне геометричне моделювання ґрунтообробних знарядь», виконаної доцентом кафедри нарисної геометрії, інженерної та комп'ютерної графіки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Яблонським Петром Миколайовичем

ФГ «Павільйон Флори» (м.Миргород, Миргородського району Полтавської області) підтверджує наступні основні результати лабораторно-польових експериментальних досліджень, виконаних за темою докторської дисертаційної роботи «Інтегроване комплексне геометричне моделювання ґрунтообробних знарядь» здобувача Яблонського П.М.

Дискова робоча поверхня ґрунтообробного знаряддя виконана по типу «ромашка» відповідно до геометричної моделі, розробленої здобувачем, випробувана у складі луцильника ЛДГ-10. Отримані результати не поступаються серійному культиватору УСМК-5,4Б за показниками агротехнічних вимог до проведення передпосівного обробітку ґрунту. А у разі підвищеної твердості (3,5-3,75 МПа) та низької вологості (16-18,5%) ґрунту переважають серійні робочі органи за показником кількості грудочок діаметром до 25 мм у розпушеному поверхневому шарі ґрунту. Це забезпечило покращення якості кришення ґрунту і, як наслідок, підвищення польової схожості насіння.

Результати дисертаційного дослідження здобувача Яблонського П.М. впроваджені у технології виробництва просапних технічних культур протягом 2020-2021 рр. на площі 300 га.

Головний агроном
ФГ «Павільйон Флори»

Коваль О.В.



Здобувач

Петро ЯБЛОНСЬКИЙ



УКРАЇНА
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

03056, м. Київ, пр-т Перемоги, 37, тел. (+36 044) 204-82-51, e-mail: fmf@kpi.ua

22.12.2022 № 3



ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з науково-педагогічної роботи

Олексій ЖУЧЕНКО

22 грудня 2022 року

АКТ

впровадження результатів докторської дисертації
 «Інтегроване комплексне геометричне моделювання ґрунтообробних знарядь»,
 виконаної Яблонським Петром Миколайовичем

Комісія у складі:

Голова – декан фізико-математичного факультету, д.т.н., проф. Ванін В.В.;

Члени комісії:

Вірченко Г. А. – завідувач кафедри нарисної геометрії, інженерної та комп'ютерної графіки, д.т.н., професор;

Голова О. О. – доцент кафедри нарисної геометрії, інженерної та комп'ютерної графіки, к.т.н., доцент

цим Актом засвідчуємо, що результати наукових досліджень Яблонського П. М., доцента кафедри нарисної геометрії, інженерної та комп'ютерної графіки фізико-математичного факультету КПІ ім. Ігоря Сікорського застосовуються у вигляді запропонованих ним інваріантних узагальнених методик інтегрованого комплексного геометричного моделювання технічних об'єктів під час викладання дисципліни «Інженерна та комп'ютерна графіка».

Голова комісії

д.т.н., професор

Володимир ВАНІН

Члени комісії

д.т.н., професор

Геннадій ВІРЧЕНКО

к.т.н., доцент

Ольга ГОЛОВА



УКРАЇНА

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ

«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ

імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

(КПІ ім. Ігоря Сікорського)

ФАКУЛЬТЕТ ІНФОРМАТИКИ ТА ОБЧИСЛЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ

03056, м. Київ, пр-т Берестейський, 37; тел. (+38 044) 204-80-02 тел./факс (+38 044) 204-94-55

<https://www.mmi.kpi.ua> e-mail: mmi@kpi.ua ЄДРПОУ 02070921

26.12.2023 № 69/1

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Декан факультету інформатики

та обчислювальної техніки

КПІ ім. Ігоря Сікорського



Ярослав КОРНАГА

2023 р.

АКТ

впровадження в навчальний процес факультету інформатики та обчислювальної техніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» результатів докторської дисертаційної роботи Яблонського Петра Миколайовича «Інтегроване комплексне геометричне моделювання ґрунтообробних знарядь»

Ми, ті що нижче підписалися: професор кафедри інформаційних систем та технологій, д.т.н., доц. Поліщук М.М., доцент кафедри інформаційних систем та технологій, к.т.н., доц. Ткач М.М., доцент кафедри інформатики та програмної інженерії, к.т.н., доц. Ліхоузова Т.А. цим актом засвідчуємо що результати наукових досліджень Яблонського П. М., доцента кафедри нарисної геометрії, інженерної та комп'ютерної графіки фізико-математичного факультету КПІ ім. Ігоря Сікорського застосовуються у вигляді запропонованих ним методик формування комплексних

комп'ютерних геометричних моделей технічних об'єктів під час викладання дисциплін «Комп'ютерна графіка та обробка зображень» і «Комп'ютерна графіка та мультимедіа». Зазначений підхід сприяє отриманню здобувачами вищої освіти практичних навичок опрацювання реальних промислових виробів у середовищі сучасних систем автоматизованого проектування.

Професор кафедри
інформаційних систем та технологій,
д.т.н., доц.



Михайло ПОЛІЩУК

Доцент кафедри
інформаційних систем та технологій,
к.т.н., доц.



Михайло ТКАЧ

доцент кафедри
інформатики та програмної інженерії,
к.т.н., доц.



Тетяна ЛІХОУЗОВА



Товариство з обмеженою відповідальністю "Інноваційні інженерні рішення"

03148, м. Київ, Святошинський р-н
вул. Пшенична, будинок 2, офіс 323
тел. 0993010720

код за ЄДРПОУ 41128239
Р/р UA883348510000000002600895625
в АТ "Перший Український Міжнародний
Банк" МФО 334851

№ 67/1 від «20» вересня 2023 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ
Директор
ТОВ «Інноваційні інженерні рішення»
Олег КИРПАЧ
«20» вересня 2023 р.

АКТ

про впровадження наукових результатів докторської дисертації
«Інтегроване комплексне геометричне моделювання ґрунтообробних знарядь», що
виконана Яблонським Петром Миколайовичем

Отримані в дисертації Яблонського Петра Миколайовича «Інтегроване комплексне геометричне моделювання ґрунтообробних знарядь» наукові результати у вигляді запропонованих способів і прийомів інтегрованого комплексного комп'ютерного моделювання використовується ТОВ «Інноваційні інженерні рішення» при створенні проєктів будівельно-монтажних робіт. Це дозволяє підвищити техніко-економічні показники проєктів за рахунок продуктивного автоматизованого варіантного опрацювання застосовуваного електромонтажного обладнання та устаткування.

Головний інженер

Андрій ОСИПЕНКО



36008, м. Полтава, вул. Автобазівська 7
 тел./факс (0532) 599-133; e-mail: office@tehnogas.com
 р/р UA563052990000026008031201884
 АТ КБ «ПРИВАТБАНК», код ЄДРПОУ 37592714

№ 04/T/10-22/2
 від 04 жовтня 2022 року

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор
 ТОВ «НВП ТЕХНОГАЗ»

Віталій БСЛОВ
 «04» жовтня 2022 року



АКТ

впровадження результатів докторської дисертації
 «Інтегроване комплексне геометричне моделювання ґрунтообробних знарядь»,
 виконаної Яблонським Петром Миколайовичем

Даним актом засвідчуємо, що запропонований в дисертації Яблонського Петра Миколайовича «Інтегроване комплексне геометричне моделювання ґрунтообробних знарядь» комплексний підхід та способи інтегрованого комп'ютерного моделювання впроваджені в ТОВ «НАУКОВО-ВИРОБНИЧЕ ПІДПРИЄМСТВО ТЕХНОГАЗ». Це сприяє покращенню інтеграції таких складових комплексної підготовки газу, як блок сепарації, установки очищення, осушення, охолодження газу та дотискні компресорні станції. За рахунок цього підвищується ефективність забезпечення дотримання належних параметрів технологічного процесу підготовки природного газу.

Головний інженер проєктів
 ТОВ «НВП ТЕХНОГАЗ»

Тарас ПОДОЛЯК

ДОДАТОК В

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА 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. 368 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 сільськогосподарського 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 агротехнологічного 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/ukr/content/download/82020/475556/file/ВІСНИК_№3\(62\)_Том_2.pdf](https://kntu.net.ua/ukr/content/download/82020/475556/file/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 ґрунтообробних 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 стрілкової 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 стрілкових 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 проектуванні 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: УкрНДІПВТ 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 Безьє 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 Безьє.

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., Святиня 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-runtoobrobnijj-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., Святиня 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., Святиня 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. <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. <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. <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 землерийних 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 землерийних 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. 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 землерийної 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. https://geometry.kpi.ua/files/IIconference_geometry_FMF.pdf

Особистий внесок здобувача: запропоновано зміну геометричної форми робочих граней зуба землерийної машини.

42. Яблонський П.М., Гребелюк І.В., Святиня 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. 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. 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. 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. https://mkmm.org.ua/upload/МАТЕРІАЛИ_MKMM-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. 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. 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. 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.
https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u231/obuhovski_chitannya_2020_tezi.pdf

Особистий внесок здобувача: запропоновано методику 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.
http://eprints.library.odku.edu.ua/id/eprint/6987/1/VelykodniySS_Upravlinnja_vidkr_ytym_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.
http://eprints.library.odku.edu.ua/id/eprint/6987/1/VelykodniySS_Upravlinnja_vidkr_ytym_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). <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. https://ng-kg.kpi.ua/files/konferencii/2022/Збірник_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. <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. 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. 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.

<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.

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.

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. 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. <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. https://ng-kg.kpi.ua/files/Збірник_2024_Остат_вар.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.

Відомості про апробацію результатів 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.).