

Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»
Міністерство освіти і науки України
Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

КОРОБЧИНСЬКИЙ КИРИЛ ПЕТРОВИЧ

УДК 004.942:004.921(043)

ДИСЕРТАЦІЯ

МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ КОМПОЗОВАННОГО
СИНТЕЗУ ПРОСТОРОВИХ ОБ'ЄКТІВ

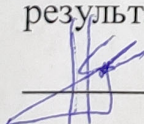
05.13.06 – інформаційні технології

технічні науки

галузь знань

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

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

 К.П. Коробчинський

Науковий керівник Яковлев Сергій Всеволодович,
доктор фізико-математичних наук, професор

Всі примірники дисертації ідентичні за змістом.

Учений секретар спеціалізованої

вченої ради К 64.055.03 М.Ю. Лосев



Харків – 2019

АНОТАЦІЯ

Коробчинский К.П. Моделі та методи інформаційної технології компоновочного синтезу просторових об'єктів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.06 – інформаційні технології. – Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця, МОН України, Харків, 2019.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню наукової задачі, яка полягає у впровадженні інформаційних технологій підтримки та прийняття рішень при синтезі складних технічних систем з урахуванням просторової форми складових об'єктів та додаткових геометричних обмежень. Важливим класом таких задач є задачі транспортної логістики та логістики складування, компоновки аерокосмічних об'єктів, підвищення безпеки паливно-енергетичних комплексів, реалізації новітніх технологій 3D друку тощо, які безпосередньо зв'язані з урахуванням форми відповідних прототипів та обмежень на їх взаємне розташування. Процес створення таких об'єктів переважно базується на технологіях оброблення, перетворення та зберігання геометричної інформації про матеріальні об'єкти на основі побудови інформаційно-аналітичних моделей задач, котрі виникають, та впровадження сучасних інформаційних технологій.

У роботі розглянуто традиційні підходи до розв'язання задач синтезу оптимальних конфігурацій просторових об'єктів. Останнім часом вони стрімко розвиваються. Це обумовлено появою адекватних моделей, методів і новітніх інтелектуальних інформаційних технологій, які кардинально підвищують якість, надійність і точність отриманих рішень і можуть бути реалізовані незалежно від предметної області за допомогою зовнішніх додатків, розроблених користувачем. При цьому якість рішень оцінюється й порівнюється за значеннями вибраних критеріїв, необхідними потребами в обчислювальних ресурсах (час розв'язання задачі, місткість пам'яті та ін.).

Розроблення сучасних інформаційних систем для розв'язання задач синтезу оптимальних конфігурацій складних просторових об'єктів потребує побудови математичних моделей в автоматичному режимі. При цьому процес комп'ютерного моделювання з урахуванням перетворення геометричної інформації та візуалізації отриманих рішень має творчий характер і є одним із найбільш складних і відповідальних етапів. Цей процес безпосередньо зв'язаний зі створенням інформаційної технології, яка будується на інформаційно-аналітичних і об'єктно-орієнтованих моделях предметної області й вимагає розроблення ефективних методів оптимізації рішень.

Аналіз наукової літератури за темою дисертації показав, що існує широкий клас задач компоновочного синтезу конфігурацій, в яких необхідно враховувати просторові форми об'єктів. Зазвичай використовують базові об'єкти, які мають форму паралелепіпеду, конусу, багатокутнику, сферичну форму та складні об'єкти із зазначеними складовими. До даного класу задач відносяться задачі компоновочного синтезу просторових об'єктів, які виникають в аерокосмічній галузі, логістики складування, в системах 3D-друку. Такі задачі мають свої особливості та потребують побудови відповідних математичних моделей та спеціальних методів їх розв'язання. Саме тому в роботі наведені неформальні постановки практичних задач компоновки бортового обладнання літальних апаратів, задач складування в логістичних системах та задачі, які виникають в сучасних технологіях 3D-друку.

У зв'язку зі складністю задач компоновки просторові конфігурації об'єктів довільної форми зазвичай не розглядають. При цьому метричні характеристики базових об'єктів вважаються фіксованими, за винятком хіба що розмірів контейнерів. Таким чином, розширення класу задач компоновочного синтезу на випадок довільних форм зі змінними метричними характеристиками об'єктів є надзвичай актуальною. Задачі компоновочного синтезу просторових об'єктів є оптимізаційними. У зв'язку з цим було наведено аналіз сучасних методів оптимізації, які виникають при розміщенні

просторових об'єктів в заданій області. На сучасному етапі ефективно розв'язання оптимізаційних задач геометричного проектування неможливе без використання інформаційних технологій, зв'язаних із представленням, зберіганням та перетворенням геометричної інформації про складові об'єкти й візуалізацією отриманих рішень.

В свою чергу розробка інформаційної технології вимагає побудови адекватних математичних моделей та ефективних методів оптимізації для зазначеного класу задач. З метою побудови інформаційно-аналітичної моделі компоновочного синтезу просторових об'єктів формалізовано поняття геометричної інформації про матеріальні об'єкти. Запропоновані такі компоненти геометричної інформації як просторова форма об'єкта, його метричні параметри та параметри розміщення. Форма об'єкта задається рівнянням його границі, а загальне розташування об'єкта у просторі характеризується рівнянням загального положення.

Сформований конфігураційний простір геометричного об'єкта на підставі якого розроблена його об'єктно-орієнтована модель. Узагальненими змінними конфігураційного простору вибрані метричні параметри та параметри розміщення об'єктів. Ця модель дозволяє за допомогою віртуальних методів забезпечити виконання афінних перетворень руху у просторі та у подальшому реалізувати теоретико-множинні операції над сукупністю геометричних об'єктів. При реалізації інформаційних технологій компоновочного синтезу просторових об'єктів запропонована об'єктно-орієнтована модель задає формат зберігання вихідних даних та дозволяє формувати на її основі структуру СКБД, поповнювати банк знань моделей тощо. Формалізовано поняття просторової конфігурації геометричних об'єктів. Виділені етапи процесу формування просторових конфігурацій та здійснення їх класифікація в залежності від системи геометричних і фізико-механічних обмежень.

Розроблено інформаційно-аналітичну модель задачі синтезу оптимальних просторових конфігурацій. Аналітична складова моделі описує

обмеження на узагальненні змінні конфігураційного простору ГО та формування критеріїв якості. Для формалізації умов неперетину об'єктів та її розташування в заданій області використовують апарат теорії Ф-функцій Ю. Г. Стояна. Здійснено розвиток теорії Ф-функцій на випадок змінних метричних параметрів. Наведено аналітичні вирази для Ф-функцій базових просторових об'єктів при змінних метричних параметрах (сфери, прямі паралелепіпеди, прямі кругові циліндри, кругові конуси, опуклі багатогранники тощо). Критеріями якості вибрано мінімум об'єму зайнятої частини простору, мінімум сумарної довжини мережі, яка з'єднує об'єкти, мінімальний небаланс системи.

Інформаційна складова моделі зв'язана з формуванням структури даних та створенням їх консолідованого сховища на базі об'єктно-орієнтованої моделі геометричних об'єктів. Крім даних аналітичної складової моделі зберігається інформація про процес оптимізації та візуалізації рішень. Консолідація даних будується з використанням технологій .NET Framework, ORM, Entity Framework, MS SQL Server.

Процес компоновочного синтезу просторових конфігурацій представлено функціональними діаграмами IDEF0 для інформаційних потоків та IDEF3 для опису дій при декомпозиції узагальнених процесів. За допомогою UML діаграм описано сценарії процесу оптимізації просторових конфігурацій як в автоматичному режимі так із залученням особи, яка приймає рішення. Для оптимізації просторових конфігурацій за вибраним критерієм якості здійснений аналіз існуючих оптимізаційних пакетів, на підставі якого було обґрунтовано вибір бібліотеки IpOpt пакету COIN-OR.

Запропоновано моделі та методи інформаційної технології компоновочного синтезу просторових об'єктів у випадку їх сферичної форми. Конкретизовано умови на взаємне розташування сферичних об'єктів та аналітичний вигляд критеріїв якості просторових конфігурацій.

Описано програмний додаток, який реалізує інформаційну технологію компоновочного синтезу сферичних об'єктів. Для пошуку локально-

оптимальних конфігурацій використано бібліотеку IpOpt. Для розрахунків використовувалась структура даних, яка відповідає класу сферичних об'єктів. При цьому вихідні дані, чисельні результати розрахунків та візуалізація отриманих конфігурацій зберігаються у консолідованому сховищі даних. Візуалізація рішень здійснюється як за допомогою розробленого програмного додатку (для 2D об'єктів), так і у 3Ds Max (для 3D об'єктів).

З метою покращення локально-оптимальних розв'язків запропоновано та теоретично обґрунтовано метод змінних радіусів. Наведено результати чисельних розрахунків, які підтверджують ефективність запропонованого підходу. Під час виконання розрахунків було досліджено витрати часу отримання локально-оптимального рішення для набору вихідних даних в залежності від різних параметрів: фіксований радіус, кількість кіл або куль (розглянуті задачі на площині і в тривимірному просторі), як задавалися точки початкового розміщення та при інших параметрах-настройках IpOpt. Було встановлено ряд переваг у тих чи інших варіантах поєднання параметрів при вирішенні конкретної задачі.

Розглянуто новий генетичний алгоритм розв'язання задач комбінаторної оптимізації для мінімізації небалансу системи дискретно розподілених мас. Наведені результати реалізації запропонованого генетичного алгоритму на тестовій задачі балансування мас об'єктів, які обертаються.

Матеріали дисертації достатньо повно викладені у 23 роботах: з них 6 статей у виданнях, які зазначені в переліку фахових видань України з технічних наук (5 публікацій, що входять до наукометричних баз), публікація – у Scopus, 15 тез доповідей на міжнародних конференціях та свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір.

Ключові слова: інформаційна технологія, база даних, консолідоване сховище даних, геометричний об'єкт, просторова конфігурація, компоновка, інформаційно-аналітична модель, оптимізація, особа, яка приймає рішення.

SUMMARY

Korobchynskyi K. P. Models and Methods of Information Technology for Layout Synthesis of Spatial Objects. – Manuscript copyright.

Thesis for a Candidate Degree in Engineering, specialty 05.13.06 – Information Technology. – Semen Kuznets Kharkiv National University of Economics, Kharkiv, 2019.

The dissertation is devoted to the solution of the scientific problem, which consists of the information technologies of support and decision making in the synthesis of complex technical systems introduction, taking into account the spatial shape of the constituent objects and additional geometric constraints. An important class of such problems are the problems of transport and warehousing logistics, layout of aerospace objects, improving the security of fuel and energy complexes, implementation of the latest 3D printing technologies, etc., which are directly related to the shape of the specific prototypes and restrictions on their relative location. The process of creating such objects is usually based on technologies for processing, transforming and storing geometric information about material objects through the construction of emerging information-analytical models problems and the introduction of modern information technologies.

In this paper, the traditional approaches for solving the problems of synthesis of optimal spatial object configurations were reviewed. In recent years, they have developed rapidly, due to the emergence of adequate models, methods and the latest intelligent information technologies that dramatically improve the quality, reliability and accuracy of the solutions obtained and can be implemented regardless of subject area through external applications developed by the user. At the same time, the quality of the decisions is evaluated and compared against the values of the selected criteria, the necessary requirements for computing resources (time of solving the task, storage capacity, etc.).

Developing modern information systems to solve the problems of synthesis of optimal configurations of complex spatial objects requires a construction of

mathematical models in the automatic mode. The process of computer simulation is geometric conversion information and visualization of the obtained decisions is creative character and it is one of the most difficult and responsible stages. This process is directly linked to the creation of information technology, built on information analytics and object-oriented domain models, it requires the development of effective methods for optimizing solutions.

The analysis of the scientific literature on the topic of the dissertation showed that there is a wide class of problems of layout synthesis of configurations in which the spatial forms of objects should be considered. Basic objects that have a spherical shape are generally used, parallelepiped shapes, cones, polygons, and complex objects with the indicated components. This class of tasks include the tasks of layout synthesis of spatial objects arising in the aerospace industry, warehousing logistics, and 3D printing systems. Such problems have their own peculiarities and require the construction of appropriate mathematical models and special methods for solving them. For this reason, the paper presents informal setting of practical problems of layout of on-board aircraft equipment, tasks of warehousing in logistics systems and tasks arising in modern 3D printing technologies.

Due to the complexity of layout problems, spatial configurations of arbitrary shapes are not usually considered. In this case, the metric characteristics of the underlying objects are considered fixed except for the container sizes. Thereby, the extension of the class of arbitrary synthesis tasks in the case of arbitrary forms with variable metric characteristics of objects is very important. Spatial synthesis problems are optimization problems. In this regard, we have analyzed the modern optimization methods that arise when placing spatial objects in a given area. At present, effective solution of optimization problems of geometric design is impossible without the use of information technologies related to the presentation, storage and transformation of geometric information about the constituent objects and visualization of the obtained solutions.

In this case, the development of information technology requires the construction of adequate mathematical models and effective optimization methods

for the specified class of problems. The concept of geometric information about material objects has been formalized in order to build an information-analytical model of layout synthesis of spatial objects. Geometric information components such as the spatial shape of an object, its metric and placement options are proposed. The shape of the object is given by the equation of its boundary, and the overall location of the object in space is characterized by the equation of general position.

An object-oriented model was developed based on formed geometric object configuration space. Generic configuration space variables have metric and object placement options selected. This model allows using virtual methods to ensure the implementation of affine transformations of motion in space, and then to carry out theoretically multiple operations on a set of geometric objects. When implementing information technologies of spatial object layout synthesis, the proposed object-oriented model specifies the format of storage of the original data and allows to form a DBMS structure, to replenish the model knowledge bank, and so on. The concept of spatial configuration of geometric objects is formalized. The stages of the process of forming spatial configurations are distinguished, and their classification is carried out depending on the system of geometric and physical-mechanical constraints.

The information-analytical model of the problem of synthesis of optimal spatial configurations is developed. The analytical component of the model describes the constraints on the generalization of the configuration space of the GO and the formation of quality criteria. To formalize the conditions of the intersection of objects and their location in a given region, we use the apparatus of the theory of Phi-functions of Yuriy Stoyan. The theory of Phi-functions is developed in the case of variable metric parameters. Analytical expressions for the Phi-functions of basic spatial objects with variable metric parameters (spheres, straight parallelepipeds, straight circular cylinders, circular cones, convex polyhedra, etc.) are given. Quality criteria is selected for the minimum amount of space occupied, the minimum total length of the network connecting the objects, the minimum system imbalance.

The information component of the model is related to the formation of the data structure and the creation of their consolidated repository on the basis of object-

oriented model of geometric objects. In addition to the data of the analytical component of the model, information about the process of optimization and visualization of solutions is stored. Data consolidation is built using .NET Framework technologies, ORM, Entity Framework, MS SQL Server.

The process of layout synthesis of spatial configurations is represented by functional diagrams IDEF0 for information flows and IDEF3 for actions description for decomposition of generalized processes. The UML diagrams describe the scenarios of the process of optimizing spatial configurations, both in automatic mode and with the involvement of the decision maker. In order to optimize the spatial configurations by the selected quality criterion, an analysis of the existing optimization packages was carried out, according to this analysis the choice of the IpOpt library of the COIN-OR package was substantiated.

Models and methods of information technology of layout synthesis of spatial objects in case of their spherical shape are offered. Conditions for the relative location of spherical objects and the analytical appearance of the quality criteria of spatial configurations were specified.

Described application that implements information technology of layout synthesis of spherical objects. IpOpt library was used to find locally optimal configurations. The calculations used a data structure corresponding to the class of spherical objects. In this case, the raw data, the numerical results of the calculations and the visualization of the received configurations are stored in the consolidated data warehouse. Solutions are visualized both with the help of a developed software application (for 2D objects) and 3Ds Max (for 3D objects).

To improve locally optimal solutions, the method of variable radii is proposed and theoretically substantiated. The results of numerical calculations are presented, which confirms the effectiveness of the proposed approach. During the calculations, it was investigated the time spent obtaining a locally optimal solution for the set of output data depending on various parameters: fixed radius, number of circles or spheres (considered the problem on the plane and in three-dimensional space), as set points of the initial placement and other parameters - IpOpt settings. It was

established a number of advantages in different variants of parameters combinations in specific problem solution.

A new genetic algorithm for solving combinatorial optimization problems to minimize the imbalance of a discrete distributed mass system is considered. The results of the proposed implementation genetic algorithm for the test problem of balancing the rotating objects mass. The materials of the dissertation are quite sufficiently presented in 23 papers: 6 of them are articles in editions listed in the list of professional articles of Ukraine in technical sciences (5 publications are included in scientometric bases), publication - in Scopus scientometric bases, 15 abstracts at international conferences and a copyright registration certificate for the paper.

Key words: informational technology, database, consolidated data warehouse, geometric object, spatial configuration, layout, information analytics model, optimization, decision maker.

Список публікацій здобувача:

1. Карташов А.В., Коробчинский К.П. Математические модели и информационные технологии компоновочного синтеза сферических конфигураций. Радиоэлектронні і комп'ютерні системи: сб. науч. тр. / Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». Харьков, 2017. Вып. 4 (84). – С. 82–88.
2. Коробчинский К.П., Яковлев С.В. Вычислительные аспекты метода искусственного расширения пространства в задачах размещения гомотетичных объектов. Комп'ютерна математика: зб. наук. пр. / інститут кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України. Київ, 2017. Вып. 2. – С. 118–126.
3. Яковлев С.В., Яськов Г.Н., Коробчинский К.П. О методах переменного радиуса в задаче упаковки шаров в контейнеры. Питання прикладної математики і математичного моделювання: зб. наук. пр. / Нац. ун-т ім. Олеся Гончара. Дніпро, 2017. Вып. 17. – С. 265–272.

4. Яковлев С.В., Карташов А.В., Коробчинский К.П. Об одном классе генетических алгоритмов в задачах оптимизации на комбинаторных конфигурациях. Бионика интеллекта: науч.-тех. журнал / Нац. ун-т. радиозлектроники ХНУРЭ. Харьков, 2017. Вып. 27. – С. 31–36.

5. Yakovlev S., Kartashov O., Korobchynskiy K. The Informational Analytical Technologies of Synthesis of Optimal Spatial Configuration. Proceedings of IEEE 13th International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT 2018). 2018. Vol. 2. – P. 140-143. (Индексується в Scopus)

6. Коробчинский К.П., Скоб Ю.А., Угрюмов М.Л., Шенцов В.В. Численная оценка последствий взрыва водорода в атмосфере. Авиационно-космическая техника и технология: сб. науч. тр. / Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». Харьков, 2008. Вып. 1 (48). – С. 79 – 88.

7. Skob Yu.A., Ugryumov M.L., Korobchynskiy K.P., Shentsov V.V., Granovskiy E.A., Lyfar V.A. Numerical Modeling of Hydrogen Deflagration Dynamics in Enclosed Space. 3-nd International Conference on Hydrogen Safety.(Ajaccio-Corsica, France, 2009). (ICHS Paper No. ID 182) 12p.

8. Коробчинский К.П., Пичугина О.С. Об особенностях решения задач оптимизации на перестановках. Математичне та програмне забезпечення інтелектуальних систем: Тези доповідей XIV Міжнародної науково - практичної конференції MPZIS – 2016. (Дніпро, 16 - 18 листопада 2016р.). Дніпро. ДНУ, 2016. С. 104-105.

9. Карташов А.В. Коробчинский К.П. Санин Ю.С. Об особенностях решения дискретно-континуальных задач с помощью специализированного пакета COIN-OR. Free and Open Source Software: VIII Всеукраїнська науково-практична конференція «Free and Open Source Software» FOSS-2016. (Харків. 22-24 листопада 2016.). Харків. 2016. С. 43.

10. Пичугина О. С., Коробчинский К.П. Об одном подходе к условной оптимизации на сферически расположенных дискретных множествах. Информатика и системные науки: VIII Всеукраинской научно-практической

конференции "Информатика и системные науки", ПУЕТ (Полтава, Украина, 2017). С. 219.

11. Карташов А.В., Коробчинский К.П., Пичугина О.С. Особенности реализации генетических алгоритмов в задачах евклидовой комбинаторной оптимизации. Обчислювальний інтелект (результати, проблеми, перспективи) : зб. тез доп. IV Міжнародної науково-практичної конференції, (Київ, 16-18 травня 2017р.). Київ. 2017. С. 120-122.

12. Яковлев С.В., Карташов О.В., Коробчинський К.П. Метод змінних радіусів в задачі розміщення нерівних кіл. Інформаційні технології та комп'ютерне моделювання : зб. тез доп. міжнар. наук. - практ. конф., (11-16 вересня 2017, Івано-Франківськ). Івано-Франківськ. 2017. С. 319-322.

13. Коробчинский К.П., Лаухін Н.С. Пакування нерівних куль у кулі методом змінного радіусу. Всеукраїнська науково-технічна конференція «Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні ІКТМ - 2017»: зб. тез доп. міжнар. наук.-практ. конф. / Нац. аерокосм. ун-т «Харк. авіац. ін-т», (Харків, 20 жовтня 2017р.). Харків. 2017. С. 127-128.

14. Коробчинский К.П., Сивак А.А. Об одном подходе решения задачи равновесной упаковки с учетом длины связывающей сети. Всеукраїнська науково-технічна конференція «Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні ІКТМ - 2017»: зб. тез доп. міжнар. наук.-практ. конф. / Нац. аерокосм. ун-т «Харк. авіац. ін-т», (Харків, 20 жовтня 2017р.). С. 129.

15. Коробчинский К.П., Скрипка Б.Ю. О некоторых подходах к распараллеливанию вычислений в генетических алгоритмах. Всеукраїнська науково-технічна конференція «Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні ІКТМ - 2017»: зб. тез доп. міжнар. наук. -практ. конф. / Нац. аерокосм. ун-т «Харк. авіац. ін-т», (Харків, 20 жовтня 2017). С. 144.

16. Карташов О.В., Коробчинский К.П., Яковлев С.В. Об одном классе задач равновесной упаковки с учетом зон запрета. Математичне та програмне

забезпечення інтелектуальних систем (MPZIS-2017): Тез. доп. XV між нар. наук.-практ. конф. (Дніпро, 22-24 листопада 2017), С. 83-85.

17. Яковлев С.В., Коробчинский К.П. Методы искусственного расширения пространства в задачах размещения гомотетичных объектов. Сучасна інформатика: проблеми, досягнення та перспективи розвитку: Тези доп. Міжнародної наукової конференції (Київ 13–15 грудня 2017) С. 171-172.

18. Kartashov O., Korobchynskyi K., Skrypka B. Some problems of optimization in the configuration space of spherical objects. Матеріали Двадцятого Міжнародного науково-практичного семінару «Комбінаторні конфігурації та їх застосування» (Кропивницький, 13-14 квітня 2018). С. 11-13.

19. Коробчинский К.П., Томина И.С., Песчаный В.С. Анализ методов сохранения объектов конфигурационного пространства. I Міжнародна науково-практична конференція ІТ-професіоналів та аналітиків комп'ютерних систем : зб. тез доп. міжнар. наук. -практ. конф. / Нац. аерокосм. ун-т «Харк. авіац. ін-т», (Харків, 24 – 26 квітня 2018). С. 55-57.

20. Коробчинський К.П., Рудик В.М. Перетворення структури даних в програмних системах при рішенні задач оптимізації. I Міжнародна науково-практична конференція ІТ-професіоналів та аналітиків комп'ютерних систем : зб. тез доп. міжнар. наук. -практ. конф. / Нац. аерокосм. ун-т «Харк. авіац. ін-т», (Харків, 24 – 26 квітня 2018). С. 57-58.

21. Скрипка Б.Ю., Коробчинский К.П. Использование параллельных вычислений в задачах упаковки шаровых объектов в контейнер с применением пакета IpOpt для решения задач оптимизации. I Міжнародна науково-практична конференція ІТ-професіоналів та аналітиків комп'ютерних систем : зб. тез доп. міжнар. наук. -практ. конф. / Нац. аерокосм. ун-т «Харк. авіац. ін-т», (Харків, 24 – 26 квітня 2018). С. 61-63.

22. Коробчинский К.П., Скрипка Б.Ю. О некоторых задачах оптимизации в конфигурационном пространстве сферических объектов. Математическое моделирование, оптимизация и информационные

технологии: Материалы 6-й международной конференции. Кишинёв. 2018. С. 359-362.

23. Комп'ютерна програма «Комп'ютерна інтерактивна система інженерного аналізу та прогнозу руху хімічно реагуючих газоповітряних сумішей в задачах промислової аеродинаміки та екології атмосфери «FIRE» / Скоб Ю. А., Угрюмов М.Л., Коробчинський К.П.: Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 30079 (Україна). – Дата реєстрації 28.08.2009.

ЗМІСТ

ЗМІСТ	16
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	18
ВСТУП.....	19
1 СУЧАСНИЙ СТАН НАУКОВИИХ ДОСЛІДЖЕНЬ, ПРИСВЯЧЕНИХ МОДЕЛЯМ, МЕТОДАМ ТА ІНФОРМАЦІЙНИМ ТЕХНОЛОГІЯМ КОМПОНОВОЧНОГО СИНТЕЗУ ПРОСТОРОВИХ ОБ’ЄКТІВ.....	27
1.1. Загальна характеристика предмету дослідження.....	27
1.2 Задачі компоновочного синтезу просторових конфігурацій в аерокосмічній галузі.....	31
1.3 Оптимізація просторових конфігурацій у логістиці складування	39
1.4 Задачі синтезу просторових конфігурацій в технологіях 3D-друку.	42
1.5 Огляд методів оптимізації компоновочного синтезу просторових об’єктів	44
1.6 Вербальна постановка та основні завдання дисертаційного дослідження	54
1.7 Висновки по розділу	58
2 РОЗРОБЛЕННЯ МОДЕЛЕЙ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ КОМПОНОВОЧНОГО СИНТЕЗУ ПРОСТОРОВИХ ОБ’ЄКТІВ.....	60
2.1 Конфігураційний простір геометричних об’єктів	60
2.2 Об’єктно-орієнтована модель геометричних об’єктів	64
2.3 Формування та класифікація просторових конфігурацій	71
2.4 Математичні моделі задачі компоновочного синтезу просторових конфігурацій геометричних об’єктів	75
2.5 Інформаційно-аналітична модель синтезу оптимальних конфігурацій	81
2.6 Висновки по розділу	87

3 МОДЕЛІ ТА СПЕЦІАЛЬНІ МЕТОДИ ОПТИМІЗАЦІЇ КОМПОНОВКИ ОБ'ЄКТІВ СФЕРИЧНОЇ ФОРМИ.....	89
3.1 Аналітична складова інформаційно-аналітичної моделі компоновочного синтезу конфігурацій сферичних об'єктів.....	89
3.2 Метод змінного радіусу для покращення отриманих рішень в задачах компоновки сферичних об'єктів.....	95
3.3 Генетичний алгоритм розв'язання задачі балансування дискретно-розподілених об'єктів	112
3.4 Висновки по розділу	119
4 РЕАЛІЗАЦІЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ КОМПОНОВОЧНОГО СИНТЕЗУ ПРОСТОРОВИХ ОБ'ЄКТІВ ТА АПРОБАЦІЯ ОДЕРЖАНИХ РІШЕНЬ.....	122
4.1 Опис програмного додатку, що реалізує інформаційну технологію компоновочного синтезу сферичних об'єктів.....	122
4.2 Опис та структура програмного додатку GeneralSolver.....	127
4.3 Модуль «консолідоване сховище»	136
4.4 Модуль «Візуалізація».....	138
4.5 Застосування моделей та методів ІТ на прикладі упакування сферичних об'єктів	140
4.6 Застосування просторових об'єктів у математичному моделюванні екологічних процесів	144
4.7 Висновки по розділу	149
ВИСНОВКИ.....	151
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	154
ДОДАТОК А.....	182
ДОДАТОК Б	189

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ГО – геометричний об'єкт;

КП – конфігураційний простір;

ЕОМ – електронна обчислювальна машина;

БД – база даних;

СКБД – система керування базою даних;

LINQ – (Language-Integrated Query) мова інтегрованих запитів;

ПД – програмний додаток;

ПК – програмний комплекс

UML – (Universal Modeling Language) універсальна мова моделювання.

СППР – система підтримки прийняття рішень;

ОПР – особа, яка приймає рішення;

NLP – (Non Linear Programing) нелінійне програмування;

MILP – (Mixed Integer Linear Programming) змішане цілочисельне програмування;

QP – (Quadratic Programming) квадратичне програмування;

COIN-OR – (Computational Infrastructure for Operations Research) обчислювальна інфраструктура для дослідження операцій;

ЛА – літальний апарат;

БО – бортове обладнання;

НК – несуча конструкція;

МП – монтажний пристрій;

ЦМ – центр мас.

ВСТУП

На сучасному етапі стрімко зростає інтерес до розроблення та впровадження інформаційних технологій підтримки та прийняття рішень при синтезі складних технічних систем з урахуванням просторової форми об'єктів. При цьому стає так званий клас задач геометричного проектування, що пов'язаний із відображенням геометричної інформації про матеріальні об'єкти. Прикладами таких задач є задачі транспортної логістики та логістики складування, компоновки аерокосмічних об'єктів, підвищення безпеки паливно-енергетичних комплексів, реалізації новітніх технологій 3D друку тощо, які безпосередньо пов'язані з урахуванням форми відповідних прототипів та обмежень на їх взаємне розташування. Синтез просторових конфігурацій матеріальних об'єктів переважно базується на технологіях оброблення, перетворення і зберігання геометричної інформації про них на основі побудови інформаційно-аналітичних моделей задач, що виникають, та впровадження сучасних інформаційних технологій.

Зазначений напрям досліджень інтенсивно розвивається за рубежом та пов'язаний із роботами G. Fasano, J. D. Pinter, W. A. Oliveira, A. C. Moretti, H. Teng, Z. Sun, C. Che, Y. Chen, Y. Wang, L. Jingfa, L. Gang, K. Lei та багатьох інших вчених. Зазначимо щорічні монографії серії «Springer Optimization and Its Applications», у яких особлива увага приділяється моделям, методам та інформаційним технологіям компоновочного синтезу об'єктів аерокосмічної техніки, і монографії серії «Lecture Notes in Logistics», присвячені задачам транспортної логістики та логістики складування.

У вітчизняній науці фундаментальні результати у напрямку математичного та програмного забезпечення задач геометричного проектування отримано науковою школою Ю. Г. Стояна. Вагомий внесок у розвиток теорії та методів розв'язання задач компоновки складних систем з урахуванням просторової форми об'єктів зробили такі вчені як М. І. Гіль,

І. В. Гребеннік, О. М. Кисельова, В. М. Комяк, О. В. Панкратов, Т. Є. Романова, П. І. Стецюк, С. В. Яковлев. Теорії та методам розробленням інтелектуальних інформаційних технологій зазначеного класу задач присвячено роботи П. І. Бідюка, Л. Ф. Гуляницького, В. А. Заславського, С. І. Доценка, Ю. В. Крака, В. П. Машталіра, С. В. Машталіра, О. Є. Федоровича, В. С. Харченка та інших вчених.

Традиційні підходи щодо розв'язання задач синтезу оптимальних конфігурацій просторових об'єктів останнім часом стрімко розвиваються. Це обумовлено появою адекватних моделей, методів і новітніх інтелектуальних інформаційних технологій, які підвищують ефективність рішень за значеннями обраних критеріїв оптимізації (мінімізація зайнятого об'єму області, мінімізація небалансу системи та мінімізація довжини мережі об'єктів), і можуть бути реалізовані незалежно від предметної області за допомогою зовнішніх процедур, що розробляються користувачами. Якість рішень оцінюється за значеннями обраної цільової функції та потребами в обчислювальних ресурсах для розв'язку задачі.

Розроблення сучасних інформаційних систем для розв'язання задач синтезу оптимальних конфігурацій складних просторових об'єктів потребує побудови математичних моделей в автоматичному режимі. При цьому процес комп'ютерного моделювання з урахуванням перетворення геометричної інформації та візуалізації отриманих рішень має творчий характер і є одним із найбільш складних і відповідальних етапів. Цей процес безпосередньо пов'язаний зі створенням інформаційної технології, яка будується на інформаційно-аналітичних і об'єктно-орієнтованих моделях предметної області й вимагає розроблення ефективних методів оптимізації рішень.

Таким чином актуальним науковим завданням є розроблення моделей, методів та інформаційної технології компоновочного синтезу складних систем з урахуванням просторової форми об'єктів, що й обумовило вибір теми дисертаційного дослідження.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційну роботу виконано на кафедрі інформатики Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут» у період з 2006 р. по 2018 р. згідно з державними планами НДР, що виконувались за науковими напрямами кафедри «Розроблення інформаційно-аналітичних моделей і методів оптимізації складних систем з урахуванням просторової форми об'єктів», «Інтелектуальні інформаційні технології підтримки та прийняття рішень у системах геометричного моделювання». Автор брав участь у виконанні наукових тем: «Розробка науково обґрунтованих математичних моделей інформаційних технологій при формуванні просторового уявлення вузлів літальних апаратів» (№ ДР 0103U004032), «Розробка методів інформаційних технологій підтримки прийняття рішень для проектування елементів аерокосмічних систем» (№ ДР 0106U001036), «Методологічне забезпечення підготовки та управління комплексними проектами розвитку підприємств машинобудівної та транспортної галузей» (ДР № 0108U011072), «Енергоефективні та ресурсозберігаючі технології і засоби моделювання, вимірювання і перетворення процесів і енергоносіїв літальних апаратів і паливно-енергетичних комплексів» (№ ДР 0109U001089), «Методологія проектування елементів та інформаційно-вимірювальних систем контролю параметрів авіаційних двигунів і промислових паливно-енергетичних комплексів» (№ ДР 0111U001072).

У зазначених НДР автор був безпосереднім виконавцем і розробляв методи, компоненти інформаційної технології, зв'язані з обробленням, перетворенням і зберіганням геометричної інформації про об'єкти проектування й керування.

Мета та завдання дослідження.

Мета роботи полягає в підвищенні якості рішень при створенні та експлуатації складних систем шляхом розроблення моделей, методів та інформаційної технології компоновочного синтезу просторових об'єктів.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання:

– проаналізувати сучасний стан упровадження моделей, методів та інформаційних технологій синтезу складних систем з урахуванням просторової форми складових об'єктів;

– запропонувати класифікацію математичних моделей просторових конфігурацій з урахуванням аналітичного опису геометричних об'єктів, формалізації умов на їх взаємне розташування та критеріїв якості;

– розробити інформаційно-аналітичну модель опису структур даних у процесі створення складних просторових конфігурацій;

– виконати й провести аналіз консолідації структур даних геометричної інформації, що використовується при оптимізації та візуалізації просторових конфігурацій;

– розробити інформаційну технологію динамічного перетворення структури даних геометричної інформації в процесі синтезу просторових конфігурацій складних об'єктів;

– розробити методи оптимізації просторових конфігурацій сферичних об'єктів із застосуванням розроблених моделей та методів інформаційної технології;

– розробити генетичний алгоритм комбінаторної оптимізації, що використовує специфіку евклідових комбінаторних множин при розв'язанні задач балансової упаковки дискретно розподілених мас.

Об'єкт дослідження – процес формування, перетворення й зберігання геометричної інформації при синтезі складних систем з урахуванням просторової форми об'єктів.

Предмет дослідження – математичні моделі, методи оптимізації та інформаційна технологія компоновочного синтезу просторових конфігурацій.

Методи дослідження. Для розв'язання поставлених задач у дисертаційній роботі використано основні положення теорії геометричного проектування для побудови інформаційно-аналітичної моделі, засоби об'єктно-орієнтованого програмування для оброблення й перетворення

структур даних, 3D-технології моделювання для візуалізації синтезованих конфігурацій, теорія й методи математичного програмування для пошуку локально-оптимальних конфігурацій, методи обчислювального інтелекту для розв'язання задач глобальної оптимізації.

Наукова новизна одержаних результатів. Наукова новизна полягає в такому:

– *уперше розроблено* інформаційно-аналітичну модель синтезу оптимальних просторових конфігурацій, що на відміну від існуючих дає змогу інтегрувати ієрархічну об'єктно-орієнтовану модель з сучасними солверами інфраструктури COIN-OR (Computational Infrastructure for Operations Research) та засобами візуалізації отриманих конфігурацій;

– *уперше розроблено* інформаційну технологію перетворення й адаптації даних геометричної інформації при оптимізації та візуалізації просторових конфігурацій, що на відміну від існуючих підходів враховує динаміку процесу їх синтезу;

– *удосконалено* модель просторової конфігурації матеріальних об'єктів, що на відміну від існуючих враховує всі параметри геометричної інформації та дозволяє формувати відповідні структури вихідних даних;

– *набув подальшого розвитку* метод синтезу оптимальних конфігурацій просторових об'єктів, який на відміну від існуючих дозволяє в процесі оптимізації залучати особу, що приймає рішення;

– *набув подальшого розвитку* метод штучного розширення простору, що дає змогу оптимізувати існуючі рішення при реалізації інформаційної технології синтезу конфігурацій сферичних об'єктів.

Одержані результати мають практичне значення:

– при реалізації інструментальних засобів інформаційної технології компоновочного синтезу просторових об'єктів;

– при комплексному застосуванні технології візуалізації рішень з подальшими процесами їх оптимізації за участю особи, що приймає рішення;

- при розробленні й проектуванні систем логістики складування, компоновки бортового обладнання аерокосмічних об'єктів;
- для проектування систем моніторингу екологічних процесів при моделюванні процесу розповсюдження газових сумішей в областях складної форми.

Результати дисертаційного дослідження впроваджено на Державному науково-виробничому підприємстві «Об'єднання Комунар» (акт упровадження від 17.09.2018), у науково-дослідній роботі Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут» (акт упровадження від 21.09.2018), а також у навчальний процес кафедри інформатики Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут» у вигляді навчально-методичних матеріалів дисциплін «Організація баз даних та знань», «Алгоритми і структури даних», «Обчислювальна геометрія та комп'ютерна графіка», «Обробка зображень та мультимедіа», «Теорія оптимальних систем» (акти впровадження від 20.12.2017 та від 16.02.2018).

Особистий внесок здобувача. Усі основні наукові положення, результати, висновки та рекомендації дисертаційної роботи отримано автором самостійно й опубліковано в роботах [1]–[23] відповідно додатку Б дисертації. У публікаціях, які написано у співавторстві, здобувачем [1], [14], [16] запропонована об'єктно-орієнтована модель просторової конфігурації матеріальних об'єктів; в [5], [18], [22] розроблена інформаційно-аналітична модель синтезу оптимальних просторових конфігурацій; в [15], [19], [20] запропонована інформаційна технологія багатоетапного оброблення, перетворення й адаптації даних та візуалізації результатів; в [2], [3], [12], [13], [17] побудована еквівалентна модель та обґрунтований метод змінного радіусу в задачах синтезу просторових конфігурацій сферичних об'єктів; в [4], [8], [9] розроблено методи обчислювального інтелекту, що враховують комбінаторну структуру задач синтезу просторових конфігурацій; в [8], [9], [26] описано

застосування моделей просторових конфігурацій у задачах розповсюдження газових сумішей в областях складної форми.

Апробація результатів дослідження. Основні результати роботи доповідалися й обговорювалися на таких наукових конференціях: «Авиационно-космическая техника и технология», Харків, 2015, 2016, 2017; «Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии», Харків, 2009; «Питання прикладної математики і математичного моделювання», Дніпро, 2017; «Радіоелектронні і комп'ютерні системи», Харків, 2017; XIV Міжнародна науково-практична конференція «Математичне та програмне забезпечення інтелектуальних систем» (MPZIS), Дніпро, 2016, 2017; «Міжнародна науково-технічна конференція «Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні ІКТМ», Харків, 2007, 2015, 2017, 2018; Міжнародна XXII наукова конференція країн СНГ «Дисперсные системы», Одеса, 2006; Науково-методична конференція «Впровадження нових інформаційних технологій навчання», Харків, 2007; 6-й Міжнародний радіоелектронний форум «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития», Харків – Коблево, 2017; «Інформаційні технології та комп'ютерне моделювання» Івано-Франківськ, 2017; Міжнародна науково-технічна конференція «Інформаційні системи та технології» (ICT-2017), Харків – Коблево, 2017; «Комп'ютерна математика», Київ, 2017; «Бионика интеллекта», Харків, 2017; Abstracts Book and Proceedings of the 3-nd International Conference on Hydrogen Safety Ajaccio-Corsica (France), 2009; VIII Всеукраїнська науково-технічна конференція «Інформатика та системні науки», Полтава, 2017; VIII Всеукраїнська науково-практична конференція «Free and Open Source Software» (FOSS-2016), Харків, 2016; IV Міжнародна науково-практична конференція «Обчислювальний інтелект (результати, проблеми, перспективи)», Київ, 2017; Міжнародна наукова конференція «Сучасна інформатика: проблеми, досягнення та перспективи розвитку», Київ, 2017; I Міжнародна науково-практична конференція ІТ-професіоналів та аналітиків комп'ютерних систем «ProfIT Conference», Харків, 2018; XII

Міжнародний науково-практичний семінар «Комбінаторні конфігурації та їх застосування», Кропивницький, 2018.

Публікації. За темою дисертації опубліковано 23 наукові праці, у тому числі: 6 статей у спеціалізованих виданнях, затверджених ДАК МОН України [1–6], тези доповідей на міжнародних та вітчизняних наукових конференціях [7–22], 1 свідоцтво про реєстрацію авторського права на програмний продукт [23].

Структура дисертації. Дисертація містить анотацію, вступ, чотири розділи, висновки й додатки. Загальний обсяг дисертації становить 194 сторінки (основний текст – на 153 с.), у тому числі 35 рисунків за текстом, 6 таблиць за текстом, анотації на 10 сторінках, список літературних джерел з 237 найменувань на 28 сторінках та 2 додатки.

1 СУЧАСНИЙ СТАН НАУКОВИИХ ДОСЛІДЖЕНЬ, ПРИСВЯЧЕНИХ МОДЕЛЯМ, МЕТОДАМ ТА ІНФОРМАЦІЙНИМ ТЕХНОЛОГІЯМ КОМПОНОВОЧНОГО СИНТЕЗУ ПРОСТОРОВИХ ОБ'ЄКТІВ

1.1. Загальна характеристика предмету дослідження

В процесі проектування та створення складних технічних систем матеріальних об'єктів виникають задачі, в яких необхідно враховувати їх просторові форми. При цьому здійснюється обробка, перетворення геометричної інформації про об'єкти та синтезуються нові просторові конфігурації. В процесі синтезу просторових конфігурацій мають використовуватись сучасні інформаційні технології, як на етапах формування вихідної геометричної інформації, що описує матеріальні об'єкти, так і при подальшому синтезі їх просторових конфігурацій. Цей процес здійснюється відповідно до конкретних вимог, які виникають з поставленої задачі [1]. Якість просторових конфігурацій, що синтезуються оцінюють заданим критерієм або сукупністю таких критеріїв (в багатокритеріальній постановці).

Рішення таких задач без застосування електронних обчислювальних машин (ЕОМ) та відповідного математичного апарату, як правило, неможливе. Це пов'язано з безмежним різноманіттям просторових форм, складністю конфігурацій, які беруть участь у синтезі й формуванні нових синтезованих об'єктів під час моделювання та перетворенням відповідної геометричної інформації. Взаємодія матеріальних об'єктів, які беруть участь у синтезі нового матеріального об'єкта, безпосередньо залежить від геометричної форми складових частин. У процесі рішення потрібно враховувати велику кількість різних обмежень, обумовлених особливостями складових матеріальних об'єктів, які розглядаються. Отже задачі [4], зв'язані з перетворенням геометричної інформації, стають практично неозорими для людини. Також це можна здійснити при залучанні сучасних інформаційних технологій, а для подальшої інтеграції у різноманітні системи необхідно

інтегрувати сучасні комп'ютерні системи та математичні методи за умови формалізації описаних вище задач.

Перш за все необхідно формалізувати поняття геометричної інформації [3], так як в нього, у процесі інженерного проектування, іноді вкладається інший зміст. Оскільки геометрична інформація, в свою чергу, нерозривно зв'язана з об'єктом моделювання, то для формалізації цього поняття слід побудувати такі моделі, які будуть адекватно відповідати матеріальним об'єктам.

Також зауважимо, що у процесі формалізації виникають проблеми під час вивчення складних процесів синтезу різноманітної природи та систем з урахуванням просторової форми об'єктів. Цей процес вимагає як наукового дослідження, так і створення адекватних математичних моделей конкретних класів задач промислової сфери, використання інформаційних технологій, впровадження конструктивних методів оптимізації, розробки інноваційних високоінтелектуальних технологій. У зв'язку з цим зростає наукова значимість та стає актуальною проблема створення наскрізної інформаційної технології, яка об'єднує існуючі математичні моделі з їх аналітичними складовими та сучасними технологіями, які дозволяють розв'язувати різні задачі синтезу просторових об'єктів з візуалізацією цього процесу.

Вирішенню цих проблем присвячені роботи вчених провідних наукових та освітніх установ України, зокрема, що розробляються в Інституті кібернетики імені В. М. Глушкова НАН України, Інституті проблем машинобудування імені А. М. Підгорного НАН України, Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київському національному університеті імені Тараса Шевченка, Дніпропетровському національному університеті імені Олеся Гончара, Харківському національному університеті радіоелектроніки, Національному аерокосмічному університеті ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут» та інших.

У вітчизняній науці фундаментальні результати в напрямку математичного та програмного забезпечення задач геометричного проектування отримані в науковій школі Ю. Г. Стояна [1–6]. Вагомий внесок в розвиток теорії та методів розв'язання задач компоновки складних систем з урахуванням просторової форми об'єктів внесли такі вчені як М. І. Гіль, І. В. Гребеннік, О. М. Кисельова, В. М. Комяк, О. В. Панкратов, Т. Є. Романова, П. І. Стецюк, А. М. Чугай, С. В. Яковлев, Ю. Г. Яськов [3, 4, 7–28]. Теорії та методи обробки візуальної інформації в інтелектуальних інформаційних системах присвячені роботи П. І. Бідюка, Л. Ф. Гуляницького, С. І. Доценка, В. А. Заславського, М. З. Згуровського, Ю. В. Крака, В. П. Машталіра, С. В. Машталіра, О. Є. Федоровича, В. С. Харченка та інших вчених. [29–54].

За рубежом з цим напрямком зв'язані роботи J. Bennell, C. Che, Y. Chen, G. M. Fadel, G. Fasano, L. Gang, K. Lei, A. C. Moretti, W. A. Oliveira, J. D. Pinter, Z. Sun, H. Teng, Y. Wang [55–79] та багатьох інших вчених. Звернемо увагу на щорічні монографії серії «Springer Optimization and Its Applications» [80–88], в яких особлива увага приділяється моделям, методам та інформаційним технологіям компоновочного синтезу об'єктів аерокосмічної техніки та монографії серії «Lecture Notes in Logistics» [89–96], присвячені задачам логістики складування.

Головною особливістю досліджень за даним напрямком є різноманітність засобів інтегрування у сучасні промислові галузі, які включають моделювання реальних просторових об'єктів, формалізацію їх взаємозв'язків, вивчення класів розміщення реальних матеріальних об'єктів, оптимізацію структури та параметрів складних процесів системи з об'єктами довільних просторових форм, створення новітніх високоінтелектуальних інформаційних технологій, їх моделювання та практична реалізація розроблених систем.

Розробка сучасних інформаційних технологій та систем для розв'язання задач синтезу оптимальних конфігурацій складних просторових об'єктів

вимагає побудову математичних моделей в автоматичному режимі [5]. Цей процес безпосередньо зв'язаний зі створенням інформаційної технології, яка будується на інформаційно-аналітичних та об'єктно-орієнтованих моделях предметної області і потребує розроблення ефективних методів оптимізації рішень.

Традиційні підходи до розв'язання задач синтезу оптимальних конфігурацій просторових об'єктів останніми роками стрімко розвиваються. Це обумовлено появою адекватних моделей, методів та новітніх інтелектуальних інформаційних технологій, які кардинально підвищують якість, надійність і точність отриманих рішень та можуть бути реалізовані незалежно від предметної області за допомогою зовнішніх процедур, розроблених користувачем. При цьому якість рішень оцінюється й порівнюється зі значеннями вибраних критеріїв, необхідними потребами в обчислювальних ресурсах (час розв'язання задачі, ємність пам'яті та ін.).

Розроблення сучасних інформаційних систем для розв'язання задач синтезу оптимальних конфігурацій складних просторових об'єктів потребує побудови математичних моделей в автоматичному режимі. При цьому процес комп'ютерного моделювання з урахуванням перетворення геометричної інформації та візуалізації отриманих рішень має творчий характер і є одним із найбільш складних і відповідальних етапів. Цей процес безпосередньо зв'язаний зі створенням інформаційної технології, яка будується на інформаційно-аналітичних і об'єктно-орієнтованих моделях предметної області й вимагає розроблення ефективних методів оптимізації рішень.

Останнім часом ці технології активно розвиваються [10] та інтегруються у різноманітні галузі виробництва, серед яких насамперед виділяються такі напрямки як:

- компонування аерокосмічних об'єктів;
- компонування обладнання паливно-енергетичних комплексів;
- технологія 3D-друку;
- логістика складування.

Таким чином, актуальним науковим завданням є розроблення моделей, методів та інформаційної технології компоновочного синтезу складних систем з урахуванням просторової форми об'єктів, що й обумовило вибір теми дисертаційного дослідження.

1.2 Задачі компоновочного синтезу просторових конфігурацій в аерокосмічній галузі

Актуальною задачею для сучасних підприємств аерокосмічної галузі є компоновка обладнання при проектуванні літального апарату [54], вантажів, які необхідно розташувати при транспортуванні. Прискорити ці процеси сьогодні дозволяє залучення прогресивних інформаційних технологій. В рамках даної роботи важливим є застосування досліджуваного класу оптимізаційних задач розміщення тривимірних об'єктів при компонуванні бортового обладнання [101] (БО) у літальному апараті (ЛА). Спеціалізовані інженерні додатки для проектування вирішують задачі компоновки БО [102] у тому числі й для літальних апаратів (ЛА). Серед програмних додатків [97, 98] найбільш відомими є: SolidWorks, 3ds Max, Revit, AutoCAD тощо. Основною задачею яких є візуалізація проектування, але оптимізаційні задачі винесені на другий план. При цьому описані додатки частково виконують розрахунки оптимального розміщення БО за заданим критерієм якості. Розглянемо детальніше цю задачу.

Термін «бортове обладнання» визначає технічні пристрої та системи, які встановлюються на ЛА для наступних операцій [102]: визначення його місця розташування, забезпечення управління ЛА, виконання спеціальних функцій цільового призначення, контролю за роботою силової установки, забезпечення внутрішнього та зовнішнього зв'язку ЛА, постачання електроенергії та рішення ряду інших завдань. Відомі різні підходи класифікації БО, в основу яких покладено ознаки розміщення обладнання в ЛА [103].

За цією ознакою елементи обладнання можна розділити на три групи. В першу групу входять прилади «індикації»: пульти управління, органи регулювання та комутації, які розміщують на робочих місцях екіпажу. Визначальними факторами для отримання конкретної схеми розміщення в даному випадку є результати ергономічних досліджень.

В другу групу входять антенні пристрої, призначення яких полягає у визначенні місця їх розміщення уздовж контуру ЛА. При цьому необхідно забезпечити необхідні діаграми спрямованості антени та електромагнітну сумісність.

В третю групу входять різні електричні, механічні, електронні та інші блоки обладнання, комутаційні та розподільні коробки, роз'єми та ін. Зазначені елементи розміщуються в основному всередині фюзеляжу, причому більшість концентрують в спеціально виділених технічних відсіках.

Необхідною складовою частиною бортового обладнання є несуча конструкція (НК), призначена для розміщення та закріплення електронних модулів, яка забезпечує їх електричне та механічне сполучення, взаємозамінність, а також захист від теплових та механічних впливів.

Конструкція є провідником декількох видів енергії одночасно: електричної, механічної та теплової. Електричний струм зазвичай протікає в конструкції тому, що він є складовим елементом електричного кола заземлення. Поширення вібрації тепла в конструкції БО обумовлено наявністю відповідних джерел впливу. В цих умовах можливе перетворення одних видів енергії в інші. Також важлива їх взаємодія з електромагнітними процесами, які відбуваються в основних функціональних електричних ланцюгах. Таким чином, якість та надійність функціонування БО визначається не тільки його електричною схемою, а й якістю (надійністю) механічної конструкції. З усього різноманіття несучих конструкцій виділимо лише НК для розміщення на борту ЛА модулів (блоків) БО, що мають корпус певної форми та розмірів.

На сучасних ЛА використовують різні типи монтажних пристроїв (МП): індивідуальні монтажні рами, групові монтажні рами та стелажі.

Робота присвячена розробці інформаційних технологій компонованого синтезу обладнання в спеціальних відсіках певної форми. При цьому метричні параметри (розміри) можуть бути як фіксовані, так і визначатися в процесі компоновочного синтезу.

Сучасні підходи до розробки інформаційних технологій синтезу компоновальних схем БО технічних відсіків ЛА реалізують спеціальні вимоги до проектування компоновальних схем радіоелектронних засобів, зокрема зв'язані з вирішенням завдань розміщення елементів обладнання та прокладки трас комунікацій [97-103]. Ці підходи базуються, як правило, на основі силових схем конструкцій, сформованих в результаті вирішення зазначених раніше приватних завдань. В рамках розглянутих завдань ці системи та методи дозволяють визначити оптимальні варіанти розміщення обладнання. Ефективне загалом рішення задачі синтезу компоновальних схем обладнання технічних відсіків можна отримати лише в процесі взаємозв'язаного вирішення задачі розміщення елементів обладнання, прокладення комунікацій та несучих конструкцій БО.

Сказане вище підкреслює актуальність розробки інформаційних технологій компоновочного синтезу на етапі наскрізного проектування СППР синтезу компоновальних схем БО технічних відсіків ЛА. Наведені вище факти певною мірою відображають загальні тенденції розвитку вітчизняних та зарубіжних інформаційних технологій, які впливають на прийняття рішення при розміщенні елементів ЛА.

Перші системи прийняття рішень створювалися в основному для вирішення завдань початкового етапу проектування, тобто для пошуку вигляду (зміни структури та режиму руху ЛА). Зазначений етап становить 5%–7% вартості всього проекту і визначає 70%–80% вартості процесу. Поряд з підсистемами пошуку удосконалювалися методи та засоби повірочних розрахунків на міцність, розрахунків аеродинамічних та бортових систем.

Однак досвід вітчизняного та зарубіжного літакобудування показує, що основні витрати конструкторів при створенні нового або модифікації

існуючого обладнання ЛА зв'язані з робочим проектуванням, включаючи випробування. Впровадження сучасних інформаційних технологій дозволяє різко скоротити зазначені витрати.

Зазначені технології нерозривно зв'язані з накопиченням та обробкою такої інформації:

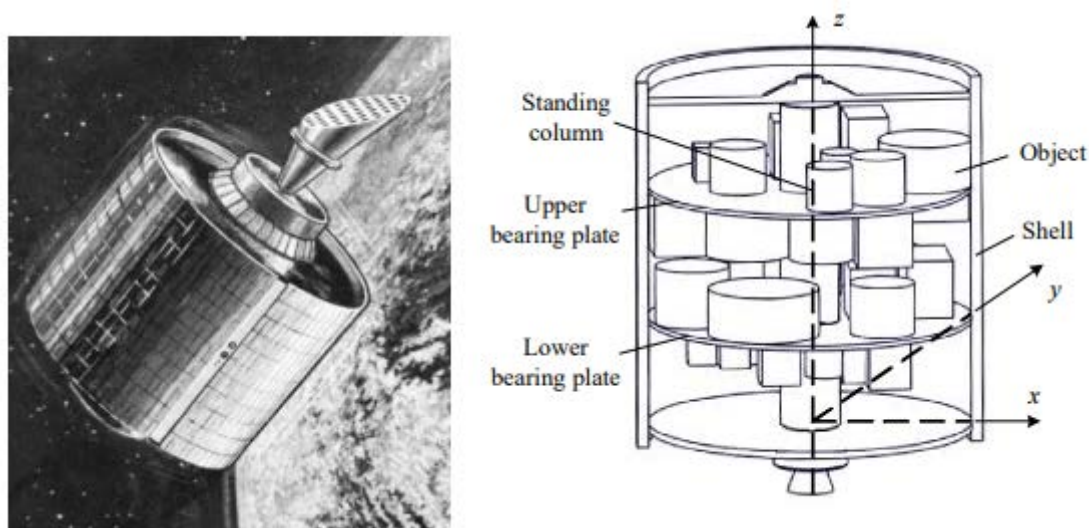
- подання геометричного образу конфігурації обладнання ЛА;
- технологічні вимоги, обмеження, норми міцності, довідково-нормативні документи, інструкції тощо;
- зв'язок різних компонентів обладнання деталей, вузлів та агрегатів ЛА з геометрією зовнішніх обводів;
- ітераційний характер процесів конструювання;
- візуалізація.

Зауважмо, що ця інформація впливає на зв'язок конструкції та міцності із-за жорстких обмежень по масі та потребує застосування різних за складністю методів розрахунків на міцність від простих оцінок (керівництва та конструкторів) до застосування методів розбиття на кінцеві елементи з пошуком найгірших розрахункових випадків навантаження. Звідси – визначальна роль вибору конструктивно-силової схеми.

Також є важливою значна кількість комбінаторних задач дискретного програмування [103], зв'язаних з пошуком граничних, допустимих або раціональних сполучень вузлів та елементів, комплектуючих виробів або агрегатів (серед яких розміщення у просторі та на площині). Важливою проблемою автоматизації проектування ЛА є задача раціонального розміщення бортових радіоелектронних засобів, у тому числі – проектування компоувальних схем обладнання технічних відсіків. За допомогою сучасних інформаційних технологій можна залучити нові алгоритми, які повинні вирішувати проблеми оптимального розміщення БО та один алгоритм повинен бути оцінений після того, як його було запропоновано. Загалом, алгоритми часто оцінюються трьома наступними методами: аналіз теорії алгоритмів, тестова задача з оптимальними рішеннями й інженерні додатки та практики.

Проте аналіз теорії алгоритмів (наприклад, аналіз складності та доведення збіжності) є складним для деяких алгоритмів. А оцінка алгоритму інженерним застосуванням досить складна в деяких ситуаціях. Часто використовують оцінку задачі тестуванням, наприклад, Schwerin та Wäscher [104], Burke та Kendall [105] представили різні види класичних тестових завдань для оптимізації функцій. Teng et al. побудували тестову задачу для двовимірного пакування з оптимальним рішенням [65]. Bischoff, Ratcliff, Hoare та ін. [106] запропонували тестові задачі для тривимірної пакування без обмеження поведінки (наприклад, завантаження контейнерів). Але існує багато проблем з тестуванням для тривимірного пакування з обмеженнями поведінки. У роботі [65] автори запропонували сім тестових завдань для тривимірного пакування з обмеженнями поведінки (наприклад, динамічної рівноваги або момент інерції) на основі проблем двовимірного пакування.

За допомогою тестування розглядають задачу оптимізації компоновки в салоні міжнародного супутника зв'язку Європейського космічного агентства (рис. 1.1), які називають тестовими проблемами супутникового пакування.



а. міжнародний супутник зв'язку б. спрощений модуль супутника

Рисунок 1.1 – Принципова схема супутника та спрощений модуль супутника.

Таким чином, аналіз публікацій показує, що синтез окремих агрегатів ЛА є надзвичайно важливими задачами як для виведення ЛА на орбіту й

забезпечення працездатності всіх агрегатів в умовах космічного польоту, так і для успішного управління орієнтацією ЛА. На етапі проектування ЛА при компонованні його складових необхідно витримати необхідні геометричні обмеження. Вони мають бути зумовлені вимогами щодо аеродинамічних характеристик та міцності, щодо вимог ЛА. Для забезпечення працездатності всієї сукупності агрегатів в умовах космічного польоту необхідно також задовольнити обмеження щодо взаємного розташування окремих агрегатів з точки зору відведення тепла або взаємовпливу агрегатів один на одного в процесі їх роботи з метою зниження взаємних перешкод або взаємного впливу. Розміщення агрегатів впливає на геометрично-масові характеристики ЛА, які важливі при розробці системи управління орієнтацією ЛА. Однак задачі балансної компоновки є найменш дослідженими в класі задач розміщення та пакування. Для розв'язання задач балансної компоновки використовують евристичні та мета-евристичні алгоритми, які зазвичай не дозволяють отримувати оптимальні розв'язки. До того ж запропоновані підходи не враховують допустимих відстаней між об'єктами.

Головним фактором підвищення ефективності ЛА є мінімізація маси, яка складає основну мету всіх процесів вагового проектування.

Розгляд питань зменшення маси обладнання [101], довго відставав від планера та двигунів, бо з досвіду створення літаків склалося уявлення про незначну частину цього компонента в масі літака. Розробники обладнання мусили тримати у пріоритеті основні літакобудівні задачі, а специфічним було приділено мало уваги. Це призвело до того, що зменшення маси та об'єму обладнання стало першочерговою проблемою. Існувала думка, що можливості авіаконструкторів у цьому відношенні обмежені, оскільки значну частку маси обладнання складають готові вироби. На сучасному етапі можна виділити наступні можливості зменшення маси бортового обладнання за рахунок оптимізації компоновальних характеристик БО:

- зменшення маси комунікацій;
- зменшення маси монтажних пристроїв тощо.

Крім впливу зовнішніх умов експлуатації елементи обладнання літака відчують взаємний негативний вплив один на одного, внаслідок чого в конструкторській практиці існує проблема несумісності окремих елементів. Несумісність може мати різний характер. Наприклад, тепловий режим окремих блоків бортового радіоелектронного обладнання суттєво відрізняється. Сучасні тенденції щодо централізованого розміщення обладнання створюють сприятливі умови для створення систем охолодження БО. Однак, і в цих умовах, зазначені системи, крім безпосереднього впливу своєї маси на ефективність ЛА, мають вплив на швидкість викиду відпрацьованого повітря двигунів, що призводить до падіння тяги. Відбір повітря з потоку (забортного), так само, як і додатковий аеродинамічний опір, погіршує аеродинамічну якість літака. І те, і інше веде до зниження ефективності ЛА. В свою чергу параметри системи охолодження визначаються експлуатаційними характеристиками елементів БО та температурним полем, що породжується працюючою апаратурою та зовнішнім середовищем. Діаграма цього поля залежить від багатьох факторів, серед яких інтенсивність джерел поля, їх кількість та просторове розміщення.

Деякі елементи обладнання літака можуть створювати в локації їх установки додаткові вібрації, інші – виділяти під час своєї роботи агресивні пари та газу. Негативний вплив таких елементів на сусідні блоки обладнання може бути суттєвим та має враховуватися при компонуванні. Найважливішим являється вплив електромагнітних полів, що створюються радіоелектронним обладнанням, а також вплив на радіоелектронні частини та інші види обладнання електричних перешкод різного характеру. На даний час [97] ця проблема вважається однією з найскладніших та широко відома як проблема електромагнітної сумісності. Її виникнення зв'язане з безперервним збільшенням кількості антен й апаратури, яку встановлюють на ЛА. На якість електромагнітної сумісності впливає не тільки розміщення антен, але й компонувальні характеристики блоків обладнання. Так як розміри ЛА обмежені, то розміщувати всі блоки та антени обладнання потрібно в

обмеженому просторі, при цьому уникнути взаємовпливу при цьому неможливо. Вплив здійснюється як шляхом випромінювання під час роботи, так і через загальні мережі живлення, і виражається у вигляді перешкод радіоелектронного та інших видів обладнання. Такі перешкоди ведуть до викривлення сигналів, тобто інформації, та різного роду збоїв з наявністю зриву роботи пристроїв.

Таким чином [103], задачею компоновки радіоелектронних засобів є визначення такого просторового розташування елементів БО, при якому їх взаємний вплив буде мінімальним або не перевищуватиме допустимих значень. Для літака, що володіє шістьма ступенями вільності, точне визначення положення його центру мас та створення досить широкого діапазону допустимих центрувань має велике значення, оскільки центрування робить суттєвий вплив на стійкість і керованість літака на землі та в повітрі. Отже центрування мас впливає на:

- простоту пілотування;
- надійність та безпеку польоту;
- на економічну ефективність літака;
- оперативність та економічність експлуатації.

Розміщення елементів бортового обладнання, яке представляє собою розподіл мас в просторі ЛА, безпосередньо впливає на положення центра мас (ЦМ) всього літака. На етапі проектування компоновання елементів обладнання (як і інших агрегатів) визначають з метою досягнення такого положення центру мас, яке б вкладалося в діапазон допустимих центрувань. Таким чином, виникає необхідність в розробці інформаційних технологій, побудові математичних моделей для задач компоновання БО з використанням багатогранної апроксимації просторових форм об'єктів розміщення та контейнерів з урахуванням заданих мінімально допустимих відстаней. Важливою проблемою також є розробка ефективних алгоритмів розв'язання задач балансного компоновання з використанням сучасних програм для розв'язування багатоекстремальних задач нелінійного програмування.

1.3 Оптимізація просторових конфігурацій у логістиці складування

Актуальними є задачі компоновочного синтезу просторових об'єктів у логістиці складування [107]. У роботі [108] виконана класифікація логістичних систем та виділені основні напрями розвитку логістики:

- господарський або економічний, який зв'язаний з управлінням у різних сферах життєдіяльності соціально-економічної системи;
- військовий, спрямований на управління та матеріально-технічне забезпечення військ;
- математичний, який пов'язаний з формуванням умінь одержувати точно рішення будь-яких завдань на основі використання правил, принципів, гіпотез та законів математики.

Робота [107] описано логістичну систему, яку можна також представити у вигляді ієрархічної структури: перший рівень декомпозиції – підсистеми та модулі, другий – логістичні технології, третій – бізнес-процеси, далі – логістичні функції та найнижчий рівень – логістичні операції (рис. 1.2). Тобто окремою часткою системи є інформаційно-аналітична складова, яка виконує оптимізаційні задачі логічної системи.



Рисунок 1.2 – Ієрархія логістичної системи підприємства

З метою рішення різного роду локальних та комплексних логістичних завдань на різних рівнях у «загальній» логістиці сформовані та виділені

відповідно до її функціональних областей такі основні напрямки як логістика закупівель, логістика складування, транспортна логістика, виробнича логістика, логістика розподілу й збуту, інформаційна логістика [107].

С точки зору предмету дослідження дисертаційної роботи розглянуто задачі, які виникають у логістиці складування. Рух матеріальних потоків у логістичному ланцюзі неможливий без зосередження у визначених місцях потрібної кількості запасів, для збереження яких призначені склади. Складське господарство сприяє забезпеченню якості продукції, матеріалів, сировини.

Логістичний процес на сучасних складах передбачає наявність керуючих інформаційними потоками систем, які здійснюють:

- управління прийманням та відправкою вантажів;
- управління запасами на складі;
- обробку документації, яку отримують;
- підготовку супроводжувальних документів при відправці вантажів тощо.

Правильне управління логістичною системою сприяє підвищенню організованості як виробництва, так і збуту, поліпшенню використання територій підприємства, зниженню простоїв транспортних засобів та транспортних витрат, вивільненню робочої сили, ефективній організації збутової діяльності тощо. Залежно від обсягу продажу та виробництва підприємство обирає різні форми організації складування. Складське приміщення та його використання несе в собі основну частину ризику підвищення постійних витрат та потребує компромісних рішень у їх виборі та під час використання [109–111].

Нещодавно більше уваги було зосереджено на плануванні розміщення об'єктів, оскільки планування стало частиною стратегії успішності логістичної системи. Протягом останніх десятиліть фахівці використовували візуальне проектування нового макету розміщення товару, однак зі зростанням розмірів логістичних систем збільшувалась потреба до розробки комплексних інформаційних технологій, заснованих на вимогах логістичних компаній.

Таким чином, все більше науковців почали дослідження з розробки інформаційних технологій та поступово з'явилися більш удосконалені математичні методи та їх використання. Зауважимо, логістичні системи потребують актуалізації та розробки сучасних інформаційних додатків у системи складування та логістичного процесу на складі, та в останній час стали особливо актуальними у вітчизняній практиці в умовах ринкової економіки та поширеного ринку складського устаткування і широкого впровадження логістики, що вимагає подальшого детального та глибокого методичного опрацювання.

Стандартна форма складського приміщення у вигляді паралелепіпеду, для розміщення більшої кількості вантажів, у ньому використовують стелажі, які мають декілька ярусів. В залежності від вантажів використовують різні форми контейнерів для зберігання, наприклад, у формі паралелепіпеду, сфери тощо. Всі контейнери мають характеристики, якими можна їх описати. Прикладами характеристик являється вага, геометрична форма тощо. Стелажі складу мають відповідати описаним характеристикам. Приклад складу показано на рис. 1.3.

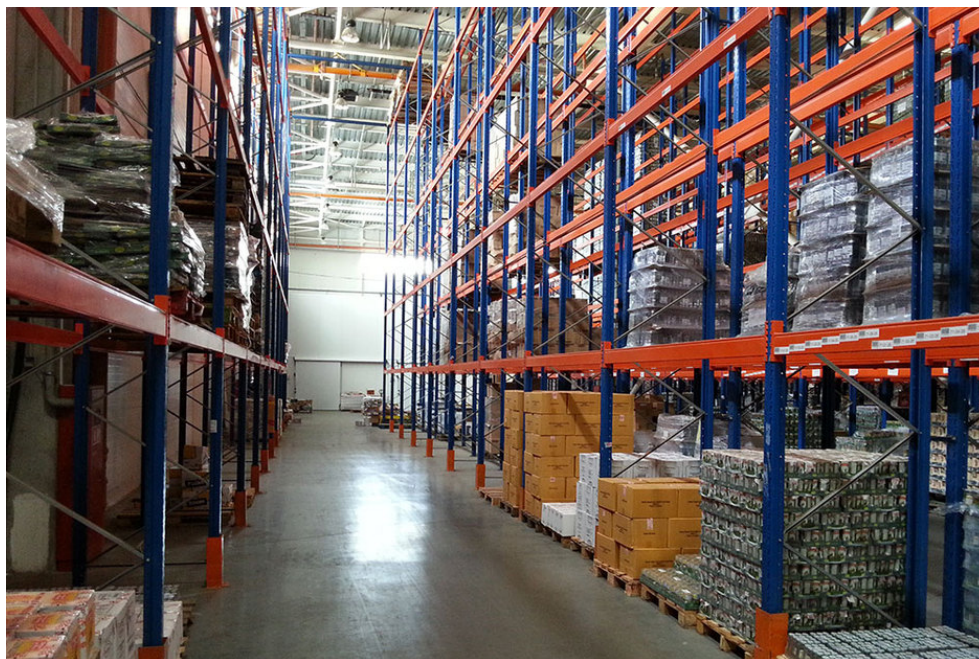


Рисунок 1.3 – Склад YarTrans Logistic у Київській області

Також під час транспортування необхідна упаковка вантажів у контейнер та розподіл завантаження у вантажівках на підставі характеристик, наприклад, маршруту доставки або для оптимального упакування товарів в контейнер, який має бути відправлено.

Рациональна розбивка складських площ на робочі (складські) зони дозволяє мінімізувати кількість переміщень на складі, забезпечує вільний доступ до кожної одиниці продукції, яка розміщена на складі, що оптимізує процес переробки вантажів складу та забезпечує максимальне використання наявних складських потужностей.

Можна зробити висновок, що логістика складування займає чи не найважливішу ланку з усіх інших різновидів логістики в Україні. Також важливим завданням поглиблення знань у цій сфері діяльності є надання конкретних пропозицій щодо пришвидшення потоків в складській діяльності за допомогою залучання сучасних інформаційних технологій [111]. Не менш важливим фактором являється вибір моделі збереження вантажів, він зможе заощадити фінансові витрати та прискорити роботу складської системи.

1.4 Задачі синтезу просторових конфігурацій в технологіях 3D-друку.

На даний час у багатьох галузях промисловості використовують порошкові матеріали різного хімічного та фазового складу. Зокрема це стосується технологій 3D-друку [112–117]. Вважається, що еліптична форма частинок порошку є найкращою для 3D-друку. В загальному випадку основну задачу зводять до визначення можливості застосування порошків титанових сплавів сферичної та несферичної форми, які пройшли процес гідрування та дегідрування. Тобто задача полягає в оптимальному заповненні заданого об'єму частинками заданої форми, як показано на рис. 1.4.

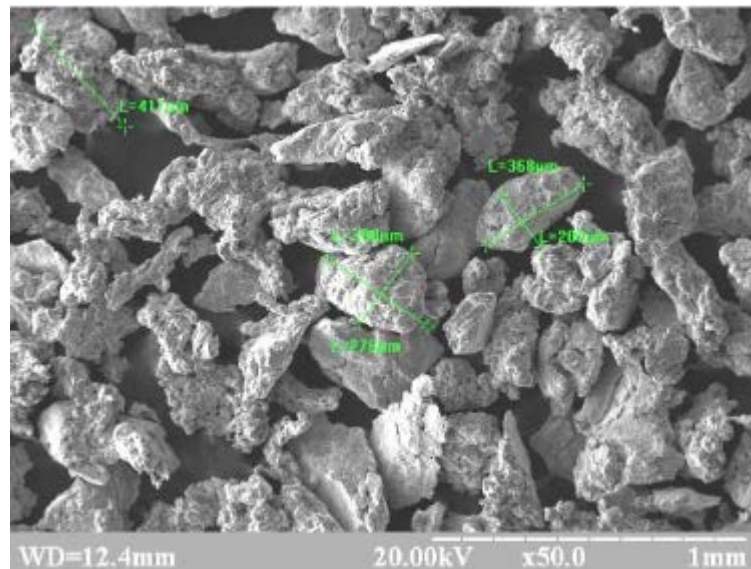


Рисунок 1.4 – Морфологія будови порошку титанового сплаву

Якість виробу технології 3D-друку залежить від якості матеріалу, який використовується. З іншого боку макет виробу необхідно моделювати з метою оптимального розміщення за заданим критерієм якості при 3D-друці.

Технології 3D-друку дають можливість виготовити продукцію за короткий проміжок часу, без додаткової остаточної обробки та здатністю відновлення пошкоджених виробів. Актуальною задачею для сучасних підприємств є оптимізація матеріальних та фінансових ресурсів, підвищення ефективності виробництва. Прискорити процеси проектування, розробки та виготовлення конструкторських деталей сьогодні дозволяють прогресивні технології 3D-друку та використання сучасних інформаційних технологій.

З метою прискорення проектування на основі конструктивних засобів математичного та комп'ютерного моделювання, математичних моделей, ефективних методів оптимізації та сучасних NLP-солверів, та створення на їх основі інформаційних технологій вирішують оптимізаційні задачі компоновання просторових об'єктів.

Вищезазначені технології використовуються під час друку на 3D-принтері для економії часу та енергії, це можна досягнути завдяки максимізації кількості виробів, що одночасно виготовляються та мінімізації кількості шарів друку за один робочий цикл.

Характерним є те, що незалежно від області застосування, необхідним стає рішення наступних задач:

- створення бази об'єктів;
- використання методів обробки та оптимізації дій;
- зберігання розроблених моделей у сховищі даних.

На кожному кроці використовують сучасні інформаційні технології, про що свідчить кількість публікацій в області різання та упакування за останні два десятиліття [112].

1.5 Огляд методів оптимізації компоновочного синтезу просторових об'єктів

Основну оптимізаційну задачу синтезу просторових конфігурацій об'єктів можна сформулювати так: необхідно скомпонувати заданий набір просторових об'єктів в заданій області так, щоб було виконано обмеження на взаємне їх розташування, а задана функція цілі досягала свого екстремального значення. В основу цих задач покладено різноманітні перетворення заданих наборів об'єктів та в результаті них об'єкти формують нову просторову конфігурацію. Під час синтезу об'єктів необхідно враховувати всі характеристики об'єктів, які залучені до оптимізаційного процесу, а саме – розміри, параметри розміщення тощо.

Зауважимо, що інформаційні технології синтезу складних технічних систем є найважливішою умовою підвищення якості ефективності їх функціонування і виробництва. Враховуючи темпи розвитку сучасних інформаційних технологій, задачі даного класу вимагають удосконалення існуючих програмних продуктів і являються причиною створення сучасних систем підтримки прийняття рішень на базі технологій об'єктно-орієнованого програмування, використання багатопоточного програмування та паралельних обчислень, сучасних сховищ даних та баз знань. У зарубіжних джерелах літератури використовують наступну класифікація задач C&P

(наприклад, типологія Дікхоффа [118]) задача прямокутного розкрою (Stock-Cutting Problems) [119], задача упакування об'єктів в контейнери (Bin-Packing Problems) [120], задача упакування в смугу (Strip-Packing Problems), задача упакування в «рюкзак» (Knapsack Problems) [121], задача сортування (Assortment Problems) [122], задача компоновки (Layout problems), задача про призначення (Nesting Problems), задача навантаження (Loading Problems) [123] тощо.

Для загального випадку точний розв'язок задачі неможливо отримати за час, обмежений поліномом, степеень якого дорівнює розмірності задачі та є NP-складною [69]. У зв'язку з цим розв'язання задач даного класу вирішують за допомогою евристики [55–70]. В роботах [71–79] автори пропонують підходи, які базуються на математичному моделюванні та оптимізаційних обчисленнях. Розглянемо деякі публікації за даним напрямком.

Harald Dyckhoff [118] вперше запропонував класифікацію задач упакування та оптимального розміщення. У роботі Gerhard Wäscher та ін. [104] запропоновано удосконалену класифікацію задач упакування. Авторами було запропоновано використовувати класифікацію за двома напрямками: output maximization та input minimization.

До першого належать задачі, в яких необхідно упакувати максимальну кількість об'єктів із заданої множини в область фіксованих розмірів, а саме:

- упакування однакових об'єктів (Identical Item Packing Problem);
- упакування близьких за розмірами об'єктів (Placement Problem);
- упакування різних за розмірами об'єктів (Knapsack Problem).

До другого – задачі, в яких необхідно або мінімізувати метричні характеристики області розміщення (Open Dimension Problem), або мінімізувати кількість областей розміщення фіксованих розмірів (Cutting Stock Problem та Bin Packing Problem).

Багато робіт присвячено задачам упакування куль [125–128]. Це обумовлено простотою завдання геометричної інформації про просторові об'єкти. Алгоритми упакування куль можна віднести до таких груп:

оптимізація за групами змінних, загальна перестановка об'єктів, змінні межі та інші оптимізаційні підходи [129].

У роботі [130] наведено огляд робіт, присвячених упакуванню сфероїдів, циліндрів та тіл довільної форми в задачах порошкової металургії. Описані в роботі підходи ґрунтуються на різних апроксимаціях довільних частинок та використанні евристичних методів.

Для моделювання щільних матеріалів можна використати метод моделювання на основі алгоритму упакування сферополієдрів [131], цей метод можна використати для віртуальних проектів, які можуть зберігатися в несферичних складових частинах.

Робота [132] описує задачу упакування сфер та будує математичну модель, на основі якої запропоновано швидкий алгоритм розміщення. У роботі [74] автор описує аналітичну модель ортогонального упакування прямокутних елементів та різноманітних з'єднань із них.

Розв'язанню задачі оптимального розміщення вантажних контейнерів різних форм (паралелепіпедів, циліндрів та інших нестандартних форм, утворені за допомогою паралелепіпедів) присвячені роботи [78, 133–135].

Lee та ін. [136] наводять комп'ютерну модель, призначену для визначення щільності гранульованих матеріалів шляхом упакування тривимірних еліпсоїдів. Запропоновано спеціальний підхід, який запобігає блокуванню частинок по мірі їх просування вглиб контейнера.

У статті Egeblad та ін. [137] описано ефективний спосіб розв'язання задачі упакування 2D-об'єктів у багатогранний контейнер. Основною ідеєю методу є точна одновимірна трансляція заданого полієдра в положення, яке мінімізує його об'єм перетину з усіма іншими полієдрами, використовуючи евристичні та мета-евристичні методи алгоритмів трансляції. Наведено результати чисельних експериментів у задачі упакування полієдрів у прямокутному контейнері. Використання простору контейнера покращується в середньому більш, ніж на 14% порівняно з попередніми методами, запропонованими в роботі [138]. Однак у експериментах допускають

загальний об'єм перекриття, яке відповідає одному відсотку від загального об'єму усіх полієдрів для цієї задачі.

Серед найважливіших задач слід виділити задачу пошуку найбільш вигідного взаємного розташування об'єктів різної суті з урахуванням різних обмежень. При розв'язанні такого роду задач важливо дотримуватися мінімально допустимих відстаней між розміщеними об'єктами, щоб уникнути будь-яких впливів (теплових, електромагнітних тощо) від одного об'єкта до іншого. Наприклад, в [139] побудовано математичну модель і запропоновано метод розв'язання задачі розміщення циліндрів, прямокутних паралелепіпедів, а також спеціальних об'єктів у прямій призмі з урахуванням мінімально допустимих відстаней і зон заборони.

Torquato та Jiao [140] досліджено щільне упакування багатогранників. Автори формулюють задачу отримання щільного упакування об'єктів у фундаментальну сітку з урахуванням граничних умов як оптимізаційну, яку вони називають адаптивною схемою стислих елементів, що стискаються.

У зв'язку з тим, що багато дослідників незалежно один від одного займалися розв'язанням задач, які належать до проблематики розкрою та упакування, в промисловості (і науковій літературі), виникло багато задач, часто різних задач одного типу, або, навпаки однакових задач для різного типу. Таким чином, виникла потреба в конструктивній класифікації задач на основі дослідження їхніх характерних особливостей. У 1990 році Dyckhoff запропонував типологію задач розміщення [118]. Удосконалена класифікація типів задач упакування та розміщення, наведена Wäscher, Haußner і Schumann в [104].

Одними з найбільш поширених методів розв'язання 3D-задач упакування прямокутних паралелепіпедів в контейнер (container loading problem) є підходи побудови стін (wall-building approaches) [141, 142], коли секції контейнера заповнюються. По перше усією шириною та висотою. Існує і ряд інших, які ґрунтуються на правилах алгоритмів розв'язання задач упакування прямокутних паралелепіпедів – гільйотинне різання (guillotine

cutting) [143], упорядковування паралелепіпедів (cuboid arrangements) [144], алгоритми пошуку із заборонаю (Taboo search algorithms) [145].

Daí та ін. [146] запропонували спеціальний алгоритм для отримання упакування тривимірних об'єктів різних форм. У роботі [147] було використано подання октодерева для апроксимації геометричних форм об'єктів.

У роботі [78] для розв'язання нестандартних тривимірних задач упакування за наявності додаткових обмежень наведено евристичний підхід, який ґрунтується на частково цілочисельному програмуванні. Для їх розв'язання автори пропонують алгоритми, що ґрунтуються на правилах та являються детермінованими методами, які можна ефективно використовувати для конкретних типів задач. Проте важко встановити правила для компонування об'єктів різних просторових форм.

Традиційні оптимізаційні алгоритми, такі, як методи гілок та меж, методи лінійного програмування та градієнтні методи, також можна використати для розв'язання задач упакування.

Martello, Pissinger та Vigo [121] навели алгоритм гілок та меж для задач про рюкзак (knapsack problems) та метод гілок та меж для 3D-задач упакування різних прямокутних паралелепіпедів, що ґрунтується на цьому алгоритмі, в мінімальну кількість однакових прямокутних контейнерів.

Landon і Balling [148] використовують градієнтні методи під час розміщення тривимірних об'єктів в контейнерах відповідно до критеріїв, які визначаються властивостями простору та маси. Об'єкти моделюють за допомогою контурного подання. Мінімальну відстань між парою об'єктів (minimum separation distance) розраховують шляхом знаходження двох найближчих одна до однієї точок на відповідних тілах. Відстань накладення (interference distance) розраховують як відстань, на яку один об'єкт має транслюватися в певному напрямі від іншого об'єкта так, щоб об'єкти торкнулися один одного. Обидва види відстаней обчислюють шляхом розв'язання оптимізаційної задачі з обмеженнями.

Гradientні методи є детермінованими, що може значно зменшити час обчислень, необхідний для отримання локально-оптимального розв'язку, оскільки множина напрямів пошуку обмежена лише перспективними напрямками. Проте розв'язок в цих випадках є лише найближчим локальним оптимумом по відношенню до початкової точки. Тому потрібно багаторазово повторювати процес розв'язання для різних початкових точок. За відсутності можливості явно обчислити gradientи, як це має місце для багатьох задач компоновки та упаковки, різні апроксимації можуть бути неточними, це може призвести до помилок у пошуку напряму руху.

Одним із способів розв'язання цієї проблеми, який пропонують, є метод мультистарту [149] – випадкове відновлення пошуку для певної кількості ітерацій. Якщо нова точка має краще значення, ніж поточний розв'язок, вона замінюється на кращий варіант, та пошук триває шляхом генерації точок з навколо нового розв'язку. Якщо ж нова точка має гіршу оцінку, ніж поточний розв'язок, то вона відкидається, і процес пошуку триває в околиці вихідної точки.

Для пошуку розв'язків задач упакування широко застосовують генетичні алгоритми. Їх часто використовують під час створення надвеликих інтегральних схем [150]. У роботі [151] запропоновано генетичний алгоритм для 3D-упакування прямокутних паралелепіпедів в контейнер.

Для швидкого прототипування Ikonen та ін. [152] застосовано генетичний алгоритм під час упакування 3D-неопуклих об'єктів в циліндричний контейнер. Допускають тільки повороти з кроком 45° навколо кожної координатної осі.

Генетичні алгоритми є стохастичними, в них закладена велика вірогідність випадковості. Це алгоритми нульового порядку, для яких потрібно тільки значення функцій. Вони надійні й ефективні у разі нерівних і розривних функцій. Негативною стороною цієї універсальності є те, що ці методи часто вимагають великої кількості обчислень функцій для досягнення оптимального розв'язку, навіть для простих задач. Тому вони вважаються

найбільш корисними для задач, в яких обчислення функцій не потребує великих витрат.

Детальний аналіз генетичних алгоритмів, зроблений Goldberg у роботі «Штучні нейронні мережі» (Artificial Neural Networks) [153]. Робота ґрунтується на моделюванні процесу обробки інформації у нейронній мережі. Система складається з багатьох простих вузлів (процесорів) або нейронів. Кожен нейрон має один або декілька зважених входів і виводить деяке значення, залежне від того, чи перевищив рівень активації нейрона деяке порогове значення. Можливість навчання – одна з головних переваг нейронних мереж перед традиційними алгоритмами.

Пошук із заборонами, розширений локальний пошук (Tabu Search) та метаевристичний алгоритм пошуку із заборонами є розвитком методу градієнтного спуску, було уперше запропоновано Glover [154], проте отримав визнання лише після публікацій цього ж автора [155, 156]. На відміну від методу градієнтного спуску, в методі пошуку із заборонами оцінюють підмножину сусідніх розв'язків на кожній ітерації та здійснюють перехід до розв'язку з кращою оцінкою з розглянутих. Поточний розв'язок завжди замінюється на кращий сусідній, навіть якщо новий розв'язок має гіршу оцінку якості. До того ж, зберігається обмежений список, який містить історію раніше розглянутих розв'язків. Цей "табу" список використовують, щоб уникнути повторного розгляду областей, які вже було розглянуто в недавній історії пошуку.

Використовують метод штрафних функцій, в якому на неприпустимі розв'язки накладається штраф. Розрахунок перетину між об'єктами ґрунтується на перетині трикутників, які покривають поверхню об'єктів. Щоб скоротити кількість обчислень під час визначення перетину об'єктів, в першу чергу перевіряють на перетин їхні обмежувальні рамки.

Також використовують метод покрокового покращення (Iterative Improvement Searches), наступний розв'язок та оцінка лежить в околі поточного розв'язку. Таких методів вимагає визначення відповідної функції

цілі для оцінки сусідніх розв'язків. Найчастіше використовують різновид методу оптимізації по групах змінних, який називають методом послідовно-одиночного розміщення. Слід зазначити, що для початку роботи методу потрібний початковий розв'язок, причому бажано такий, що має гарну оцінку якості. Як правило, такий розв'язок отримують за рахунок застосування конструктивної (зазвичай швидкої) евристики. Часто для задач розміщення початковий розв'язок будують на основі послідовності, отриманої шляхом сортування об'єктів в порядку зменшення висоти, ширини або площі. Це забезпечує досить хороший розв'язок, тому що спочатку розміщуються більші об'єкти і менші об'єкти можуть бути розміщені в проміжках між ними.

Фундаментальні дослідження нейронних мереж було проведено в 1943 році McCulloch та Pitts [157]. В області розкрою та упакування нейронні мережі використовують у поєднанні з іншими методами пошуку та можуть бути застосовані для отримання вхідної послідовності, що задає порядок, в якому об'єкти мають бути розміщені. Вони також були використані для розробки стратегій розміщення.

В роботах [158] та [159] запропоновано алгоритми імітаційного відпалу для задач компоновки мікросхем. Автори привели приклади розв'язку міжелементних (inter cell) та внутрішньоелементних (intra-cell) задач упакування. Суть алгоритму полягає в такому взаємному розміщенні об'єктів, за допомогою якого зводиться до мінімуму загальний матеріальний потік між об'єктами.

У роботі [124] авторами Szykman і Sagan розширено застосування цього підходу на тривимірні механічні та електромеханічні компонування. У їхньому підході об'єктами виступають паралелепіпеди та циліндри, які допускають повороти, що є кратними 90 градусам. Та в подальшому використано підхід, який ґрунтується на збуреннях, в яких неприпустимі точки з перетином об'єктів і порушеннями обмежень дозволяються та штрафуються. Множина рухів включає трансляцію об'єктів, їхні повороти та перестановки. Адаптивний розклад відпалу (adaptive annealing schedule) [160]

було використано для контролю температури, а стратегію ймовірнісного вибору руху [161] – для вибору рухів на основі попередніх характеристик.

Комплексний підхід до задач тривимірного компонування та задач трасування було представлено в роботі Szykman та Cagan [124]. Експерименти показали, що одночасне виконання компонування та трасування приводить до кращих результатів, ніж за типового підходу, коли спочатку відбувається компонування, а тільки потім трасування (layout – then – route approach).

Kolli та ін. [162] узагальнили роботу Szykman та Cagan, ослабивши обмеження на геометричну форму об'єктів і повороти. Для швидкої оцінки перетину між частинами об'єктів складних форм використовують октодерева. Можна регулювати рівень деталізації октодерева, що використовується на певній стадії алгоритму імітаційного відпалу, щоб зробити алгоритм ефективнішим.

Авторами Hooke та Jeeves [163] було розглянуто pattern search algorithm (алгоритми прямого пошуку за шаблоном). Ці алгоритми являють собою підмножину алгоритмів прямого пошуку, вони ефективні у випадках, коли цільова функція є нелінійною, багатоекстремальною, для якої інформація про похідні – недоступна.

Методи прямого пошуку визначають як послідовне дослідження пробних розв'язків, що включають порівняння кожного пробного розв'язку з найкращим вже отриманим розв'язком, а також стратегію визначення наступного пробного розв'язку.

Torczon та Trosset [164] розвинули загальну структуру та ключові елементи цих методів і визначили загальну концепцію. Вона називається узагальненим методом пошуку за шаблоном.

Yin та Cagan [165] вперше застосували алгоритм пошуку за шаблоном задач 3D-розміщення. Введені п'ять модифікацій задля допомоги в отриманні якісних розв'язків задач розміщення, що в результаті привело до розширеного алгоритму пошуку за шаблоном. Цей алгоритм було застосовано до ряду

тестових та промислових задач [166], він показав покращення швидкості на 1-2 порядки порівняно з алгоритмом імітаційного відпалу для розв'язків аналогічної якості. В алгоритм було долучено різні евристичні правила, щоб проводити пошук уздовж перспективних напрямів [167].

У розширеному алгоритмі пошуку за шаблоном множину шаблонних напрямів можна оновити відповідно до ефективності попередніх ітерацій. Перестановки використовують тільки тоді, коли за цієї довжини кроку неможливо перейти в кращу точку шляхом трансляцій та поворотів. Зауважимо, що для даного алгоритму дозволені як перетворення трансляції, так і їх повороти.

Aladahalli та ін. [168] для розв'язання 3D компоновальних задач розробили спеціальний алгоритм пошуку за шаблоном, в якому функції мети та обмеження об'єднуються в одну оцінну функцію (objective function-based pattern search). В першу чергу застосовують рухи, які приводять до найбільшої зміни (поліпшення) функції цілі.

Dai та Cha [146, 147] розробили Combined approaches (змішані підходи). Такі підходи мають переваги двох або більше алгоритмів пошуку та поєднують їх в процесі розв'язання задач. Алгоритм поєднує в собі евристичні правила й інші алгоритми нейронних мереж для розв'язання задач компоновання.

Eisenbrand та ін. [169] з метою розрахунку місткості багажників автомобілів запропонували новий підхід до розв'язання задачі розміщення максимальної кількості прямокутних паралелепіпедів в область складної форми. Цей підхід поєднує в собі комбінаторний метод, який ґрунтується на сітках та методі імітаційного відпалу. Зазначимо, що паралелепіпеди допускають будь-які повороти.

Allen та ін. [170] запропонували спеціальний змішаний алгоритм для ортогонального упакування прямокутних паралелепіпедів (блоків) в прямокутний контейнер мінімальної довжини, ширина та висота якого фіксовані. Алгоритм методу складається з двох основних блоків: евристичного

та метаевристичного. На початковому етапі за допомогою евристичного алгоритму виконують швидке упакування певної кількості блоків (three-dimensional best fit). А на наступному (метаевристичному) – упакування частини блоків, які zostалися. Така комбінація покращує отримуваний розв'язок порівняно з розв'язками, які отримують тільки за допомогою попереднього блока.

Peng та ін. [171] розглянули змішаний алгоритм для розв'язання задачі завантаження контейнера. Допускають тільки ортогональне упакування блоків в контейнер. Спочатку авторами введено основний евристичний алгоритм, який полягає в отриманні допустимого розв'язку. Одночасно використовують спеціальну структуру, яка зветься послідовністю упакування та служить для вибору блоку, який завантажують на кожному кроці упакування. Далі розглядають алгоритм імітаційного відпалу для пошуку наближення до оптимального розв'язку поставленої задачі.

Огляд сучасних солверів, що реалізують оптимізаційні методи розв'язання задач компоновочного синтезу просторових об'єктів наведено у розділі 4 при практичній реалізації інформаційної технології.

1.6 Вербальна постановка та основні завдання дисертаційного дослідження

Наведений клас технічних та соціально-економічних систем зв'язаний з представленням, зберіганням та перетворенням геометричної інформації про складові об'єкти та візуалізацією отриманих рішень в процесі синтезу складних просторових конфігурацій геометричних об'єктів (ГО). При взаємодії матеріальних об'єктів, які беруть участь у процесі синтезу системи потрібно враховувати геометричну форму, метричні характеристики (розміри) об'єктів, а також різні обмеження на їх взаємне розміщення. Для опису зовнішнього вигляду, обрису та взаємного розміщення сукупності матеріальних об'єктів або їх частин використовують термін *конфігурація*. В

проектній геометрії під конфігурацією розуміють деяке розміщення множини точок, прямих або поверхонь у просторі відповідної розмірності [172, 173].

Для ілюстрації введених понять наведемо кілька найпростіших прикладів. Конфігураційний простір матеріальної точки на площині є сукупністю двох, а в просторі – трьох її координат (наприклад, декартових). Конфігураційний простір системи n точок є прямим добутком конфігураційних просторів, який відповідає кожній точці і задається $3n$ координатами. Якщо ж розглядати сукупність цих же точок, які не лежать на одній прямій як єдине ціле, то їх конфігураційний простір задається трьома координатами центру мас (інерції) і ще трьома змінними, які задають орієнтацію системи відносно осей, що переміщуються разом із центром мас. Решта $3n-6$ параметрів задають розташування точок одна відносно іншої.

Вільне тверде тіло має шість степенів вільності. Тому його конфігураційний простір можна задати сукупністю трьох координат центра інерції і трьох кутів Ейлера, які визначають поворот системи осей, незмінно зв'язаної з тілом, відносно нерухомої системи координат. Інший спосіб полягає у виборі трьох точок, які належать тілу і не лежать на одній прямій. Тоді конфігураційний простір визначають, наприклад, трьома координатами однієї точки, двома – другої і однією – третьої. Конфігураційний простір системи для твердих тіл у просторі є сукупністю координат. За наявності жорстких зв'язків між тілами, інших обмежень на їх взаємне розміщення розмірність конфігураційного простору зменшується відповідно до зміни кількості степенів вільності системи.

Поняття конфігураційного простору знайшло широке застосування перш за все при дослідженні динаміки твердих тіл. У будь-який фіксований момент часу точка в цьому просторі визначає стан системи, що характеризується узагальненими координатами складових її матеріальних об'єктів. Параметризована крива в конфігураційному просторі є траєкторією руху системи і повністю визначає її еволюцію.

При цьому в рамках теорії динаміки твердих тіл властивості конфігураційних просторів з урахуванням різної форми, змінних метричних параметрів (розмірів), а також обмежень на взаємне розташування об'єктів, як правило, не розглядалися. В таких випадках зазначені характеристики виступають додатковими узагальненими змінними конфігураційного простору, а урахування обмежень на взаємне розміщення об'єктів потребує залучення спеціального математичного апарату. Таким чином, дані дослідження природним чином інтегруються з основними положеннями загальної теорії геометричного проектування, зокрема, з властивостями простору геометричних інформацій, вперше визначеного в [4, 177].

Поняття геометричної інформації нерозривно зв'язано з геометричним об'єктом. У свою чергу, поняття ГО є початковим і формального визначення не має. Під геометричним об'єктом будемо розглядати точкову множину арифметичного евклідового простору заданої розмірності. Для побудови математичних моделей реальних матеріальних об'єктів клас точкових множин може бути значно звужений. У зв'язку з цим при формалізації різних класів геометричних об'єктів вводять відповідні алгебро-топологічні обмеження. Для точкових множин $R^3(R^2)$ простору в роботах [4, 178] було виділено клас так званих φ -об'єктів.

Визначення 1. Точкова множина $S \subset R^3$ називається φ об'єктом, якщо вона канонічно замкнута; внутрішність ($int S$) і замикання ($cl S$) множини мають один і той же гомотопічний тип; для будь-якої точки множини $int S$ існує окіл $U \subset int S$, такий, що $int U$ і мають один і той же гомотопічний тип.

Для точкових множин $S \subset R^2$ досить виконання перших двох умов. Надалі, щоб уникнути неоднозначності визначень, будемо вважати, що $S \subset R^3$. При цьому отримані результати зазвичай поширюються на випадок $S \subset R^2$.

Будь-який геометричний об'єкт S має певну просторову форму, задані метричні характеристики та займає певне положення в просторі R^3 .

Здійснюючи афінні перетворення типу трансляції та повороту об'єкт S змінює своє положення відносно нерухомої системи координат $Oxyz$ у просторі R^3 . Для характеристики такого стану зв'яжемо з об'єктом власну систему координат $Ox'y'z'$, яку назвемо рухомою. Початок власної системи координат назвемо *полюсом* об'єкта S . Як полюс, частіше за все, обирають довільну внутрішню точку S . При цьому виходячи з геометричних або фізичних міркувань можна дати відповідні рекомендації для вибору полюса. Наприклад, для простоти аналітичного опису центрально-симетричних об'єктів полюс вибирають у центрі симетрії. Якщо об'єкт симетричний відносно деякої осі, то з нею поєднується вісь його власної системи координат. Полюс твердого тіла потрібно поєднувати з його центром інерції тощо.

Наведені вище роботи формують поняття геометричної інформації g про об'єкт S , що містить:

- просторову форму $\{s\}$ як клас еквівалентності на сукупності точкових множин простору R^3 ;
- метричні параметри $\{\mu\}$, що характеризують «розміри» точкових множин, які мають форму $\{s\}$;
- параметри розміщення $\{p\}$, здатні фіксувати розміщення точкової множини в просторі.

Таким чином, геометрична інформація має вигляд $g = (\{s\}, \{\mu\}, \{p\})$.

Синтез просторових конфігурацій зв'язаний з відображенням геометричної інформації про сукупність матеріальних об'єктів при виконанні заданої системи обмежень. В задачі компоновочного синтезу такими обмеженнями є умови неперетину об'єктів та розташування їх в заданій області. Таку область зазвичай називають контейнером. Клас задач зв'язаний з відображенням геометричної інформації називають задачами геометричного проектування [1–6]. Найбільш поширеним є клас оптимізаційних задач геометричного проектування, в яких необхідно знайти мінімум (максимум)

заданого критерія якості, який залежить від параметрів геометричної інформації про матеріальні об'єкти. Оптимізаційні задачі геометричного проектування є вкрай складними, багатоекстремальними та великої розмірності. Точні методи розв'язання таких задач існують лише для вузького їх класу. У загальному випадку для ефективного розв'язання задач компоновочного синтезу просторових об'єктів необхідно використовувати сучасні інформаційні технології.

На підставі викладеного вище сформулюємо наступні задачі дисертаційного дослідження:

- запропонувати класифікацію математичних моделей просторових конфігурацій з урахуванням аналітичного опису геометричних об'єктів, формалізації умов на їх взаємне розташування та критеріїв якості;

- розробити інформаційно-аналітичну модель опису структур даних у процесі створення складних просторових конфігурацій;

- виконати й провести аналіз консолідації структур даних геометричної інформації, яку використовують при оптимізації та візуалізації просторових конфігурацій;

- розробити інформаційну технологію динамічного перетворення структури даних геометричної інформації в процесі синтезу просторових конфігурацій складних об'єктів;

- розробити методи синтезу просторових конфігурацій сферичних об'єктів із застосуванням розробленої інформаційної технології;

- розробити методи покращення локально-оптимальних розв'язків у задачах компоновочного синтезу просторових об'єктів.

1.7 Висновки по розділу

Аналіз наукової літератури за темою дисертації показав, що існує широкий клас задач компоновочного синтезу конфігурацій, в яких необхідно враховувати просторові форми об'єктів. Було проаналізовано сучасний стан

упровадження моделей, методів та інформаційних технологій синтезу складних систем з урахуванням просторової форми складових об'єктів та визначено, що задачі синтезу виникають в аерокосмічній галузі, логістики складування, в системах 3D-друку. В них зазвичай використовують базові об'єкти, які мають форму паралелепіпеду, конусу, багатокутнику сферичну форму та складні об'єкти із зазначеними складовими. Такі задачі мають свої особливості та потребують побудови відповідних математичних моделей та спеціальних методів їх розв'язання. В роботі наведені неформальні постановки практичних задач компоновки бортового обладнання літальних апаратів, задач складування в логістичних системах та задачі, які виникають у сучасних технологіях 3D-друку. Такі задачі відносять до класу задач геометричного проектування.

В силу складності задач компоновки просторові конфігурації об'єктів довільної форми зазвичай не розглядались. При цьому метричні характеристики базових об'єктів вважають фіксованими, за винятком хіба що розмірів контейнерів. Таким чином, розширення класу задач компоновочного синтезу на випадок довільних форм зі змінними метричними характеристиками об'єктів є дуже актуальними.

Задачі компоновочного синтезу просторових об'єктів є оптимізаційними. У зв'язку з цим було наведено аналіз методів оптимізації, які виникають при розміщенні просторових об'єктів в заданій області. На сучасному етапі ефективно розв'язання оптимізаційних задач геометричного проектування неможливе без використання інформаційних технологій, зв'язаних із представленням, зберіганням та перетворенням геометричної інформації про складові об'єкти й візуалізацією отриманих рішень. В свою чергу розробка інформаційної технології вимагає побудови адекватних математичних моделей та ефективних методів оптимізації для зазначеного класу задач.

Список наукових публікацій, які використано у даному розділі наведено у повному списку використаних джерел [1 – 177].

2 РОЗРОБЛЕННЯ МОДЕЛЕЙ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ КОМПОНОВОЧНОГО СИНТЕЗУ ПРОСТОРОВИХ ОБ'ЄКТІВ

2.1 Конфігураційний простір геометричних об'єктів

Дослідження конфігурацій просторових об'єктів природньо зв'язано із поняттям конфігураційного простору [174–176]. Неформально конфігураційний простір можна визначити як сукупність геометричних змінних, які задають розміщення в просторі деякої системи та її частин як відносно одна одної, так і щодо заданої системи відліку. Число координат (параметрів), які визначають положення системи, залежить від кількості матеріальних об'єктів (тіл), з яких вона складається, а також від характеру накладених на них зв'язків. Такі координати можуть мати будь-який геометричний сенс, наприклад, визначати відрізки прямих, дуг, обмежені поверхні, кути, площі, обсяги тощо.

Незалежні змінні, які однозначно визначають положення системи матеріальних об'єктів у просторі і кількість яких дорівнює кількості степенів вільності системи, називають узагальненими координатами.

Таким чином, конфігураційний простір можна визначити як абстрактний простір, який задає конфігурацію системи, тобто сукупність значень всіх її узагальнених координат. При цьому число степенів вільності системи задає розмірність конфігураційного простору.

Природним чином задання просторової форми $\{s\}$ геометричного об'єкта $S \subset R^3$ є побудова рівняння його границі $fr S$, тобто

$$f(\xi) = 0, \quad (2.1)$$

де $\xi = (x, y, z)$ – координати точки простору $S \subset R^3$.

В окремому випадку, якщо $S \subset R^2$, то $\xi = (x, y)$. Зауважимо, що задача визначення геометричного об'єкта S за заданою функцією, яка задовольняє

умову (2.1) (пряма задача аналітичної геометрії), має однозначне рішення. При цьому для заданого об'єкта можна побудувати нескінченну кількість рівнянь $f(\xi) = 0$ (зворотну задачу аналітичної геометрії). Цей факт дозволяє виділяти різні класи математичних моделей геометричних об'єктів з урахуванням додаткових властивостей функції $f(\xi)$. Наприклад, це можуть бути умови диференційованості $f(\xi)$. Вибір додаткових властивостей функцій $f(\xi)$ може визначатися з геометричних властивостей об'єктів. По-перше, мова йде про властивості нормальності рівняння границі $fr S$ геометричного об'єкта S . Функцію $f(\xi)$, визначену в R^3 , називають нормальною функцією, а рівняння $f(\xi) = 0$ – нормальним рівнянням [179] границі геометричного об'єкта $S \subset R^3$, якщо значення функції за модулем дорівнюють найкоротшій відстані від будь-якої точки $\xi \in R^3$ до $fr S$, тобто

$$|f(\xi)| = \inf_{\zeta \in fr S} \|\xi - \zeta\|.$$

Якщо функція $f(\xi)$ достатньо гладка в околі граничних точок об'єкту S та із заданою точністю задовольняє рівняння нормальності, то вона називається нормалізованою [179]. Використання властивостей нормальності і нормалізованості функцій і рівнянь границі ГО дозволяє отримувати цікаві властивості відповідних конфігураційних просторів.

У загальному випадку рівняння границі $fr S$ геометричного об'єкта S містить певні параметри $\mu = (\mu_1, \dots, \mu_k)$, які можна розглядати як змінні, тобто

$$f(\xi, \mu) = 0. \quad (2.2)$$

Нехай функція $f(\xi, \mu)$ визначена і неперервна на $R^m = R^3 \times D$, де $D \subseteq R^k$ – область допустимих значень параметрів μ_1, \dots, μ_k , $m = k + 3$. Припустимо, що ГО мають одну і ту ж просторову форму, якщо їх рівняння границі можна подати у вигляді (2.1) при деякому фіксованому $\mu \in D$, причому

$$f(\xi, \mu) > 0, \text{ якщо } \xi \in \text{int } S; \quad (2.3)$$

$$f(\xi, \mu) < 0, \text{ якщо } \xi \in R^m \setminus cl S. \quad (2.4)$$

Таким чином, сукупність параметрів $\mu \in D$ задає клас еквівалентності на множині геометричних об'єктів S як точкових множин простору R^3 . Параметри $\mu = (\mu_1, \dots, \mu_k)$ назовемо *параметрами просторової форми*.

При афінних перетвореннях руху об'єкта змінюється положення його власної системи координат відносно деякої нерухомої системи координат простору R^3 . Для характеристики такого стану задамо так звані *параметри розміщення* $\{p\} = \{u, v\}$. Вектор u визначає координати полюса, тобто центра рухомої системи координат $Ox'y'z'$, зв'язаної з об'єктом S , відносно нерухомої системи $Oxyz$. Вектор v задає кутові параметри, тобто характеризує взаємне розміщення осей рухомої і нерухомої систем координат.

Якщо $S \subset R^2$, то $u = (u_1, u_2)$, $v = \alpha$. Якщо $S \subset R^3$, то $u = (u_1, u_2, u_3)$, $v = (\alpha, \beta, \gamma)$. Як кути α, β, γ можна вибирати кути Ейлера.

У загальному випадку для об'єкта $S \subset R^3$ (R^2) маємо $p = (p_1, \dots, p_l)$, де $l=3$, якщо $S \subset R^2$, і $l=6$, якщо $S \subset R^3$.

Положення геометричного об'єкта S відносно нерухомої системи координат $Oxyz$ задається так званим рівнянням загального положення

$$F(\xi, \mu, u, v) = f[A(\xi - u), \mu] = 0, \quad (2.5)$$

де $\xi = (x, y, z)$, а A – ортогональний оператор, виражений через кутові параметри v .

Для $S \subset R^2$ можна записати

$$A = \begin{pmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix}.$$

При відповідному перетворенні в просторі R^3 маємо

$$A = \begin{pmatrix} \cos \alpha \cos \vartheta + \sin \alpha \sin \beta \sin \vartheta & \sin \alpha \sin \beta \cos \vartheta - \cos \alpha \sin \vartheta & \sin \alpha \cos \beta \\ \cos \beta \sin \vartheta & \cos \beta \cos \vartheta & -\sin \beta \\ \cos \alpha \sin \beta \sin \vartheta - \sin \alpha \cos \vartheta & \sin \alpha \sin \vartheta + \sin \alpha \cos \beta \cos \vartheta & \cos \alpha \cos \beta \end{pmatrix}.$$

Таким чином, рівняння (2.5) може бути покладено в основу завдання геометричної інформації $g = (\{s\}, \{\mu\}, \{p\})$ про об'єкт $S \subset R^3(R^2)$, оскільки містить всі її компоненти.

У роботах [4, 177] розглянуто лінійний простір канонічних інформацій та простір інформацій G для скінченної системи φ -об'єктів. Відповідно до загальної концепції побудови таких просторів задамо їх структуру таким чином. Нехай об'єкт $S \subset R^3$ задається геометричною інформацією $g = (\{s\}, \{\mu\}, \{p\})$, де форма $\{s\}$ визначається функцією $f(\xi, \mu)$, яка задовольняє умови (2.2) – (2.4), а метричні параметри $\{\mu\}$ і параметри розміщення $\{p\}$ мають вигляд $\mu = (\mu_1, \dots, \mu_k)$ и $p = (p_1, \dots, p_l)$ відповідно.

Сформуємо простір

$$G(S) = C(R^3) \times R^m,$$

де $C(R^3)$ – простір безперервних у R^3 функцій, а $m = k + l$.

Простір $G(S)$ назвемо простором канонічних інформацій геометричного об'єкта $S \subset R^3$. Елементи $G(S)$ по аналогії із позначенням геометричної інформації наведемо у вигляді $g = (f, \mu, p)$. Якщо функція $f \in C(R^3)$ є нормалізованою, то відповідний простір назвемо простором нормалізованих канонічних інформацій і позначимо $\tilde{G}(S)$. Зрозуміло, що простори $G(S)$ і $\tilde{G}(S)$ нескінченновимірні. При цьому вони мають ряд важливих властивостей, які виходять із властивостей їх скінченновимірних підпросторів.

Визначимо конфігураційний простір $\Xi(S)$ геометричного об'єкта S , розглянемо параметри просторової форми $\{\mu\}$ і параметри розміщення $\{p\}$ як узагальнені координати об'єкта фіксованої форми $\{s\}$. Тоді $\Xi(S)$ є

різноманітністю простору канонічних інформацій $G(S)$. Надалі конфігураційний простір розмірності m позначимо $\Xi^m(S)$, де m дорівнює числу його узагальнених координат. Якщо всі параметри просторової форми $\mu = (\mu_1, \dots, \mu_k)$ і параметри розміщення $p = (p_1, \dots, p_l)$ геометричного об'єкта S є узагальненими змінними, то розмірність конфігураційного простору $\Xi^m(S)$ дорівнює $m = k + l$.

Частина змінних геометричної інформації $g = (\{s\}, \{\mu\}, \{p\})$ може бути фіксованою. Наприклад, при обмеженні тільки різноманітними трансляціями об'єкта $S \subset R^3$ число параметрів розміщення зменшиться до трьох. Відповідний конфігураційний простір $\Xi^m(S)$ матиме розмірність $m = k + 3$. При конгруентних перетвореннях об'єкта $S \subset R^3$ розмірність конфігураційного простору дорівнює шести. При заданих значеннях узагальнених змінних $g = (\mu, p)$ конфігураційного простору $\Xi^m(S)$ точка $g \in \Xi^m(S)$ однозначно визначає геометричний об'єкт $S(g) \subset R^3$, який назовемо *зображенням* або *зображувальною точкою*. Зауважимо, що аналогічне визначення [176] зображувальної точки використовують у загальній теорії конфігураційних просторів.

2.2 Об'єктно-орієнтована модель геометричних об'єктів

Розглядають три групи об'єктів: двовимірні (2D), тривимірні (3D) і багатовимірні (nD). Кожен із базових об'єктів задається рівнянням його межі. У роботах [180, 181] пропонують розглядати як базові 2D-об'єкти кола, еліпси, прямокутники, опуклі багатокутники, так і замкнуті доповнення до всього простору R^2 . Базовими тривимірними об'єктами являються кулі, прямі паралелепіеди, прямі кругові циліндри, кругові конуси, опуклі багатогранники і замикання доповнень цих об'єктів до простору R^3 [182]. Гіперпаралелепіеди, гіперсфери і суперсфери розглядаються як базові

багатовимірні об'єкти. Клас базових об'єктів може бути розширено, виходячи з особливостей практичних завдань.

Для адекватнішого опису матеріальних об'єктів використовуємо складні об'єкти. За допомогою теоретико-множинних операцій (об'єднання, перетинання, доповнення) будемо формувати складний геометричний об'єкт $S_B = B(S_1, \dots, S_n)$, де S_1, \dots, S_n – базові об'єкти, а оператор B визначає структуру S_B .

На основі наведеної вище типології була розроблена об'єктно-орієнтовна модель геометричного об'єкта (рис. 2.1).

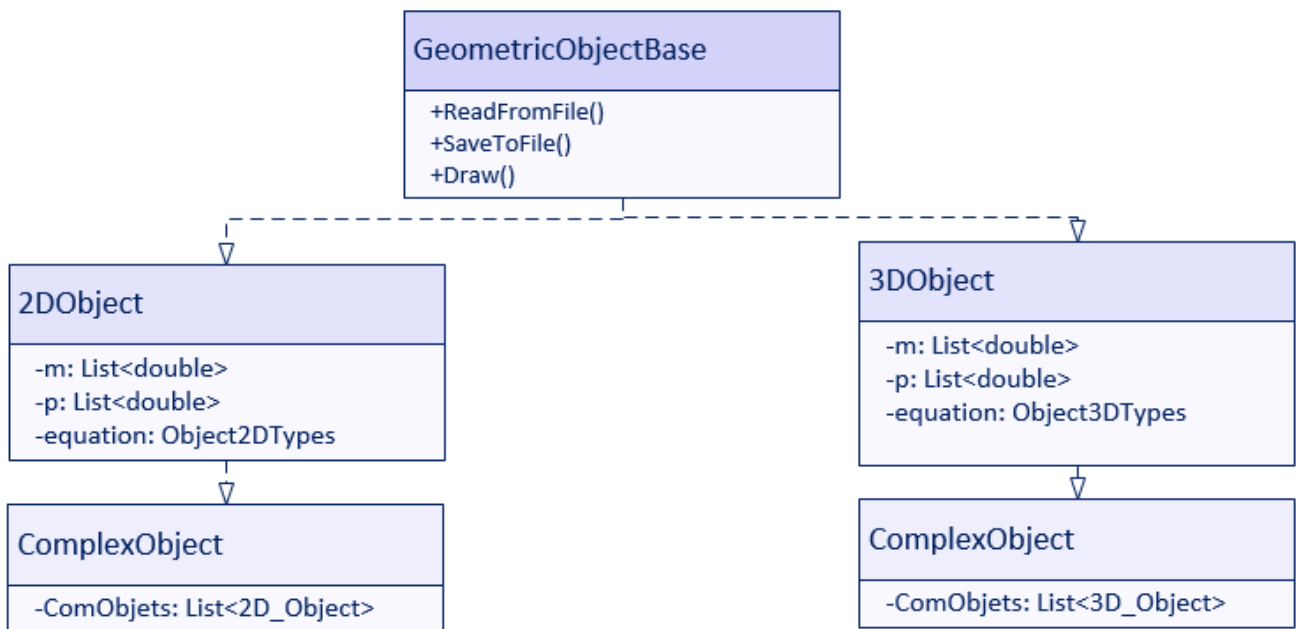


Рисунок 2.1 – Об'єктно-орієнтовна модель геометричного об'єкта

Ця поліморфна модель містить абстрактний клас GeometryObjectBase, який описує набір віртуальних методів, які реалізують операції загальні для всіх об'єктів. Такими операціями є: отримання інформації з файлу, збереження файлу, візуалізація на екрані тощо. Нащадки класу GeometryObjectBase мають дві імплементації відповідно до розмірності простору ГО. Кожен із цих класів містить поля і віртуальні методи, які забезпечують афінні перетворення руху у відповідному просторі. Наприклад, для 3D-об'єкта такі поля будуть мати три

координати вектору трансляції та три кути повороту. Нащадки, які реалізують складні об'єкти відповідного простору формують наступний рівень.

Кожен із них містить інформацію про метричні параметри цього типу об'єкта і реалізує необхідні методи. Складний об'єкт буде містити інформацію про набір об'єктів відповідного простору і реалізацію методів, які будуть застосовуватися до кожного елементу цього набору. Зауважимо, що такий елемент може бути іншим складним об'єктом. Таким чином, ця реалізація дозволяє створювати і обробляти складні об'єкти будь-якого рівня складності.

Розглянемо у просторі R^3 сукупність геометричних об'єктів $S_i, i \in J_n = \{1, 2, \dots, n\}$, кожний із яких задають геометричною інформацією $g^i = (\{s^i\}, \{\mu^i\}, \{p^i\})$. Просторова форма $\{s^i\}$ і метричні параметри $\{\mu^i\}$ об'єктів $S_i, i \in J_n$ визначають функціями $f_i \in C(R^3)$, які задовольняють умовам (2.6)-(2.8):

$$f_i(\xi, \mu^i) = 0, \text{ якщо } \xi \in fr S; \quad (2.6)$$

$$f_i(\xi, \mu^i) > 0, \text{ якщо } \xi \in int S; \quad (2.7)$$

$$f_i(\xi, \mu^i) < 0, \text{ якщо } \xi \in R^m \setminus cl S. \quad (2.8)$$

Для кожного об'єкта $S_i, i \in J_n$ вибираємо полюс O_i , з яким зв'яжемо рухому систему координат. У просторі R^3 параметри розміщення $\{p^i\}$ об'єкта S_i у загальному випадку задають трьома координатами $u^i = (x_i, y_i, z_i)$ полюса O_i і трьома кутами Ейлера $v^i = (\alpha_i, \beta_i, \gamma_i)$, тобто $p^i = (x_i, y_i, z_i, \alpha_i, \beta_i, \gamma_i), i \in J_n$. У просторі R^2 параметри розміщення мають вигляд $p^i = (x_i, y_i, \alpha_i)$. У загальному випадку $p^i = (p_1^i, \dots, p_l^i)$, де $l = 3$, якщо $S \subset R^2$ і $l = 6$, якщо $S \subset R^3$. Оскільки число метричних параметрів різне для кожного із об'єктів S_i , припустимо, що $\mu^i = (\mu_1^i, \dots, \mu_{k_i}^i), i \in J_n$.

Геометрична інформація g^i однозначно визначає геометричний об'єкт $S_i = S_i(g^i)$ і індукує простір канонічних інформацій $G^i(S_i)$, $i \in J_n$. За допомогою теоретико-множинних операцій (об'єднання, перетинання, доповнення, різниці, симетричної різниці) сформуємо складний геометричний об'єкт:

$$S_B = S_B(g^1, \dots, g^n) = B(S_1, \dots, S_n), \quad (2.9)$$

де оператор B визначає предикатний опис [179] складного об'єкта S_B . При цьому об'єкти $S_i = S_i(g^i)$, $i \in J_n$ назвемо *базовими*.

Нехай

$$S_B = B(S_1, \dots, S_n) = \bigcup_{i=1}^n S_i. \quad (2.10)$$

Визначення. Об'єкт $S_B = B(S_1, \dots, S_n)$, який наведено у вигляді (2.10), назвемо *складовим*.

Зв'яжемо з об'єктом S_B власну систему координат $Ox'y'z'$ з центром в деякій точці O_B , яку за аналогією назвемо полюсом складеного об'єкта S_B . Систему $Ox'y'z'$ можна з'єднати з власною системою будь-якого з об'єктів S_i , $i \in J_n$, наприклад, об'єкта S_1 . Положення системи $Ox'y'z'$ відносно нерухомої системи координат $Oxyz$ визначатиметься координатами полюса і кутами Ейлера $v_B = (\alpha_B, \beta_B, \gamma_B)$, тобто параметри розміщення складеного об'єкта S_B матимуть вигляд $p_B = (x_B, y_B, z_B, \alpha_B, \beta_B, \gamma_B)$. У свою чергу, параметри розміщення об'єктів S_i , $i \in J_n$ будуть визначатися координатами своїх полюсів у системі координат $Ox'y'z'$ і взаємним розміщенням власних систем координат відносно $Ox'y'z'$.

При формуванні рівнянь і нерівностей, які описують складні області на базі простих (опорних) областей, скористаємося теорією R -функцій [178].

Тоді оператор B визначатиме предикатне рівняння складного об'єкта, а опорні області задамо нерівностями

$$\Sigma_i = \{f_i(\xi, \mu^i) \geq 0\}, \quad i \in J_n. \quad (2.11)$$

Для складного геометричного об'єкта сформуємо простір геометричних інформацій $G = G^1(S_1) \times \dots \times G^n(S_n)$ з елементами

$$g = (f_1, \mu_1^1, \dots, \mu_{k_1}^1, p_1^1, \dots, p_{l_1}^1, \dots, f_n, \mu_1^n, \dots, \mu_{k_n}^n, p_1^n, \dots, p_{l_n}^n). \quad (2.12)$$

Просторова форма $\{S_B\}$ об'єкта S_B визначається відповідно до його предикативних рівнянь і подана у вигляді

$$\{s_B\} = \{B(s_1, \dots, s_n)\}. \quad (2.13)$$

Розглянемо в одній і тій же нерухомій системі координат базові геометричні об'єкти $S_i, i \in J_n$. Тоді складний об'єкт S_B задається геометричною інформацією

$$g_B = (f_B, \mu_1^1, \dots, \mu_{k_1}^1, p_1^1, \dots, p_{l_1}^1, \dots, \mu_1^n, \dots, \mu_{k_n}^n, p_1^n, \dots, p_{l_n}^n), \quad (2.14)$$

де функція $f_B \in C(R^3)$ описує рівняння межі об'єкта S_B .

Простір геометричних інформацій, елементи якого мають вигляд (2.14) позначимо G_B . Зафіксуємо форми $\{s^i\}$ об'єктів $S_i, i \in J_n$. Розглянемо конфігураційний простір $\Xi^m(S_B) = \Xi^{m_1}(S_1) \times \dots \times \Xi^{m_n}(S_n)$ складного геометричного об'єкта S_B як пряме значення (добуток) конфігураційних просторів базових об'єктів $S_i, i \in J_n$. Тоді $\Xi^m(S_B)$ є різноманіттям простору G_B , а його розмірність дорівнює $m = m_1 + \dots + m_n$ і визначається вибором незалежних узагальнених змінних геометричної інформації вигляду

$$S_B(\hat{g}^1, \dots, \hat{g}^n) = B\left(S_1(\hat{g}^1), \dots, S_n(\hat{g}^n)\right), \quad (2.15)$$

де

$$\hat{g}^i = \left(\hat{\mu}_1^i, \dots, \hat{\mu}_{k_i}^i, \hat{p}_1^i, \dots, \hat{p}_l^i \right), i \in J_n. \quad (2.16)$$

При цьому важливе значення має задача визначення області допустимих значень узагальнених змінних при яких геометричний об'єкт S_B не перетворюється на порожню множину. Складний об'єкт не має міняти свою топологічну структуру (зв'язність, число компонентів зв'язності, лінійну зв'язність границі, гомотопічний тип тощо). Крім того, на область допустимих значень узагальнених змінних можуть накладатися додаткові обмеження, які виникають при вирішенні конкретних задач, наприклад, пошук оптимальних конфігурацій.

Виділимо деякі класи просторів геометричних інформацій та відповідних конфігураційних просторів. Зафіксуємо всі змінні геометричної інформації g_B вигляду (2.14), припустивши, що $\mu_j^i = \hat{\mu}_j^i, j \in J_{k_i}, p_j^i = \hat{p}_j^i, j \in J_l, i \in J_n$.

Геометричний об'єкт $S_B(\hat{g}^1, \dots, \hat{g}^n)$ є деякою точковою множиною в просторі $R^3(R^2)$, яку назвемо зображенням або за аналогією із введенням в конфігураційному просторі поняттям – *зображувальною точкою*. Зауважимо, що зображувальна точка має нульову розмірність у відповідному конфігураційному просторі, оскільки всі значення її узагальнених змінних фіксовані.

Геометричний об'єкт $S_B(\hat{g}^1, \dots, \hat{g}^n)$, поданий у вигляді (2.15) назвемо складним *об'єктом першого порядку*. При цьому базові об'єкти $S_i(\hat{g}^i), i \in J_n$ назвемо об'єктами нульового порядку. Розглядаючи сукупність базових і складних об'єктів першого порядку за аналогією можемо будувати геометричні об'єкти другого та вищих порядків. Такий підхід відповідає побудові комбінаторних об'єктів, загальну методологію якого запропоновано

у роботі [31]. Нехай $S_1(g^1)$ і $S_2(g^2)$ – базові об'єкти (об'єкти нульового порядку) простору R^3 описані рівняннями загального положення в нерухомій системі координат $Oxyz$

$$F_i(\xi, \mu^i, u^i, v^i) = 0, \quad (2.17)$$

де $\xi = (x, y, z)$, $g^i = (u^i, v^i)$, $u^i = (u_1^i, u_2^i, u_3^i)$, $v^i = (\alpha_i, \beta_i, \gamma_i)$,
 $\mu^i = (\mu_1^i, \dots, \mu_{l_i}^i)$, $i = 1, 2$.

Розглянемо складений об'єкт (об'єкт першого порядку) $S_B(g^1, g^2) = B(S_1(g^1), S_2(g^2)) = S_1(g^1) \cup S_2(g^2)$. Рівняння його границі можна записати у вигляді:

$$f(\xi, \mu) = F_1(\xi, \mu^1, u^1, v^1) V_0 F_2(\xi, \mu^2, u^2, v^2) = F_1(\xi, \mu^1, u^1, v^1) + F_2(\xi, \mu^2, u^2, v^2) + \sqrt{F_1^2(\xi, \mu^1, u^1, v^1) + F_2^2(\xi, \mu^2, u^2, v^2)} = 0, \quad (2.18)$$

де $\mu = (\mu^1, u^1, v^1, \mu^2, u^2, v^2)$, а V_0 – операція R -диз'юнкції.

Рівняння загального положення складного об'єкта $S_B(g^1, g^2)$ легко задається відповідно до виразів (2.6)-(2.8) і (2.18). Таким чином, об'єкт $S_B(g^1, g^2)$ у просторі геометричних інформацій G_B визначається просторовою формою, яка задається рівнянням (2.18), з параметрами розміщення $u = (u_1, u_2, u_3)$, $v = (\alpha, \beta, \gamma)$ і метричними параметрами $\mu = (\mu^1, u^1, v^1, \mu^2, u^2, v^2)$. Такий вибір метричних параметрів пояснюється тим, що параметри розміщення u^1, v^1, u^2, v^2 базових об'єктів $S_1(g^1)$ і $S_2(g^2)$ визначають параметри просторової форми складного об'єкта $S_B(g^1, g^2)$. Зауважимо, що параметри розміщення базових об'єктів (об'єктів нульового порядку) $S(r_1, u^1)$ і $S(r_2, u^2)$ при цьому розглядаються як параметри просторової форми складного об'єкта (об'єкта першого порядку). Геометрична інформація про об'єкт S_{12} визначається його формою, описаною рівнянням

(2.5), а також параметрами розміщення $u = (u_1, u_2, u_3)$, $v = (\alpha, \beta, \gamma)$ і метричними параметрами $\mu = (\mu_1, \dots, \mu_8)$. На рис. 2.2 показано типологію базових і складних об'єктів, яка основана на розмірності простору і просторової формі об'єкта.

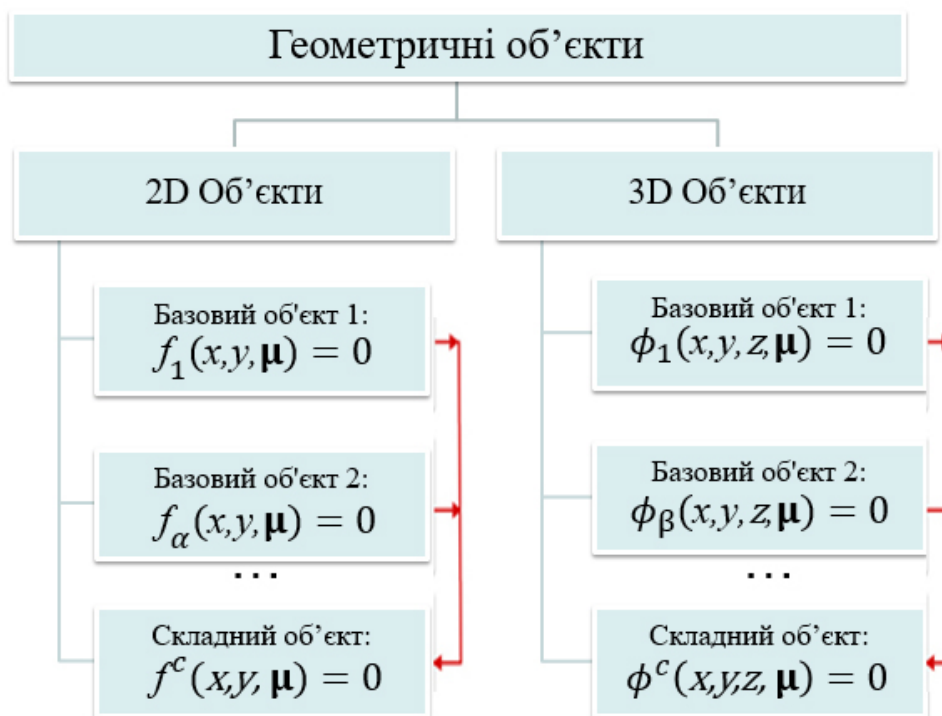


Рисунок 2.2 – Структура даних просторових об'єктів

2.3 Формування та класифікація просторових конфігурацій

Створення ефективних методів розв'язання наукових і практичних задач моделювання складних систем з урахуванням просторових форм об'єктів потребує розроблення загальних принципів математичного моделювання, а також побудови адекватних математичних моделей конкретних класів задач. У зв'язку з цим наукової значущості набуває проблема формалізації теоретико-множинних відношень об'єктів довільних просторових форм, аналітичного опису таких відношень і конструктивного відображення геометричної інформації, необхідної для адекватного моделювання реальних процесів і систем.

На значення узагальнених змінних у конфігураційному просторі $\Xi(S_B)$ можуть накладатися різні обмеження, які утворюють область допустимих значень. У загальному випадку вибір узагальнених змінних і обмежень визначає відповідний клас конфігурацій (рис.2.3).

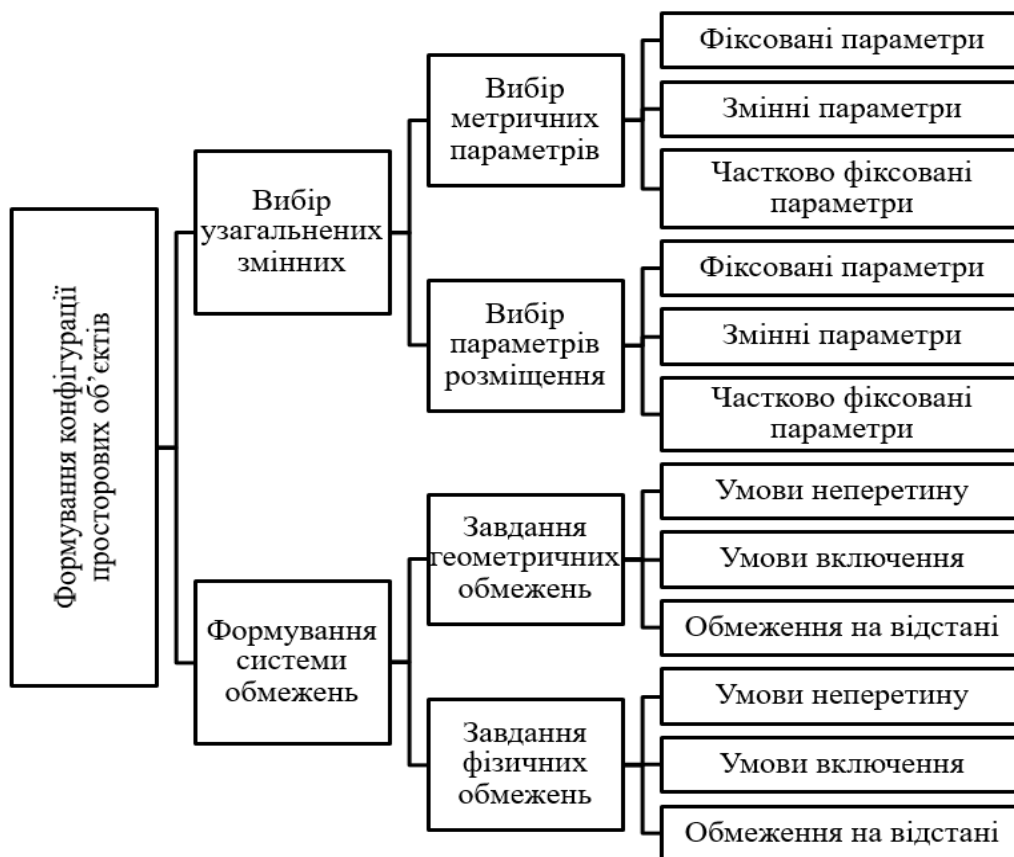


Рисунок 2.3 – Етапи процесу формалізації просторових конфігурацій

Урахування системи обмежень Λ дозволяє здійснити класифікацію просторових конфігурацій в залежності від взаємовідношень між об'єктами із $\Omega = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}$. Способи формалізації таких відношень визначаються вибором узагальнених змінних конфігураційного простору, обмеженнями на взаємне розташування ГО та їх фізико-механічними властивостями.

В основу класифікації конфігурацій просторових об'єктів виберемо обмеження на значення узагальнених змінних які, з одного боку, визначаються вихідним формулюванням проблеми. З іншого боку, обмеження на узагальнені змінні визначають опис складного об'єкта (2.9) як суперпозицію складових його базових об'єктів. Справді, деякі з метричних параметрів

$\mu = (\mu_1, \dots, \mu_k)$ і параметри розміщення можуть бути відомими заздалегідь. Метричні параметри мають належати області припустимих значень $D \subseteq R^k$. Складний об'єкт має зберігати свою топологічну структуру (зв'язність, число компонент зв'язності, лінійну зв'язність кордону, гомотопічний тип тощо).

Запропонуємо класифікацію просторових об'єктів залежно від структури складного об'єкта. Нехай об'єкти S_i мають узагальнені змінні g^i в конфігураційних просторах $\Xi(S_i), i \in J_n$. Тоді точка $g = (g^1, \dots, g^n)$ конфігураційного простору $\Xi(S_B) = \Xi(S_1) \times \dots \times \Xi(S_n)$ визначає конфігурацію розміщення геометричних об'єктів $S_i(g^i), i \in J_n$, тобто визначає складний геометричний об'єкт $S_B(g)$ у формі (2.9). Визначаючи на множині об'єктів різні відносини, зокрема, бінарні, триарні і n -арні, будемо отримувати відповідні класи конфігурацій розміщення.

Нехай

$$S_B = \bigcup_{i=1}^n S_i = \bigcup_{i=1}^n S_i(g^i). \quad (2.19)$$

Введемо на множині геометричних об'єктів $S_i, i \in J_n$ бінарне відношення неперетинання. Припустимо, що $S_i * S_j$, якщо $\text{int } S_i \cap \text{int } S_j = \emptyset$, тобто об'єкти S_i і S_j не мають спільних внутрішніх точок. Якщо $S_i * S_j$ для будь-якого $i, j \in J_n, i \neq j$, то конфігурацію розміщення назвемо конфігурацією упакування геометричних об'єктів. Зауважимо, що в більшості практичних задач упакування існує додатковий об'єкт S_0 , який називають контейнером. У цьому випадку всі об'єкти $S_i, i \in J_n$ мають належати контейнеру S_0 .

Нехай геометричний об'єкт S_0 у конфігураційному просторі $\Xi(S_0)$ має узагальнені змінні g^0 . Позначимо $\bar{S}_0 = cS_0 = R^3 \setminus S_0$ і сформуємо конфігураційний простір $\Xi(S_0) \times \Xi(S_B)$. Тоді сукупність узагальнених змінних $(g^0, g^1, \dots, g^n) \in \Xi(S_0) \times \Xi(S_B)$ задає конфігурацію упакування об'єктів

$S_i, i \in J_n \cup \{0\}$, якщо $\bar{S}_0(g^0) * S_j(g^j), S_i(g^i) * S_j(g^j)$ для будь-яких $i, j \in J_n, i < j$. Зауважимо, що в цьому випадку полюс i власна система координат об'єкта S_0 , як правило, поєднуються з початком і осями фіксованої системи координат.

На узагальнені змінні конфігураційного простору можуть накладатися додаткові обмеження, які генерують спеціальні класи конфігурацій розміщень. Перш за все, мова йде про змінні компонування і балансової упаковки. Відмінною особливістю таких змін є наявність обмежень на мінімальну і максимально допустимі відстані між об'єктами.

У разі, коли геометричні об'єкти $S_i, i \in J_n$ є твердими тілами із заданими масами $m_i, i \in J_n$, збалансована система таких тіл формує балансову конфігурацію упакування. Якщо полюси об'єктів $S_i, i \in J_n$ збігаються з центрами їх мас, то конфігурація балансового упакування має місце при виконанні умов

$$\sum_{i=1}^n x_i m_i = 0, \sum_{i=1}^n y_i m_i = 0, \sum_{i=1}^n z_i m_i = 0. \quad (2.20)$$

Зауважимо, що конфігураційні простори $\Xi(S_0) \times \Xi(S_B)$ у завданнях компонування і балансової упаковки збігаються. Різні постановки задач балансового упакування розглянуті в роботах [11–13].

Нехай об'єкт S_0 в конфігураційному просторі $\Xi(S_0)$ має узагальнені змінні g^0 . Розглянемо складний об'єкт $\bar{S}_B(g^1, \dots, g^n)$, структура якого виражається виразом

$$\bar{S}_B(g^1, \dots, g^n) = c S_B(g^1, \dots, g^n) = R^3 \setminus S_B(g^1, \dots, g^n), \quad (2.21)$$

де об'єкт $S_B(g^1, \dots, g^n)$ задається виразом (2.10).

Складний об'єкт $\bar{S}_B(g^1, \dots, g^n)$ має узагальнені координати $g^i, i \in J_n$ в конфігураційному просторі $\Xi(S_B) = \Xi(S_1) \times \dots \times \Xi(S_n)$.

Набір узагальнених змінних (g^0, g^1, \dots, g^n) в конфігураційному просторі $\Xi(S_0) \times \Xi(S_B)$ задає конфігурацію покриття, якщо $S_0(g^0) * \bar{S}_B(g^1, \dots, g^n)$. У цьому випадку геометричний об'єкт S_0 називають областю покриття, а геометричні об'єкти $S_i, i \in J_n$ – покриваючими об'єктами.

Розглянемо конфігурацію покриття області $S_0(g^0)$ об'єктами $S_i(g^i), i \in J_n$ за умови, що $S_i(g^i) * S_j(g^j)$ для будь-яких $i, j \in J_n, i < j$. Тоді сукупність узагальнених змінних $(g^0, g^1, \dots, g^n) \in \Xi(S_0) \times \Xi(S_B)$ при виконанні вище зазначених умов визначатиме *конфігурацію розбиття*. Різні моделі і методи розв'язання задач розбиття множин описані в роботах [14, 183].

Особливим класом конфігурацій є евклідові комбінаторні конфігурації [184], які формуються у випадку, коли параметри розміщення та метричні параметри об'єктів набувають дискретних значень.

Такі зміни мають ряд важливих властивостей, реалізація яких дозволяє запропонувати нові підходи до моделювання та розв'язання задач оптимізації.

2.4 Математичні моделі задачі компоновочного синтезу просторових конфігурацій геометричних об'єктів

Задачі компоновочного синтезу просторових об'єктів зазвичай є оптимізаційними для загальної характеристики задач оптимізації.

Розглянемо систему геометричних об'єктів $S_i, i \in J_n$. Позначимо через $\Xi(S_i)$ конфігураційний простір розмірності m_i , елементами якого є упорядкований набір узагальнених змінних $g^i = (g_1^i, \dots, g_{m_i}^i)$ кожного з об'єктів $S_i, i \in J_n$. Тоді відповідно до вище введених визначень конфігураційний простір системи геометричних об'єктів $S_i, i \in J_n$ набуде вигляду

$$\Xi(S_1, \dots, S_n) = \Xi(S_1) \times \dots \times \Xi(S_n).$$

Сукупність $m = \sum_{i=1}^n m_i$ узагальнених координат g^1, \dots, g^n

конфігураційного простору $\Xi^m = \Xi(S_1, \dots, S_n)$ задає конфігурацію $g = (g^1, \dots, g^n)$ системи $S_i, i \in J_n$.

Нехай на конфігураційному просторі Ξ^m заданий функціонал $\xi: \Xi^m \rightarrow R^1$. Сформулюємо задачу пошуку оптимальної конфігурації системи геометричних об'єктів $S_i, i \in J_n$. Необхідно знайти

$$g^* = \arg \min_{g \in W \subseteq \Xi(S_0, \Omega)} \xi(g), \quad (2.22)$$

де W – множина допустимих конфігурацій, що визначається системою A .

Узагальнені змінні $g = (g^1, \dots, g^n)$ конфігураційного простору Ξ^m набувають дійсних числових значень. Цей факт дозволяє природним чином здійснити еквівалентну постановку задачі (2.22) як завдання математичного програмування.

Встановимо взаємно однозначну відповідність $w = \eta(g), g = \eta^{-1}(w)$ між узагальненими змінними конфігураційного простору Ξ^m і точками $w = (w_1, w_2, \dots, w_m) \in R^m$. Позначимо $W = \eta(\Omega)$.

Наприклад, таку відповідність можна встановити, упорядкувавши узагальнені змінні таким чином:

$$\begin{aligned} \omega_1 &= g_1^1, \omega_2 = g_2^1, \dots, \omega_{m_1} = g_{m_1}^1, \omega_{m_1+1} = g_1^2, \omega_{m_1+2} = g_2^2, \dots, \\ \omega_{m_1+m_2} &= g_{m_2}^2, \dots, \omega_{m_1+m_2+\dots+m_{n-1}+1} = g_1^n, \\ \omega_{m_1+m_2+\dots+m_{n-1}+2} &= g_2^n, \dots, \omega_{m_1+m_2+\dots+m_{n-1}+m_n} = g_{m_n}^n. \end{aligned}$$

У результаті допустимо, що $w_i = \omega_i, i \in J_m$.

Нехай функція $\varphi: R^m \rightarrow R^1$ є така, що $\varphi(w) = \xi(\eta^{-1}(w))$ для всіх $w \in W$. Тоді задача (2.22) може бути еквівалентно сформульована таким чином: знайти

$$w^* = \arg \min_{w \in W \subseteq R^m} \varphi(w). \quad (2.23)$$

Отже, наведені міркування дозволяють залучити потужний апарат математичного програмування для вирішення оптимізаційних задач у конфігураційних просторах.

Одними з найбільш цікавих і важливих з практичної точки зору є завдання пошуку оптимальних конфігурацій розміщення. Зауважимо, що, як правило, мова йде про завдання з фіксованими метричними параметрами. Однак уже в цьому класі задач, наприклад, при компонуванні просторових об'єктів у контейнер мінімального обсягу, виникає необхідність урахування змінних метричних параметрів контейнера.

Розглянемо систему геометричних об'єктів $S_i, i \in J_n$ із заданими бінарними відношеннями неперетинання $\{*\}$ для деяких пар із них. Об'єкт s_i з узагальненими змінними g^i позначимо $S_i(g^i), i \in J_n$. Тоді множина W допустимих рішень у задачі (2.23) може бути формалізована з використанням теорії Ф-функцій. Для змінних параметрів просторової форми об'єктів можна скористатися запропонованими в цій роботі підходами. У загальному випадку маємо систему нерівностей:

$$\Phi^{S_i S_j}(g^i, g^j) \geq 0, \text{ якщо } S_i * S_j, \quad i, j \in J_n, i > j, \quad (2.24)$$

Кількість нерівностей в системі (2.24) визначається, між якими парами об'єктів S_i і $S_j, i, j \in J_n, i > j$ встановлено відношення $\{*\}$, тобто які пари не мають перетинатися. Якщо таке відношення встановлено для всіх пар об'єктів, то система (2.24) визначає область допустимих рішень при пошуку оптимальних конфігурацій розміщення.

В основу побудови Φ -функції покладено така її характеристична властивість. Для довільних геометричних об'єктів Φ -функції відповідає таким умовам:

$$\Phi^{S_1 S_2} > 0, \text{ якщо } S_1 \cap S_2 = \emptyset;$$

$$\Phi^{S_1 S_2} = 0, \text{ якщо } \text{int}(S_1) \cap \text{int}(S_2) = \emptyset \text{ і } \text{fr}(S_1) \cap \text{fr}(S_2) \neq \emptyset;$$

$$\Phi^{S_1 S_2} < 0, \text{ якщо } \text{int}(S_1) \cap \text{int}(S_2) \neq \emptyset.$$

За допомогою Φ -функції основні обмеження можуть бути записані таким чином:

- умова неперетину

$$\text{int}(S_1) \cap \text{int}(S_2) = \emptyset \Leftrightarrow \Phi^{S_1 S_2} \geq 0;$$

- умова включення

$$S_1 \subseteq S_0 \Leftrightarrow \Phi^{S_1 \bar{S}_0} \geq 0.$$

Розглянемо клас задач розміщення геометричних об'єктів, зв'язаний з їх власними конгруентними перетвореннями. При цьому формалізація області допустимих конфігурацій розміщення ґрунтується на математичному апараті Φ -функцій.

Визначення. Неперервна, яка всюди визначається в просторі R^{2l} , функція $\Phi(p^1, p^2)$ називається Φ -функцією геометричних об'єктів $S_1(p^1)$ і $S_2(p^2)$ з параметрами розміщення $p^i = (p_1^i, p_2^i, \dots, p_l^i)$, $i = 1, 2$, якщо вона відповідає умовам:

$$\Phi(p^1, p^2) > 0, \text{ якщо } \text{cl } S_1(p^1) \cap \text{cl } S_2(p^2) = \emptyset,$$

$$\Phi(p^1, p^2) = 0, \text{ якщо } \text{fr } S_1(p^1) \cap \text{fr } S_2(p^2) \neq \emptyset; \text{ int}(S_1) \cap \text{int}(S_2) = \emptyset;$$

$$\Phi(p^1, p^2) < 0, \text{ якщо } \text{int } S_1(p^1) \cap \text{int } S_2(p^2) \neq \emptyset.$$

Визначення. Φ -функція називається нормалізованою, якщо її значення дорівнюють евклідовим відстаням між геометричними об'єктами $S_1(p^1)$ і $S_2(p^2)$ при виконанні умови: $(p^1, p^2) \in U$, де

$$U = \{(p^1, p^2) : \text{int } S_1(p^1) \cap \text{int } S_2(p^2) = \emptyset\}.$$

Для побудови Φ -функцій складних геометричних об'єктів виділені класи базових і складових 2D- і 3D-об'єктів. Базовими об'єктами простору R^2 є кола, прямокутники, правильні і опуклі багатокутники, а також їх замкнуті доповнення до всього простору R^2 . Базовими тривимірними об'єктами є кулі, прямі паралелепіпеди, прямі кругові циліндри, кругові конуси, опуклі багатогранники і замикання доповнень цих об'єктів до простору R^3 .

Найповніше підходи до конструктивної побудови Φ -функцій базових 2D і 3D об'єктів висвітлені в роботах об'єктів [17, 18, 180–182, 191–196]. Математичне моделювання відношень складних геометричних об'єктів ґрунтується на теоремі про Φ -функції базових об'єктів.

У загальному випадку вивчення змін розміщення і відповідних конфігураційних просторів потребує узагальнення поняття Φ -функції на випадок змінних метричних параметрів геометричних об'єктів. У той же час аналіз існуючих методів побудови Φ -функції базових 2D- і 3D-об'єктів дозволяє природним чином перенести відомі результати на новий клас задач. При цьому необхідно досліджувати область визначення Φ -функції, оскільки зміна метричних параметрів об'єктів не має порушувати характеристичну властивість Φ -функції, тобто умови (2.24).

Крім того, метричні параметри геометричних об'єктів від самого початку мають свою область визначення. Наприклад, довжини сторін паралелепіпедів, радіуси куль, обсяг, площа поверхні мають бути невід'ємними. З урахуванням зазначених зауважень введемо таке визначення. Нехай D_i – відповідно області визначення для метричних параметрів

$$\mu^i = (\mu_{l_1}^i, \mu_{l_2}^i, \dots, \mu_{l_i}^i), i = 1, 2.$$

Визначення. Неперервну функцію $\Phi(p^1, p^2, \mu^1, \mu^2)$, яка всюди визначається на $R^{2l} \times D_1 \times D_2$, назовемо узагальненою Φ -функцією геометричних об'єктів $S_1(p^1, \mu^1)$ і $S_2(p^2, \mu^2)$ з параметрами розміщення $p^i = (p_{l_1}^i, p_{l_2}^i, \dots, p_{l_i}^i)$ і параметрами просторової форми $\mu^i = (\mu_{l_1}^i, \mu_{l_2}^i, \dots, \mu_{l_i}^i)$, $i = 1, 2$, якщо вона задовольняє такі умови:

$$\Phi(p^1, p^2, \mu^1, \mu^2) > 0, \text{ якщо } \text{cl } S_1(p^1, \mu^1) \cap \text{cl } S_2(p^2, \mu^2) = \emptyset;$$

$$\Phi(p^1, p^2, \mu^1, \mu^2) = 0, \text{ якщо } \text{int } S_1(p^1, \mu^1) \cap \text{int } S_2(p^2, \mu^2) = \emptyset,$$

$$\text{fr } S_1(p^1, \mu^1) \cap \text{fr } S_2(p^2, \mu^2) \neq \emptyset;$$

$$\Phi(p^1, p^2, \mu^1, \mu^2) < 0, \text{ якщо } \text{int } S_1(p^1, \mu^1) \cap \text{int } S_2(p^2, \mu^2) \neq \emptyset.$$

У монографії [4] запропоновано загальний метод побудови Φ -функцій базових 2D і 3D об'єктів при фіксованих метричних параметрах. Якщо вважати метричні параметри змінними отримаємо тоді узагальнені Φ -функції для базових 2D-об'єктів.

Наведемо деякі приклади для задання Φ -функцій в конфігураційних просторах, породжених відповідними узагальненими змінними.

На підставі загального підходу до побудови Φ -функцій базових об'єктів сформуємо базу знань для узагальнених Φ -функцій на випадок змінних метричних параметрів об'єктів.

2.5 Інформаційно-аналітична модель синтезу оптимальних конфігурацій

З урахуванням об'єктно-орієнтованої моделі ГО та математичних методів моделювання взаємовідношень сукупності ГО запропонуємо інформаційно-аналітична модель задачі синтезу просторових конфігурацій у вигляді, наведеному на рис. 2.4.

Можна виділити аналітичну й інформативну складові такої моделі. Аналітична складова являє собою вибір узагальнених змінних математичної моделі задачі, формалізацію обмежень на взаємне розташування ГО та критеріїв якості.

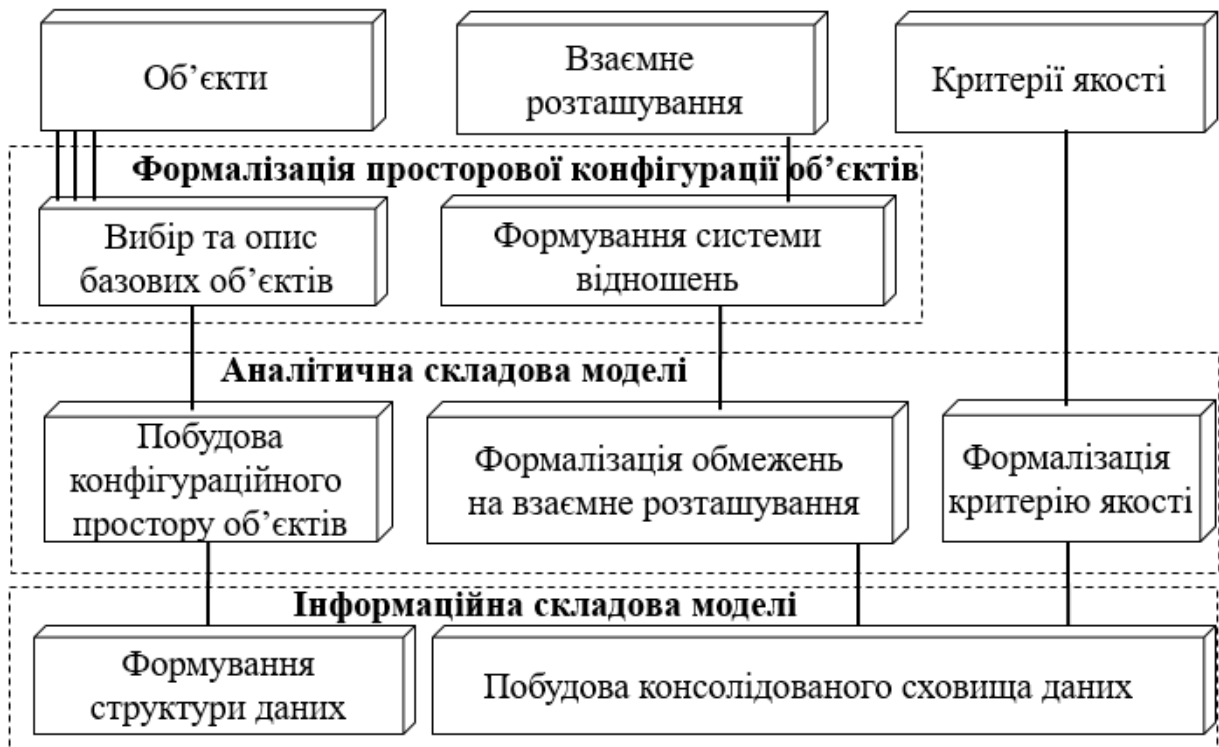


Рисунок 2.4 – Інформаційно-аналітична модель процесу синтезу оптимальних конфігурацій

Як зазначено у попередніх підрозділах для опису ГО введено їх конфігураційний простір, а для формалізації умов неперетину запропоновано використовувати математичний апарат Ф-функцій Ю. Г. Стояна. На основі аналізу існуючих методів побудови Ф-функції базових 2D- і 3D-об'єктів було

узагальнено відомі результати класу задач компоновки і пакування зі змінними метричними параметрами об'єктів, що дозволяє формувати базу даних. Приклади формування відповідної бази даних BaseObjects наведені у розділі 4.

Інформаційна складова моделі описує формування структури даних просторових об'єктів і створення консолідованого сховища даних просторових конфігурацій. Вибір структури даних базується на властивостях використання існуючих пакетів програм оптимізації та візуалізації в процесі розв'язання задачі. У загальному випадку можна використовувати будь-які сучасні солвери. Аналіз солверів проведений у розділі 4.

Основні функції, що забезпечує розробку ІТ на підставі запропонованої інформаційно-аналітичної моделі, є збирання, передача і зберігання інформації, аналіз даних, моделювання процесів, прогнозування параметрів, оптимізація розташування, надання рекомендацій для прийняття ОПР рішень, відображення характеристик поточного стану, аналізу і прогнозу в зручній та зрозумілій формі для користувача.

Синтез конфігурацій на основі моделювання виконувався у середовищі Visual Studio 2017 з використанням даних про поточні технічні характеристики просторових об'єктів, які необхідно розташувати згідно з критеріями якості. Оптимізацію рішення щодо вибору структури проводиться на основі багатокритеріальної моделі за допомогою відповідного софтвера. Всю вихідну інформацію виводити у програму для 3D моделювання – 3Ds MAX, за допомогою якого можна не тільки переглядати та моделювати нові конфігурації, але й редагувати в інтерактивному режимі. Накопичені та оброблені дані зберігати в БД.

Для опису алгоритмічних процесів і робіт, що використовуються застосовано системну алгоритмічну модель IDEF0, що дозволяє вирішувати задачі структурного аналізу і кластеризації станів.

Цей процес може бути представлений з використанням синтаксису IDEF0 і IDEF3 діаграм. Моделі IDEF0 і IDEF3 являють собою сукупність ієрархічно впорядкованих і взаємозв'язаних діаграм.

Спочатку проводиться опис системи в цілому та її взаємодії з навколишнім середовищем. Вершиною деревоподібної структури діаграм є контекстна діаграма. Вона являє собою саме загальний опис синтезу просторової конфігурації та взаємодії всієї моделі із зовнішнім середовищем. Контекстну діаграму процесу синтезу просторової конфігурації показано в нотації IDEF0 на рис. 2.5.

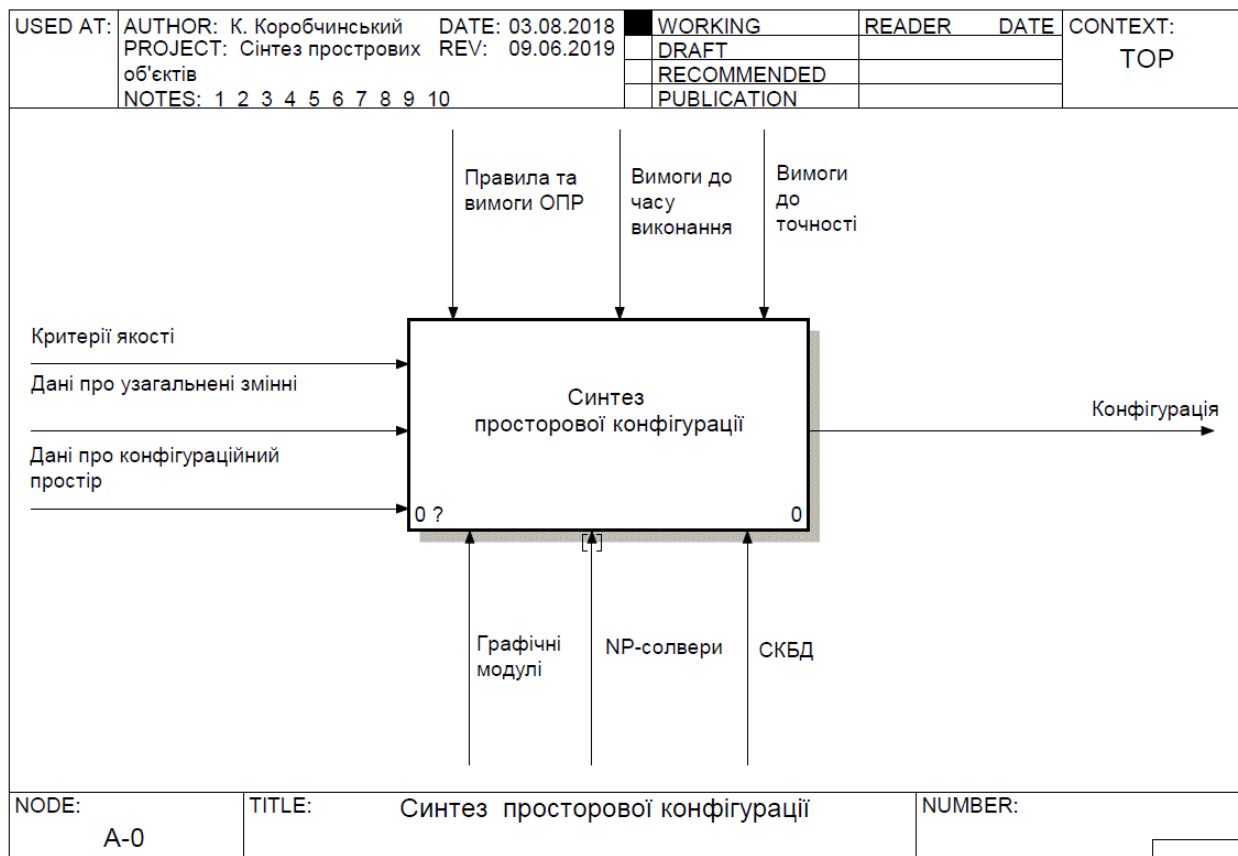


Рисунок. 2.5 – Контекстна діаграма інформаційної технології синтезу просторової конфігурації

Після опису системи в цілому проводиться розбиття її на великі фрагменти. Для проектування системи запропоновані – діаграми декомпозиції, які описуються за допомогою наочної графічної мови IDEF0.

Інформаційна технологія синтезу конфігурацій складається із восьми взаємозв'язаних етапів. Функціональна декомпозиція та діаграми, які описують кожен фрагмент і взаємодію фрагментів, називаються діаграмами декомпозиції і описують загальні процеси розробленого комплексу програм.

На рис. 2.6 зображено декомпозицію, яка описує загальні кроки: формування критеріїв якості, синтез конфігурації, візуалізація процесу вирішення, оброблення узагальнених змінних і результатів. На моделі зображено, яким чином ці функціональні блоки системи взаємодіють та які узагальнені кроки необхідно виконати для того, щоб отримати нову конфігурацію.

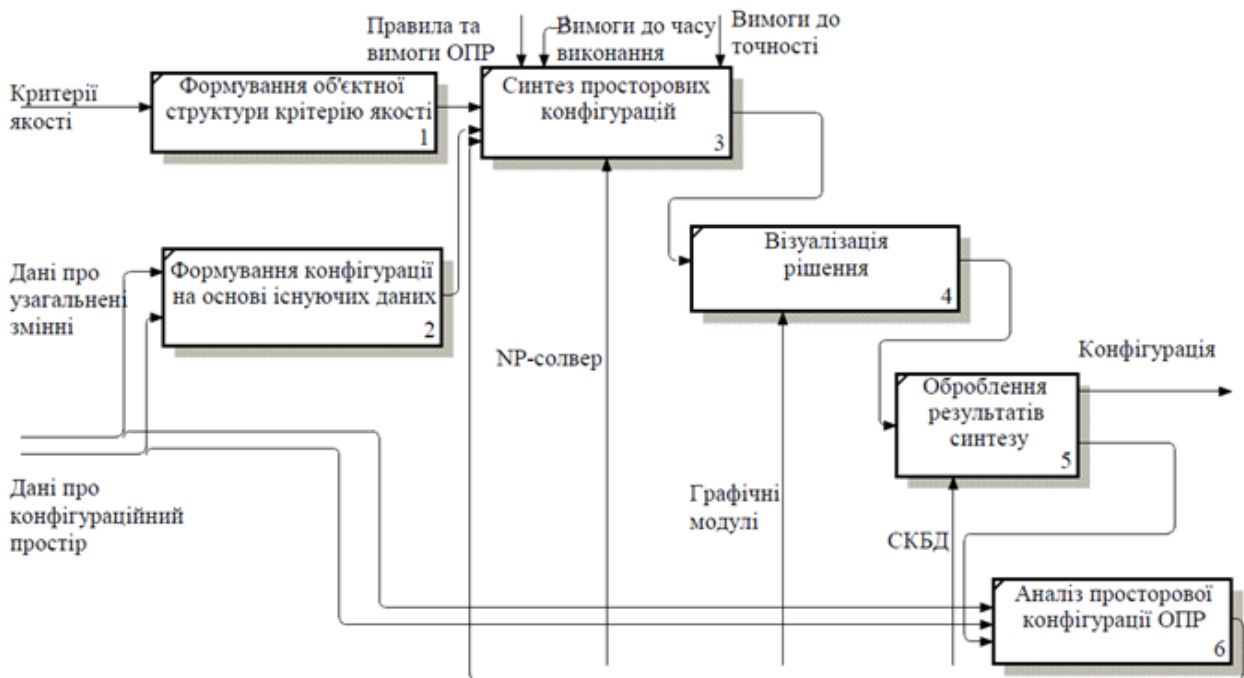


Рисунок 2.6 – Модель інформаційної технології синтезу просторових конфігурацій

Блок 1 описує процес формування аналітичної складової моделі відповідно до вибраного критерію якості та системи обмежень.

У блоці 2 на основі вихідних даних про узагальнені змінні та конфігураційний простір формують структура даних просторової конфігурації.

Блок 3 відповідає за синтез локально-оптимальної просторової конфігурації згідно з вибраним критерієм якості та узагальненими змінними конфігураційного простору. Здійснено аналіз математичної моделі задачі та обґрунтовано вибір відповідного солверу пакета програм COIN-OR. Структура даних геометричної інформації перетворено на таку, яка потребує вибраний солвер. Задано обмеження на обчислювальні ресурси (об'єм пам'яті та час виконання), а також рекомендована точність розв'язку. Результатом цього функціонального блока є сформована просторова конфігурація, яка відповідає всім висуненим вимогам.

Блок 4 описує процес візуалізації поточної просторової конфігурації. На цьому етапі здійснено перетворення даних об'єктно-орієнтованої моделі просторової конфігурації до формату даних, якого потребує програмне забезпечення для візуалізації зображення.

У блоці 5 здійснено оброблення та зберігання результатів синтезу просторової конфігурації у сховище даних «ConfigurationRepository» з використанням СКБД.

Блок 6 описує можливості залучення особи, що приймає рішення (ОПР), для аналізу просторової конфігурації. Залежно від якості розв'язання ОПР може залишити отримане рішення без змін або перейти до процедур його покращання. В останньому випадку ОПР задає нові узагальнені змінні просторової конфігурації і процес повторюється відповідно до попередніх блоків. Тим самим змінюються параметри методу оптимізації на наступних ітераціях. Зазначимо, що в процесі оптимізації вихідна просторова конфігурація може бути недопустимою. Однак відповідно до технології, яку запропоновано, у подальшому автоматично синтезують локально-оптимальну конфігурацію, яка задовольняє всім висуненим вимогам.

Розглянемо детальніше блок «синтез конфігурації» функціональної діаграми, з урахуванням її декомпозиції, що наведена на рис. 2.7.

Синтез системи виконується за допомогою геометричної інформації, яка сформована ОПР, або дані, отримані з файлу чи іншої програми. Для

визначення геометричної інформації вихідними є дані про конкретну реальну практичну систему (аерокосмічні об'єкти, логістична підсистема складування, технології 3D-друку тощо).

Наступними компонентами функціонального наповнення процесу є «визначення структури конфігураційного простору», «визначення повного критерію якості» та «визначення початкових значень узагальнених змінних». Всі вони є складовими частинами «об'єктної моделі класу задачі».

Крім зазначених компонентів, для виконання оптимізації просторових конфігурацій необхідно задати цільову функцію, функціональні обмеження, гесіан та якобіан. Обчислювання їх виконується в автоматичному режимі відповідно до попередніх блоків.

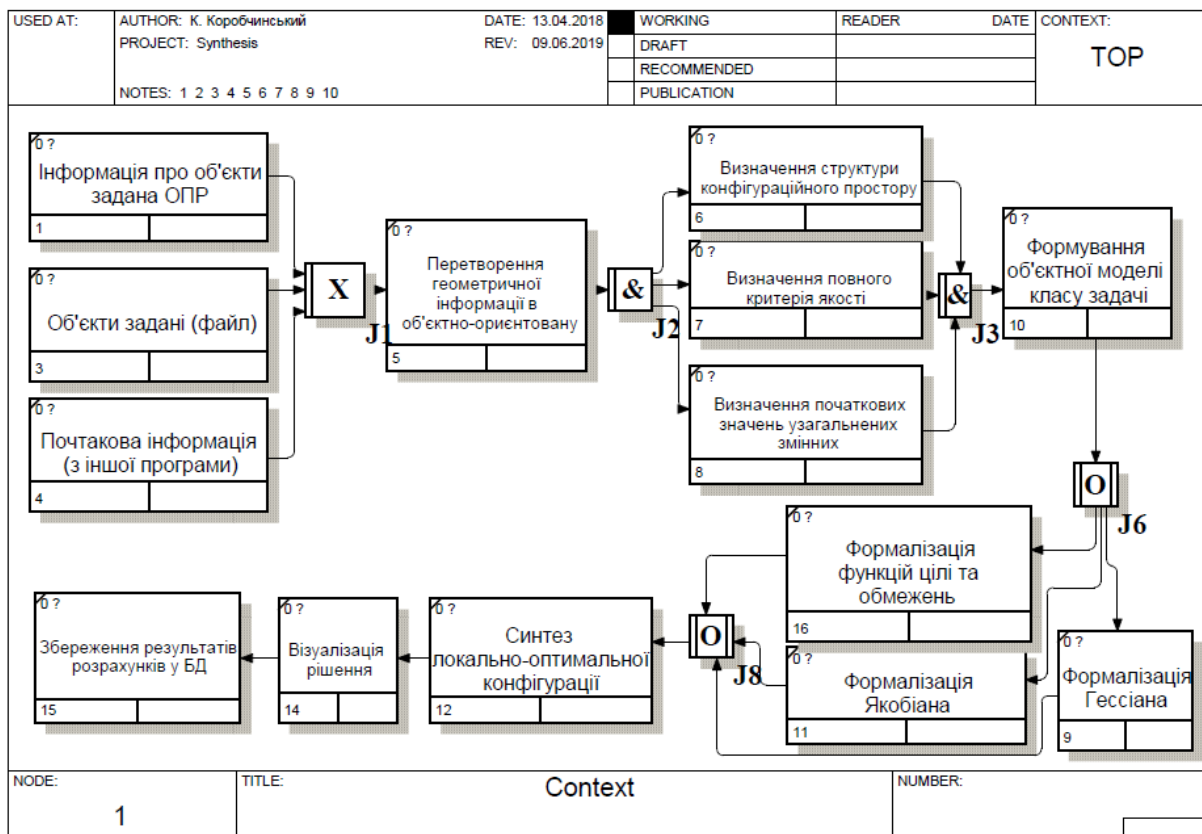


Рисунок 2.7 – Декомпозиція синтезу конфігурації

Останніми елементами функціонального процесу є візуалізація та збереження результатів. Приклад реалізації такого процесу наведений у розділі 4.

2.6 Висновки по розділу

З метою побудови інформаційно-аналітичної моделі компоновочного синтезу просторових об'єктів формалізовано поняття геометричної інформації про матеріальні об'єкти. Запропоновані такі компоненти геометричної інформації як просторова форма об'єкта, його метричні параметри та параметри розміщення. Форма об'єкта задається рівнянням його границі, а загальне розташування об'єкта у просторі характеризується рівнянням загального положення.

Сформований конфігураційний простір геометричного об'єкта, на підставі якого розроблена його об'єктно-орієнтована модель. Узагальненими змінними конфігураційного простору, вибрані метричні параметри та параметри розміщення об'єктів. Ця модель дозволяє за допомогою віртуальних методів забезпечити виконання афінних перетворень руху у просторі та у подальшому реалізувати теоретико-множинні операції над сукупністю геометричних об'єктів. При реалізації інформаційної технології компоновочного синтезу просторових об'єктів запропонована об'єктно-орієнтована модель, яка задає формат зберігання вихідних даних та дозволяє формувати структуру СКБД й поповнювати банк знань моделей тощо.

З урахуванням системи обмежень здійснено класифікацію просторових конфігурацій в залежності від взаємовідношень між об'єктами. Способи формалізації таких відношень визначаються вибором узагальнених змінних конфігураційного простору, обмеженнями на взаємне розташування ГО та їх фізико-механічними властивостями.

Сформульовано задачу пошуку оптимальної конфігурації системи геометричних об'єктів.

Узагальнені змінні конфігураційного простору дозволили природним чином здійснити еквівалентну постановку задачі як задачі математичного програмування.

Для формалізації обмежень на взаємне розташування об'єктів використано математичний апарат Φ -функцій. На основі аналізу існуючих методів побудови Φ -функції базових 2D- і 3D-об'єктів узагальнені результати для класу задач компоновки і пакування зі змінними метричними параметрами об'єктів для формування відповідної бази даних.

З урахуванням об'єктно-орієнтованої моделі ГО та математичного моделювання взаємовідношень сукупності ГО побудована інформаційно-аналітична модель задачі синтезу просторових конфігурацій. Виділені аналітична й інформативна складові такої моделі. Аналітична складова пов'язана з вибором узагальнених змінних математичної моделі задачі, формалізацію обмежень на взаємне розташування ГО та критеріїв якості. Інформаційна складова моделі описує формування структури даних просторових об'єктів і створення консолідованого сховища даних просторових конфігурацій. Вибір структури вихідних даних базується на властивостях використання існуючих пакетів програм оптимізації та візуалізації в процесі розв'язання задачі.

Розроблена модель інформаційної технології синтезу просторових конфігурацій з застосуванням контекстної діаграми стандарту IDEF0.

Наукові результати, наведені в даному розділі, опубліковані в роботах [185–189], а список джерел, які використано наведено у повному переліку використаних джерел [4, 11–14, 31, 172–184].

3 МОДЕЛІ ТА СПЕЦІАЛЬНІ МЕТОДИ ОПТИМІЗАЦІЇ КОМПОНОВКИ ОБ'ЄКТІВ СФЕРИЧНОЇ ФОРМИ

3.1 Аналітична складова інформаційно-аналітичної моделі компоновочного синтезу конфігурацій сферичних об'єктів

Проектування широкого класу технічних систем зв'язане з задачею компоновки геометричних об'єктів сферичної форми. Задачі компоновки кругів і сфер в контейнери різних форм привертають постійну увагу вчених. Постановки задач відрізняються розміром простору, формою контейнерів, специфічними особливостями метричних параметрів об'єктів і контейнерів тощо [207–212]. При цьому через складність і значну багатоекстемальність задач в загальному випадку не гарантується, що її точне рішення взагалі може бути знайдено.

Згідно з типологією, запропонованою Wäscher та ін. [213], задача компоновки сферичних об'єктів можуть розглядатися як задача про рюкзак Knapsack Problems (KP) чи Open Dimension Problems (ODP): 2DCKP, 3DSKP, 2DCODP, 3DSODP.

Розглянемо математичну модель задачі синтезу оптимальної конфігурації об'єктів сферичної форми в наступному вигляді. Нехай задана система базових геометричних об'єктів S_i , $i \in J_n$, які мають форму кулі. Зв'яжемо з кожною з куль S_i власну систему координат, вибравши її початок (поліус) в центрі симетрії кулі. Тоді геометрична інформація $g^i = \left(\{s^i\}, \{\mu^i\}, \{p^i\} \right)$ про об'єкт S_i включатиме в себе форму $\{s^i\}$, метричний параметр $\{\mu^i\} = r_i$ і параметри розміщення $\{p^i\} = (x_i, y_i, z_i)$. Сформуємо конфігураційний простір сферичних об'єктів.

Просторову форму кулі в нерухомій системі координат $Oxyz$ задамо рівнянням його границі

$$f(\xi, r) = r^2 - x^2 - y^2 - z^2 = 0, \quad (3.1)$$

тобто параметрично заданим сімейством функцій $f(\xi, r) \in C(\mathbb{R}^3) \times \mathbb{R}_+^1$, $\xi = (x, y, z)$.

Рівняння загального положення кулі S_i радіуса r_i з параметрами розміщення $p^i = (x_i, y_i, z_i)$ в нерухомій системі координат $Oxyz$ набуде вигляду:

$$F(\xi, x_i, y_i, z_i, r_i) = r_i^2 - (x - x_i)^2 - (y - y_i)^2 - (z - z_i)^2 = 0.$$

Геометрична інформація $g^i = (\{s^i\}, \{\mu^i\}, \{p^i\})$ індукує конфігураційні простори $\Xi^4(S_i)$, $i \in J_n$ з узагальненими координатами r_i, x_i, y_i, z_i .

Розглянемо конфігураційний простір сукупності куль S_i , $i \in J_n$, який представимо як

$$\Xi^{4n}(S_1, \dots, S_n) = \Xi^4(S_1) \times \dots \times \Xi^4(S_n).$$

Точка $g = (r_1, x_1, y_1, z_1, \dots, r_n, x_n, y_n, z_n) \in \Xi^{4n}(S_1, \dots, S_n)$ визначає конфігурацію куль S_i , $i \in J_n$ і однозначно задає їх розташування в нерухомій системі координат $Oxyz$.

На множині куль S_i , $i \in J_n$ введемо бінарне відношення $\{*\}$, вважаючи $S_i * S_j$, якщо $\text{int } S_i \cap \text{int } S_j = \emptyset$. У конфігураційному просторі $\Xi^{4n}(S_1, \dots, S_n)$ відношення $S_i * S_j$ формалізується за допомогою нерівності

$$r_i + r_j - \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2} \geq 0. \quad (3.2)$$

Задамо матрицю $B = [b_{ij}]_{n \times n}$ з елементами

$$b_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{якщо } S_i * S_j; \\ 0, & \text{в іншому випадку.} \end{cases}$$

Конфігурацію куль S_i , $i \in J_n$ назвемо допустимою, якщо умова (3.2) виконується для будь-яких $i, j \in J_n$, таких що $b_{ij} = 1$.

Нехай на множині допустимих конфігурацій куль S_i , $i \in J_n$ задана деяка функція, що підлягає оптимізації. Отримаємо оптимізаційну задачу визначення узагальнених змінних $r_1, x_1, y_1, z_1, \dots, r_n, x_n, y_n, z_n$ конфігураційного простору $\Xi^{4n}(S_1, \dots, S_n)$.

Зафіксуємо радіуси r_i куль S_i , $i \in J_n$. Задамо деяку множину номерів $L' \subset J_n$. Кулі S_i , $i \in L'$ назвемо зонами заборони і зафіксуємо їх положення в просторі R^3 , припустивши, що $x_i = \hat{x}_i$, $y_i = \hat{y}_i$, $z_i = \hat{z}_i$, $i \in L'$.

Сформуємо матрицю $B = [b_{ij}]_{n \times n}$ з елементами

$$b_{ij} = \begin{cases} 0, & \forall i, j \in L'; \\ 1, & \text{в інших випадках.} \end{cases}$$

Множину допустимих конфігурацій задамо системою нерівностей

$$(r_i + r_j)^2 - (x_i - x_j)^2 - (y_i - y_j)^2 - (z_i - z_j)^2 \geq 0, \quad i \in J_n \setminus L', \quad j \in J_n,$$

а цільову функцію як

$$\xi(r_1, x_1, y_1, z_1, \dots, r_n, x_n, y_n, z_n) = \max_{i \in J_n \setminus L'} \{x_i + r_i, y_i + r_i, z_i + r_i\}.$$

Якщо $L' = \emptyset$, маємо класичну задачу розміщення нерівних куль в кулі мінімального радіуса.

Задамо конфігураційний простір $\Xi^{4n}(S_1, \dots, S_n)$, зафіксувавши параметри розміщення p^i куль S_i , $i \in J_n$. Нехай $\xi(r_1, r_2, \dots, r_n)$ - довільна опукла на R_+^n функція. Тоді маємо наступну задачу опуклого програмування

$$\xi(r_1, r_2, \dots, r_n) \rightarrow \min,$$

при лінійних обмеженнях

$$r_i + r_j - \rho_{ij} \geq 0, \quad i, j \in J_n, \quad i < j,$$

де $\rho_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 - (y_i - y_j)^2 - (z_i - z_j)^2}$, $i, j \in J_n, i < j$.

Нехай задана матриця $C = [c_{ij}]_{n \times n}$, елементи якої визначають кількість з'єднань між кулями S_i і S_j , $i, j \in J_n$. Відстань $\rho(S_i, S_j)$ між кулями S_i і S_j обчислимо відповідно до виразу

$$\rho(S_i, S_j) = \rho_{ij} - r_i - r_j, \quad i \in J_n \setminus L', \quad j \in J_n,$$

тоді сумарна довжина мережі, що з'єднує об'єкти S_i , $i \in J_n$ задається функцією

$$\xi(x_1, y_1, z_1, \dots, x_n, y_n, z_n) = \sum_{i \in J_n \setminus L'} \sum_{\substack{j \in J_n \setminus L' \\ j > i}} c_{ij} \rho(S_i, S_j).$$

Нехай кулі S_i , $i \in J_n \setminus L'$ являють собою однорідні тверді тіла щільності ν . Мінімізуємо функцію, яка характеризує відхилення центру мас сукупності куль S_i , $i \in J_n \setminus L'$ від заданої точки $M(x_0, y_0, z_0)$. Маємо

$$\xi(m_1, p_1, \dots, m_n, p_n) = \sum_{i \in J_n \setminus L'} \left[\left(x_0 - \frac{m_i x_i}{m_\Sigma} \right)^2 + \left(y_0 - \frac{m_i y_i}{m_\Sigma} \right)^2 + \left(z_0 - \frac{m_i z_i}{m_\Sigma} \right)^2 \right],$$

де $p_i = (x_i, y_i, z_i)$, $m_i = 4/3 \pi \nu r_i^3$, $i \in J_n \setminus L'$, $m_\Sigma = \sum_{i \in J_n \setminus L'} m_i$.

Зауважимо, що зазначений клас оптимізаційних задач при фіксованих радіусах куль є задачами рівноважної упаковки [214, 215].

Якщо $L' = \emptyset$, маємо класичну задачу розміщення нерівних куль в кулі мінімального радіуса [129].

Задамо матрицю зв'язності $C = [c_{ij}]_{n \times n}$, в якій зазначено кількість з'єднань між кулями S_i і S_j , $i, j \in J_n$. Тоді в залежності від метрики, в якій обчислюється відстань між полюсами об'єктів, сумарна довжина з'єднань задається функцією

$$\xi_3(x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2, \dots, x_n, y_n, z_n) = \sum_{i \in J_n \setminus L'} \sum_{\substack{j \in J_n \setminus L' \\ j > i}} c_{ij} \rho(x_i, y_i, z_i, x_j, y_j, z_j),$$

де $\rho(x_i, y_i, z_i, x_j, y_j, z_j) = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2}$ та

$\rho(x_i, y_i, z_i, x_j, y_j, z_j) = |x_i - x_j| + |y_i - y_j| + |z_i - z_j|$ (в ортогональній метриці).

Нехай кулі $S_i, i \in J_n \setminus L'$ являють собою однорідні тверді тіла щільності ν . Тоді можна обчислити масу тіла S_i , яка рівна

$$m_i = 4/3 \pi \nu r_i^3, i \in J_n \setminus L'.$$

Розглянемо цільову функцію, яка визначає відхилення центру мас сукупності куль $S_i, i \in J_n \setminus L'$ від заданої точки $M(x_0, y_0, z_0)$.

Маємо

$$\begin{aligned} \xi_4(x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2, \dots, x_n, y_n, z_n) = \\ = \sqrt{\sum_{i \in J_n \setminus L'} \left[\left(x_0 - \frac{m_i x_i}{m_\Sigma} \right)^2 + \left(y_0 - \frac{m_i y_i}{m_\Sigma} \right)^2 + \left(z_0 - \frac{m_i z_i}{m_\Sigma} \right)^2 \right]}, \end{aligned}$$

де $m_\Sigma = \sum_{i \in J_n \setminus L'} m_i$.

В залежності від форми контейнеру приведемо наступні умови включення сферичних об'єктів [225].

Уявимо, що контейнери $K(\mu)$ можуть мати одну з наступних форм:

- куля $K^1(\mu), \mu = R$, описана нерівностями $x^2 + y^2 + z^2 - R^2 \leq 0$;

- кубоїд $K^2(\mu), \mu = (a, b, h)$, описаний нерівностями

$\{0 \leq x \leq a, 0 \leq y \leq b, 0 \leq z \leq h\}$, де $a \geq 2 \max_{i \in J_n} \{r_i^0\}$, $b \geq 2 \max_{i \in J_n} \{r_i^0\}$;

- циліндр $K^3(\mu), \mu = (R, h)$, описаний нерівностями

$\{x^2 + y^2 - R^2 \leq 0, 0 \leq z \leq h\}$, де $R \geq \max_{i \in J_n} \{r_i^0\}$ і $h \geq 2 \max_{i \in J_n} \{r_i^0\}$;

- кільцевий циліндр $K^4(\mu)$, $\mu = (R, \rho, h)$, описаний нерівностями $\{x^2 + y^2 - R^2 \leq 0, -x^2 - y^2 + \rho^2 \leq 0, R > \rho, 0 \leq z \leq h\}$, де $R - \rho \geq \max_{i \in J_n} \{r_i^0\}$;

- кульовий шар $K^5(\mu)$, $\mu = (R, \rho)$, описаний нерівностями $\{x^2 + y^2 + z^2 - R^2 \leq 0, -x^2 - y^2 - z^2 + \rho^2 \leq 0, R > \rho\}$.

Примітно, що деякі метричні параметри контейнерів можуть бути фіксовані. При цьому існує широкий клас задач упаковки, в яких лише один лінійний розмір контейнера являється змінним. Наприклад, передбачається змінним тільки радіус кулі $K^1(\mu)$ при $\mu = R$; висота кубоїда $K^2(\mu)$ при $\mu = h$; висота або радіус циліндра $K^3(\mu)$, кільцевого циліндра – $K^4(\mu)$ або кульового шару – $K^5(\mu)$ при $\mu = h$, $\mu = R$ чи $\mu = \rho$.

Описана аналітична складова покладена в основу розробки програмного продукту для пошуку локально-оптимальних конфігурацій сферичних об'єктів.

Зазначимо, що на теперішній час існує велика кількість спеціальних методів оптимізації компоновки куль у контейнери, найбільш повний опис яких наведено у роботі [129]. В роботі [125] Sulou і Day запропоновано підхід до глобальної оптимізації упаковки нерівних куль. Оптимізаційна задача сформульована як неопукла оптимізаційна задача з квадратичними обмеженнями і лінійною цільовою функцією. У статті [21] описано математичний метод оптимізації упаковки нерівних куль у кубоїд, заснований на методі околів, які звужуються і методі локальної оптимізації. Моделі для 2D і 3D задач упакування куль різного радіусу, які використовують двічі диференційовані функції представлено у роботі [225]. Kubach та ін. [237] адаптують паралельні жадібні алгоритми, запропоновані в роботі [70] до тривимірного випадку. Nifi [129] пропонують покращення локально-оптимальних компоновок із застосуванням жадібного алгоритму. У статті [209] розроблено гібридний алгоритм ELPGD для упаковки нерівних кіл і куль у круговий (сферичний) контейнер. В роботі [129] Nifi і M'Hallah наведено

огляд ряду ефективних моделей і методів для упаковки кіл і куль. У статті [20] запропоновано ефективний jump-алгоритм (JA), розроблений для упаковки нерівних кіл та куль. Алгоритм JA дозволяє перейти від однієї точки локального мінімуму до іншого так, що змінний розмір контейнера не збільшується.

Зазначимо, що властивості математичної моделі для деяких класів задач компоновки сферичних об'єктів дозволяють запропонувати нові методи покращення отриманих рішень. В першу чергу це стосується задачі компоновки куль у кулю мінімального радіусу. Запропонуємо новий метод покращення локально-оптимальних рішень який назовемо методом змінних радіусів [232, 233, 235]. Зазначений підхід базується на методі штучного розширення простору, обґрунтованому в роботі [23].

3.2 Метод змінного радіусу для покращення отриманих рішень в задачах компоновки сферичних об'єктів

Розглянемо задачу розміщення набору куль S_i із заданими радіусами r_i , $i \in J_n$ в кулі S_0 мінімального радіуса r_0 . Позначимо координати центрів куль як $p^i = (x_i, y_i, z_i)$, $i \in \{0\} \cup J_n$, ми фіксуємо $p^0 = (0, 0, 0)$. Тоді математична постановка задачі буде мати вигляд

$$r_0 \rightarrow \min, \quad (3.3)$$

та враховує обмеження

$$x_i^2 + y_i^2 + z_i^2 \leq (r_0 - r_i)^2, \quad i \in J_n, \quad (3.4)$$

$$(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2 \geq (r_i + r_j)^2 \quad \forall i, j \in J_n, i \neq j. \quad (3.5)$$

Таким чином, ми маємо задачу програмування з $3n+1$ змінними:
 $r_0, x_i, y_i, z_i \quad i \in J_n$.

Виконаємо такі еквівалентні перетворення задачі (3.3) – (3.5): з одного боку, припустимо, що радіуси r_i , $i \in J_n$ це безперервні змінні, з іншого – будемо формувати таку систему обмежень задачі, так, щоб у результаті її рішення, ті і тільки ті, значення змінних r_i , $i \in J_n$, які збігаються з початковими фіксованими значеннями стали дійсними. Цей підхід ми називаємо методом змінних радіусів.

Для реалізації методу змінних радіусів вибираємо таку комбінаторну структуру задачі. Так в завданні (3.3) – (3.5) радіуси є постійними, ми фіксуємо, $r_i = r_i^0$, $i \in J_n$ і ми будемо вважати що $r_1^0 \leq r_2^0 \leq \dots \leq r_n^0$.

У відповідності з викладеними вище міркуваннями розглянемо r_i , $i \in J_n$ як незалежні змінні, сформуємо систему рівнянь

$$\sum_{i=1}^n (r_i - \tau)^k = \sum_{i=1}^n (r_i^0 - \tau)^k, \quad k \in J_n, \quad (3.6)$$

$$\tau = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_i^0. \quad (3.7)$$

Система рівнянь (3.6) визначає множину суперкуль з центрами в точках $(\tau, \tau, \dots, \tau)$. Ця система має таку властивість: сукупність її рішень збігається з множиною перестановок чисел $\{r_1^0, r_2^0, \dots, r_n^0\}$ [216], [217].

Таким чином, нова сформована задача (3.3) – (3.7) еквівалентна вихідній і є нелінійною задачею оптимізації з $4n + 1$ змінними r_0, r_i, x_i, y_i, z_i , $i \in J_n$.

Зауважимо, що при розв'язанні задачі (3.3) – (3.7) можуть бути обчислювальні складності, зв'язані з високими ступенями в системі рівнянь (3.6). Це призводить до накопичення помилок у розрахунках у задачах високих розмірів. Таким чином особлива увага звертається саме на формування функціональних обмежень у поліедрально-сферичній формі [218], [219]:

$$\sum_{i=1}^n r_i = \sum_{i=1}^n r_i^0, \quad \sum_{i \in W} r_i \geq \sum_{i=1}^{\text{card } W} r_i^0, \quad \forall W \subset J_n, \quad (3.8)$$

$$\sum_{i=1}^n (r_i - \tau)^2 = \sum_{i=1}^n (r_i^0 - \tau)^2, \quad \tau = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_i^0, \quad (3.9)$$

де $|W|$ – потужність множини W і τ – задана за формулою (3.7).

Зауважимо, що множина, описана системами (3.8), (3.9), збігається з множиною перестановок чисел $\{r_1^0, r_2^0, \dots, r_n^0\}$. Важливою властивістю задачі розміщення куль у вигляді (3.3) – (3.5), (3.8), (3.9) є те, що ця задача є квадратичною оптимізаційною. Кількість лінійних обмежень у системі (3.8) оцінюється величиною 2^n . Тому реалізація класичних методів нелінійної оптимізації обмежується розмірністю задачі. У той же час, враховуючи властивості лінійних і квадратичних функцій на комбінаторних багатогранниках, можна подолати труднощі, які виникають.

У задачах локальної оптимізації великих розмірів здійснюється їх декомпозиція з використанням наступного підходу. Розглянемо набір $\Pi = \{r_1^0, r_2^0, \dots, r_n^0\}$. Розділимо його на L непересічні підмножини:

$$\Pi = \bigcup_{k=1}^L \Pi^k, \quad \Pi^k = \{r_{m_1}, r_{m_2}, \dots, r_{m_{l_k}}\}, \quad M^k = \{m_1, m_2, \dots, m_{l_k}\},$$

$$m_1 < m_2 < \dots < m_{l_k}, \quad \sum_{k=1}^L l_k = n.$$

Для кожного набору Π^k , $k \in J_L$ припущено $\lambda = l_k$ та записано:

$$\sum_{i=1}^{\lambda} r_{m_i} = \sum_{i=1}^{\lambda} r_{m_i}^0, \quad \sum_{i \in W} r_i \geq \sum_{i=1}^{|W|} r_{m_i}^0, \quad \forall W \subseteq M^k, \quad (3.10)$$

$$\sum_{i=1}^{\lambda} (r_{m_i} - v)^2 = \sum_{i=1}^{\lambda} (r_{m_i}^0 - v)^2, \quad v = \frac{1}{\lambda} \sum_{i=1}^{\lambda} r_{m_i}^0. \quad (3.11)$$

Знайдемо локальне рішення задачі (3.3) – (3.7) при фіксованому r_i , $i \in J_n$. Це рішення можна покращити, вибравши його як початкову точку й розглянувши r_i , $i \in J_n$ як змінні. У цьому випадку вибір методу декомпозиції з подальшим формуванням обмежень виду (3.10), (3.11) встановлює

відповідну модифікацію запропонованого підходу. Крім того, отримане нове локальне рішення можна покращити знову, вибравши його як вихідну точку, потім сформувати нову декомпозицію множини $\Pi = \{r_1, r_2, \dots, r_n\}$.

Розглянемо задачу розміщення $n = 30$ кіл з радіусами r_i , $i \in J_n$, які наведені в табл. 3.1. Для спрощення даних, ми вибрали радіуси як цілі числа.

Таблиця 3.1 –

Радіуси кіл

i	r_i	i	r_i	i	r_i
1	3	11	19	21	33
2	4	12	20	22	34
3	5	13	21	23	35
4	10	14	22	24	41
5	11	15	23	25	42
6	12	16	24	26	43
7	14	17	25	27	47
8	15	18	26	28	48
9	17	19	28	29	49
10	18	20	30	30	50

Для підтвердження ефективності запропонованого підходу були проведені чисельні експерименти, в яких задачі були довільно сформовані. Було знайдено їхнє локально-оптимальне рішення з метою їх можливого покращення. Для спрощення візуалізації отриманих рішень розглянемо 2D випадок, тобто задачу розміщення кіл у колі мінімального радіусу.

Початкові координати центрів кіл (табл. 3.2) було вибрано довільно. У табл. 3.2 та наступних наведені такі значення: номер кола, його радіус, координати центрів кіл: i , r_i , x_i , y_i відповідно. Нехай $r_0 = 200$. Цю точку було обрано як вихідну точку для пошуку локально-оптимального розв'язку

задачі (3.3) – (3.5) з фіксованими значеннями радіусів кіл. Для локальної оптимізації був використаний пакет програм IpOpt [199].

Таблиця 3.2 –

Початкові координати центрів кіл

i	r_i	x_i	y_i	i	r_i	x_i	y_i
1	3	20.15	63.12	16	24	19.95	116.90
2	4	119.26	-92.60	17	25	123.02	60.94
3	5	17.22	122.69	18	26	-121.74	-27.45
4	10	-99.80	7.90	19	28	116.42	123.55
5	11	20.96	-14.64	20	30	-71.12	-2.20
6	12	29.96	-86.52	21	33	87.85	-77.56
7	14	-26.85	-30.23	22	34	-68.98	-6.45
8	15	-34.52	-3.85	23	35	-53.39	-8.20
9	17	-97.60	19.50	24	41	6,22	34.87
10	18	45.06	-47.05	25	42	-5,22	-14,34
11	19	85.23	80,03	26	43	-46.89	92.30
12	20	23.43	-39.91	27	47	106.41	33.45
13	21	75.33	-16.12	28	48	-45.25	-129.04
14	22	-40.95	-28.53	29	49	-35.05	-7.45
15	23	44,41	-40.75	30	50	-29.56	-2.90

Для виконання розрахунків використовувався ЕОМ з наступними характеристиками і3 / 8G / SSD 256G. Середній час роботи програми становить 327 секунд.

На рис. 3.1 показано відповідне розміщення кіл. Радіус r_0 великого кола 185, 23.

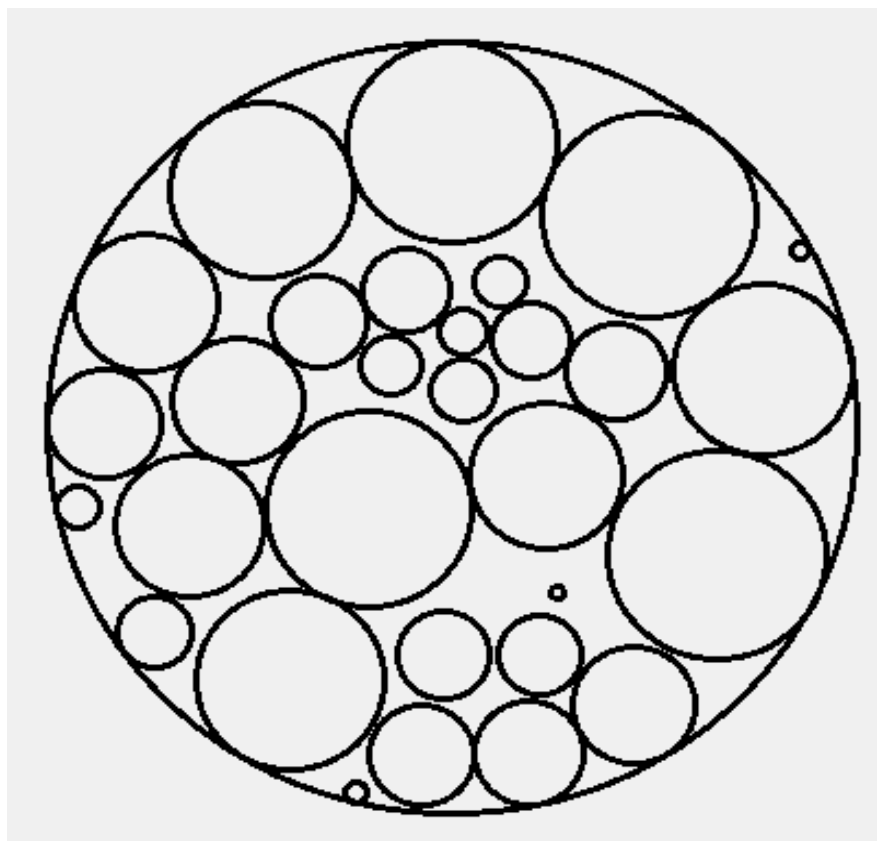


Рисунок 3.1 – Локальне рішення при фіксованих радіусів

Параметри розміщення кіл наведені в табл. 3.3, а візуалізація – рис. 3.2.

Таблиця 3.3 –

Локально-оптимальне рішення з фіксованими радіусами кіл

i	r_i	x_i	y_i	i	r_i	x_i	y_i
1	3	48.23	78.70	16	24	-14.15	156.56
2	4	159.34	-85.41	17	25	35.15	156.26
3	5	-44.22	174.72	18	26	-158.67	-1.81
4	10	-170.80	38.06	19	28	83.35	133.31
5	11	5.09	-45.77	20	30	-97.68	-12.84
6	12	22.03	-70.35	21	33	-140.12	-59.50
7	14	-27.93	-30.43	22	34	-120.50	47.08
8	15	5.48	-17.81	23	35	43.25	22.87
9	17	-136.40	98.42	24	41	141.52	-27.82

i	r_i	x_i	y_i	i	r_i	x_i	y_i
10	18	35.74	-41.72	25	42	-87.33	-113.52
11	19	39.59	108.68	26	43	-74.38	121.23
12	20	-20.78	-66.46	27	47	-38.07	38.78
13	21	-4.17	108.68	28	48	-0.30	-137.23
14	22	-60.72	-51.47	29	49	90.13	-102.14
15	23	75.04	-27.10	30	50	120.59	61.19

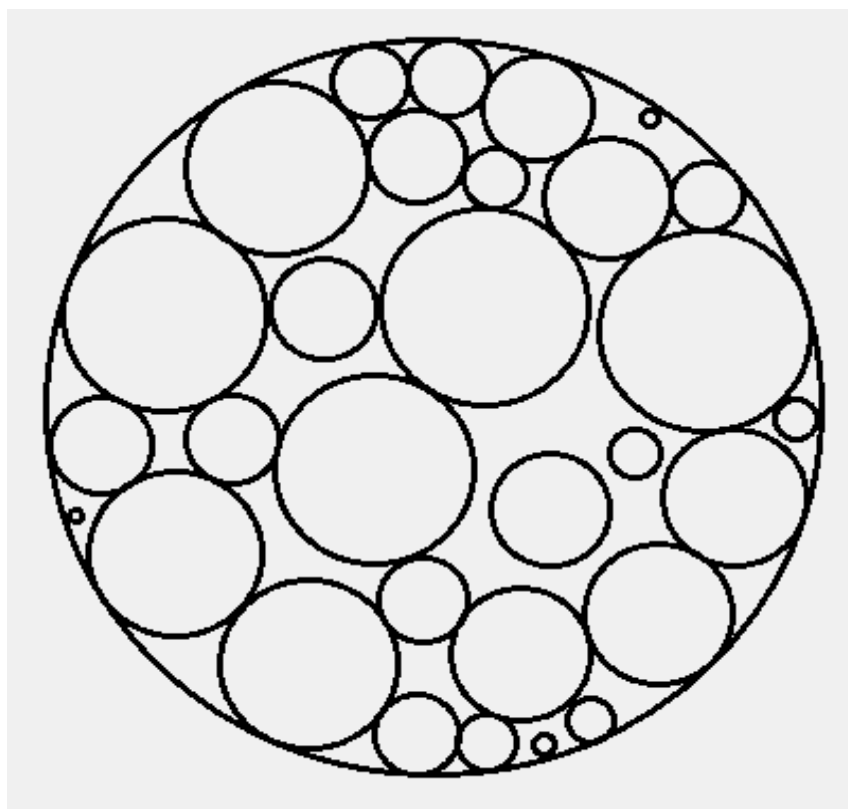


Рисунок 3.2 – Покращене локальне рішення

Будемо вважати отримане рішення початковою точкою для задачі (3.3) – (3.5), (3.8), (3.9) із змінними радіусами. Покладемо кількість груп радіусів $L=5$, тобто $\Pi^1 = \{r_1, \dots, r_6\}$, $\Pi^2 = \{r_7, \dots, r_{12}\}$, $\Pi^3 = \{r_{13}, \dots, r_{18}\}$, $\Pi^4 = \{r_{19}, \dots, r_{24}\}$, $\Pi^5 = \{r_{25}, \dots, r_{30}\}$. В результаті буде додано 238 лінійних обмежень і 5 квадратичних обмежень.

Сформуємо початкову точку для IpOpt наступним чином. Нехай координати центрів кіл відповідатимуть отриманому розбиттю для фіксованих значень радіусів. Початкові значення змінних радіусів для кожної групи Π^j , $j \in J_5$ сформуємо випадково за рівномірним розподілом по інтервалах (r_1, r_6) , (r_7, r_{12}) , (r_{13}, r_{18}) , (r_{19}, r_{24}) , (r_{25}, r_{30}) .

Реалізуємо мультизапуск програми IpOpt, випадковим чином генеруючи 10 різних варіантів початкових радіусів кіл з координатами центрів, наведеними у табл. 3.4. У всіх 10 випадках було отримано покращення вихідного локально-оптимального рішення. Серед отриманих, найкращому розв'язку відповідає $r_0 = 183,16$.

Таблиця 3.4 –

Локально-оптимальне рішення з змінними радіусами кіл

i	r_i	x_i	y_i	i	r_i	x_i	y_i
1	3	-168.66	54.48	16	24	-157.19	19.25
2	4	101.61	-143.66	17	25	-51.60	-48.61
3	5	51.60	168.31	18	26	49.18	-149.26
4	10	171.14	6.47	19	28	55.24	50.51
5	11	73.61	155.53	20	30	81.69	-103.67
6	12	95.20	23.32	21	33	41.06	122.88
7	14	25.49	167.22	22	34	142.35	44.55
8	15	28.69	-113.75	23	35	106.19	103.31
9	17	128.67	-105.13	24	41	-121.82	73.26
10	18	-30.29	-162.35	25	42	-59.46	128.02
11	19	6.67	-164.02	26	43	-73.52	-119.32
12	20	-8.23	162.95	27	47	-27.52	31.19
13	21	-5.48	95.52	28	48	-127.15	-45.81
14	22	-94.89	16.30	29	49	23.78	-49.94
15	23	-7.73	-124.57	30	50	127.58	-38.13

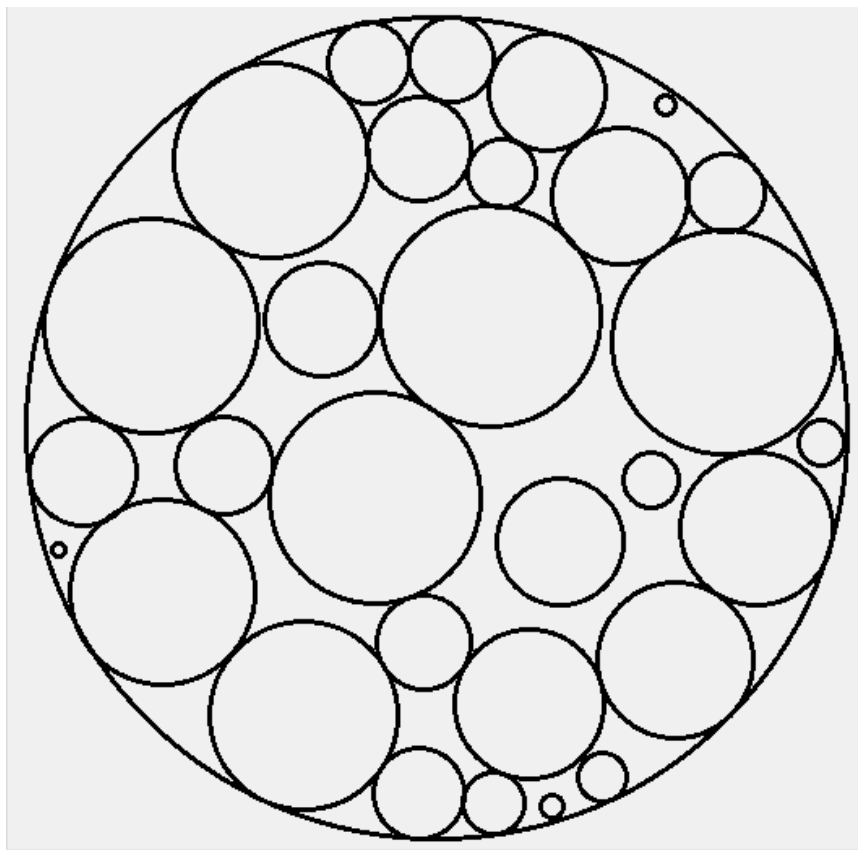


Рисунок 3.3 – Локально-оптимальне рішення для задачі 30 кіл

Поліпшити це рішення (табл. 3.4), повторивши метод змінного радіуса для початкової точки, яка відповідає поточному найкращому рішення. В результаті отримано нове краще локально-оптимальне рішення, яке зображено на рис. 3.4, і якому відповідає $r_0 = 179.47$, а координати центрів кіл наведені в табл. 3.5.

Таблиця 3.5 –

Координати центрів кіл з найкращім рішенням

i	r_i	x_i	y_i	i	r_i	x_i	y_i
1	2	3	4	5	6	7	8
1	3	156.69	81.17	16	24	-48.02	-147.87
2	4	-133.30	114.09	17	25	-46.26	115.19
3	5	-138.20	106.52	18	26	-91.52	-123.20
4	10	-77.31	-90.12	19	28	-66.10	-24.65

1	2	3	4	5	6	7	8
5	11	-85.13	70.14	20	30	141.20	-49.03
6	12	-69.82	-64.48	21	33	46.11	-139.02
7	14	-140.40	87.64	22	34	13.52	144.84
8	15	102.64	-25.84	23	35	102.81	-101.49
9	17	-109.40	89.25	24	41	-122.81	-63.96
10	18	-36.99	157.18	25	42	135.58	22.74
11	19	51.40	-84.97	26	43	51.70	8.97
12	20	-5.40	-18.86	27	47	-14.59	-85.23
13	21	-4.28	-158.41	28	48	-32.49	43.50
14	22	75.23	-51.61	29	49	-127.87	25.89
15	23	-93.08	125.77	30	50	83.74	98.74

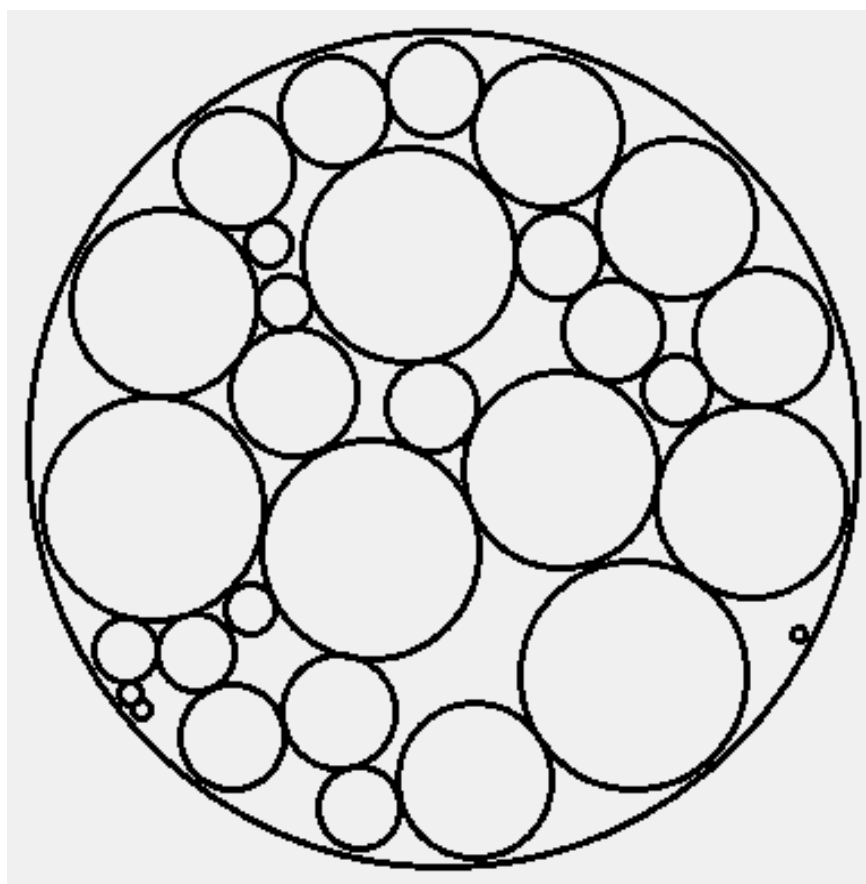


Рисунок 3.4 – Найкраще рішення для задачі 30 кіл

Запропонований підхід був випробуваний на розміщенні 60 кіл, радіуси яких були обрані випадковим чином і впорядковані. Таким чином

$Q = \{\hat{r}_1, \hat{r}_2, \dots, \hat{r}_{60}\} = \{6, 6, 8, 9, 10, 10, 13, 13, 15, 17, 18, 20, 23, 25, 25, 26, 26, 30, 31, 32, 32, 33, 34, 34, 35, 37, 38, 39, 41, 42, 42, 45, 48, 49, 49, 51, 55, 55, 56, 58, 58, 59, 61, 62, 63, 65, 66, 66, 69, 69, 70, 73, 73, 75, 76, 79, 80, 82, 82, 83\}$. Спочатку було отримане локальне рішення задачі із фіксованими радіусами Q . Початковою точкою методу чисельної оптимізації було випадково генеровано рівномірно з квадрата $(-500, 500) \times (-500, 500)$. Радіус $r_0^{(0)} = 450.88$ був отриманий за 362 сек.

Потім набір Q розподілили відповідно до описаної вище стратегії і задачу (3.3) було вирішено. На кожній наступній ітерації координати центрів кіл, які відповідають найкращому локальному розв'язанню, вибиралися в якості вихідної точки для пошуку локальної-оптимальної конфігурації. У цьому випадку набір $Q = \{\hat{r}_1, \hat{r}_2, \dots, \hat{r}_n\}$ було розподілено на 10, 12, 15, 20, 30 груп з 6, 5, 4, 3, 2 елементами відповідно. При наступних ітераціях були отримані $r_0^{(1)} = 434.72$, $r_0^{(2)} = 433.15$, $r_0^{(3)} = 431.22$, $r_0^{(4)} = 430.90$, $r_0^{(5)} = 430.90$. Нарешті було досягнуто рішення $r_0^{(6)} = 426.74$, а координати центрів кіл $x_i, y_i, i \in J_n$ показані в табл. 3.6. Середній час виконання становив 1020 сек. Візуалізація рішення зображена на рис. 3.5.

Таблиця 3.6 –

Локальне рішення на останній ітерації.

r_i	x_i	y_i	r_i	x_i	y_i	r_i	x_i	y_i	r_i	x_i	y_i
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
6	-280,16	230,82	26	-150,06	211,86	42	15,42	-228,05	65	108,66	256,86
6	-303,31	-287,32	26	-2,01	-28,98	45	-311,72	-220,35	66	176,63	126,77
8	-271,70	247,70	30	-259,36	-100,62	48	-147,12	-348,99	66	-204,92	121,28
9	15,60	50,27	31	316,29	237,83	49	-227,14	-179,32	69	-30,36	-356,44
10	339,56	-235,67	32	-162,54	288,18	49	-118,14	358,54	69	357,29	-17,90
10	-175,93	17,74	32	-197,66	341,68	51	75,76	19,43	70	251,46	-253,03

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
13	-411,64	41,57	33	-239,29	214,12	55	-81,88	255,59	73	-77,78	49,46
13	-288,63	296,43	34	54,97	-63,47	55	-371,50	-13,32	73	38,11	138,26
15	-333,40	47,14	34	235,13	-135,13	56	-322,57	182,74	75	5,67	351,69
17	289,49	35,70	35	7,05	241,70	58	-232,51	-286,19	76	-150,45	-80,62
18	23,63	-287,49	37	-303,58	91,70	58	-347,36	-123,71	79	-105,57	-228,98
20	400,88	61,96	38	-238,90	285,12	59	-19,46	-120,32	80	322,63	127,01
23	-189,86	240,44	39	-378,96	82,02	61	-257,03	5,46	82	117,16	-324,22
25	-304,08	261,71	41	121,82	365,29	62	233,50	280,19	82	119,23	-160,23
25	187,64	354,83	42	-104,60	161,29	63	332,47	-147,55	83	205,29	-19,45

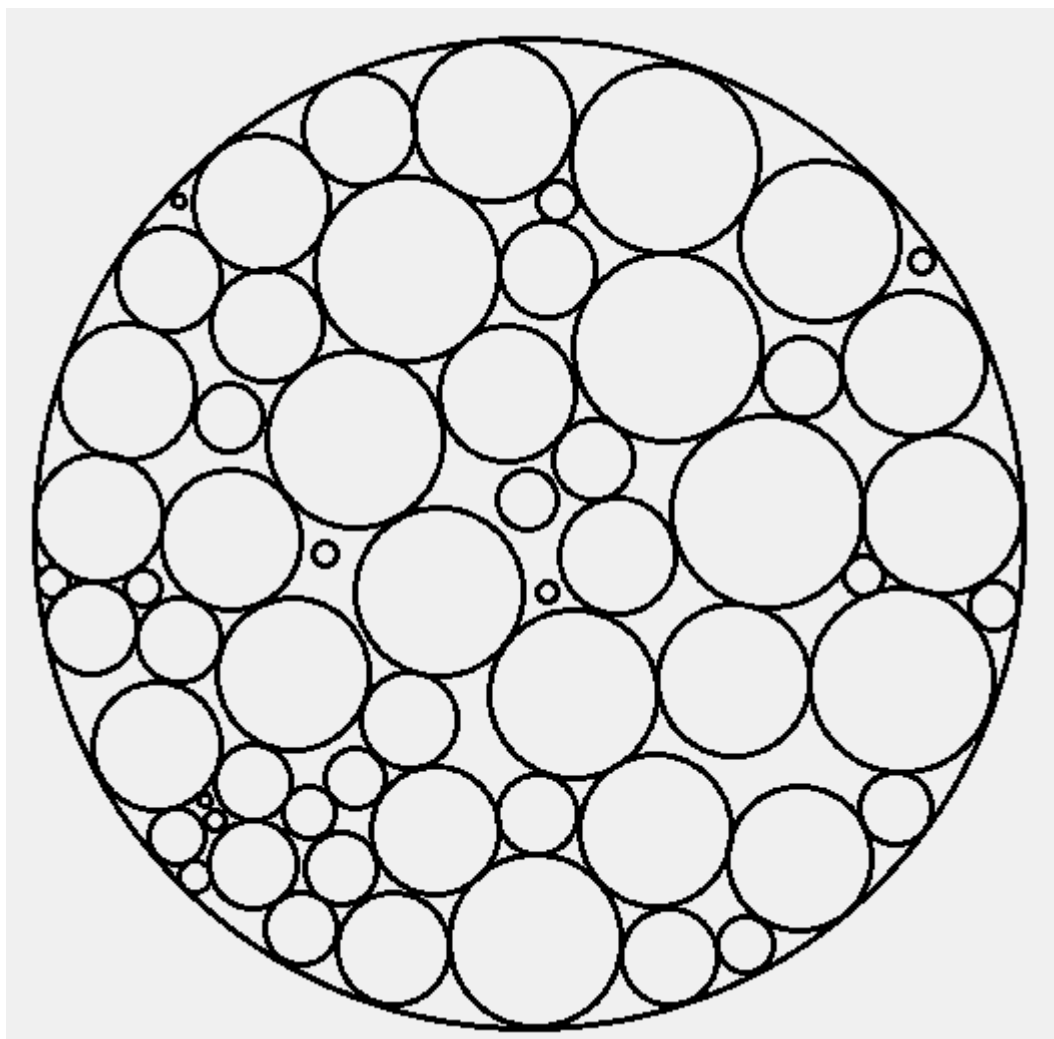


Рисунок 3.5 – Опис методу пошуку глобального мінімуму маси

При проектуванні складних технічних систем в авіабудуванні, суднобудуванні, будівництві турбін, логістиці існують проблеми для забезпечення загальної рівноваги маси, моменту інерції тощо. Вирішення цих проблем дуже важливе для проєктованих систем. Однак складність завдання така, що вона вимагає розробки нових спеціальних методів її рішення або удосконалення існуючих, які в основному використовують специфіку задач.

При розгляді такої задачі є множина точок $A_j = (x_j, y_j, z_j)$, $j \in J_N = \{1, 2, \dots, N\}$ у просторі R^3 і множина геометричних об'єктів S_i , $i \in J_N$ з масами m_i , $i \in J_N$, чий центри мас знаходиться в точках $T_i = (x_j, y_j, z_j)$, $i \in J_N$ відповідно. Необхідно помістити центр ваги кожного з об'єктів S_i , $i \in J_N$ в одній з точок A_i , $i \in J_N$ так, щоб відхилення центра ваги системи відносно точки $A_0 = (x_0, y_0, z_0)$ було мінімальним. Якщо відхилення центра ваги розміщених об'єктів від точки A_0 розглядається в евклідовій метриці, то цільову функцію задачі можна записати в так:

$$F(m) = \sqrt{\alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2}, \quad (3.12)$$

$$\text{де } \alpha = x_0 - \frac{\sum_{i=1}^N m_i x_i}{m_i}, \beta = y_0 - \frac{\sum_{i=1}^N m_i y_i}{m_i}, \gamma = z_0 - \frac{\sum_{i=1}^N m_i z_i}{m_i}, m_\Sigma = \sum_{i=1}^N m_i,$$

$$m = (m_1, \dots, m_N).$$

Оскільки кожна точка T_i , $i \in J_N$, має бути розміщена в одній і тільки одній з точок, A_j , $j \in J_N$. Дане завдання відноситься до класу задач призначення. Таким чином, вона може бути сформульована як задача оптимізації на множині перестановок N , елементи масового набору $m = (m_1, \dots, m_N)$.

Цей клас включає в себе завдання балансування маси частин, що обертаються, яке відбувається в турбінній конструкції електростанції, авіаційному двигуні тощо. На ідеально збалансовані диски необхідно розмістити лопатки із заданим кутовим кроком таким чином, щоб загальний

небаланс системи був мінімальним. Цільова функція задачі визначається статичними моментами лопаток щодо двох взаємно перпендикулярних осей. Дозволяє $m_i, i \in J_N$ бути статичними моментами лопаток щодо осей їх власних систем координат. Якщо лезо під кутом φ_k до осі Ox , то по відношенню до цієї осі її момент дорівнює $m_i \cos \varphi_k$. І по відношенню до осі Oy – $m_i \sin \varphi_k$ в системі координат, зв'язаної з диском. Тоді сумарний небаланс системи лопаток $S_i, i \in J_N$ встановлюється наступним чином:

$$f(m) = \left[\left(\sum_{i=1}^N m_{\pi_i} \cos \varphi_i \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^N m_{\pi_i} \sin \varphi_i \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (3.13)$$

де $\varphi_i, i \in J_N$ – є зазначеними кутами, відповідних лез місця на диску.

Таким чином, для даної задачі, перестановки мас $\{m_1, \dots, m_N\}$ однозначно визначають значення цільової функції.

Розглядається задача на прикладі балансної упаковки групи кіл в колі мінімального радіуса в вигляді багатоекстремальної задачі нелінійного програмування. За допомогою негладких штрафів задача зводиться до задачі безумовної мінімізації негладкою функції. Пропонується алгоритм пошуку локальних екстремумів негладкої функції з алгоритмом уточнення оцінки знизу для значення глобального мінімуму цільової функції, які базуються на використанні методів оптимізації негладких функцій із застосуванням модифікації r -алгоритму Шора.

Задача балансної упаковки неоднакових кіл в коло найменшого радіуса виникає в задачах щільної упаковки паралельних однакових за висотою кругових циліндрів в циліндричний контейнер при обмеженнях на динамічну рівновагу системи. Динамічна рівновага визначається вимогою, щоб центр ваги системи кругових циліндрів знаходився в центрі кругового контейнера.

Математична модель задачі рівноважної упаковки нерівних кіл може бути сформульована у вигляді різних багатоекстремальних задач математичного програмування. Одне із цих формулювань є предметом

дослідження даної роботи. Опишемо алгоритм знаходження локальних екстремумів і алгоритм уточнення оцінки знизу для значення глобального мінімуму цільової функції, які базуються на використанні методів оптимізації негладких функцій.

Розглянемо сімейство кіл S_i з радіусами r_i і ваговим значенням w_i , $w_i, i = 1, \dots, m$. Будемо вважати, що центр ваги кола S_i знаходиться в його центрі. Балансною упаковкою групи кіл $S_i, i = 1, \dots, m$, в круг S назвемо таку їх упаковку, щоб радіус кола S був мінімальним і центр ваги групи кіл $S_i, i = 1, \dots, m$, збігався з центром кола S [22].

Без обмеження загальності будемо вважати, що центр кола S знаходиться на початку нерухомої системи координат. Нехай точка (x_i, y_i) є невідомим центром кола S_i ; r – невідомий радіус кола S .

Позначимо відомі величини $\lambda_i = \frac{w_i}{\sum_{i=1}^m w_i}, i = 1, \dots, m$ нижню межу на

шуканий радіус $r_{low} = \max r_i, i = 1, \dots, m$. Тоді балансній упаковці групи кіл $S_i, i = 1, \dots, m$ відповідає багатоекстремальна задача нелінійного програмування [23]:

$$R \rightarrow \min r \quad (3.14)$$

при наступних обмеженнях:

$$x_i^2 + y_i^2 \leq (r - r_i)^2, i = 1, \dots, m, \quad (3.15)$$

$$(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 \geq (r_i + r_j)^2, 1 \leq i < j \leq m, \quad (3.16)$$

$$\sum_{i=1}^m \lambda_i x_i = 0, \sum_{i=1}^m \lambda_i y_i = 0, R \geq r_{low}, \quad (3.17)$$

де $x = (x_1, \dots, x_m)$, $y = (y_1, \dots, y_m)$. Тут цільова функція (3.14) є лінійною. Обмеження (3.15) гарантують, що $S_i \subset S$, а обмеження (3.16) описують умову $\text{int } S_i \cap \text{int } S_j = \emptyset, 1 \leq i < j \leq m$, де $\text{int}(\cdot)$ означає внутрішність множини (\cdot) .

Обмеження (3.17) означають, що центр ваги групи кіл S_i , $i = 1, \dots, m$, знаходиться в центрі кола S . Обмеження (3.15) забезпечує те, що значення радіуса кола S не йде до мінус нескінченності, чому формально не перешкоджає права частина обмеження (3.16).

В роботі наведені ще два формулювання цієї задачі. Перша – задача зворотньо-опуклого програмування, а друга – задача мінімізації функції максимуму із опуклих функцій при обмеженнях (3.16) і (3.17). У другому формулюванні змінна r не використовується і її оптимальне значення r визначається із мінімального значення негладкої цільової функції. Обидва формулювання вільні від обмеження, тому негативне значення r враховується за рахунок формулювання обмеження (3.14) у вигляді:

$$\sqrt{x_i^2 + y_i^2} \leq r - r_i, i = 1, \dots, m. \quad (3.18)$$

Алгоритм пошуку найкращого розв'язку включає в себе зведення задач (3.14) – (3.17) до задачі безумовної оптимізації негладкої функції [26]

$$\min \left\{ f(r, x, y) = r + \Phi_p(r, x, y) \right\}, \quad (3.19)$$

де штрафна функція $\Phi_p(r, x, y)$ має вигляд:

$$\Phi_p(r, x, y) = P_1(r, x, y) + P_2(x, y) + P_3 \max \{0, -r + r_{low}\}. \quad (3.20)$$

У формулі (3.20) P_k позитивні штрафні коефіцієнти $k = 1, 2, 3$, а функції $F_1(r, x, y)$ та $F_2(r, x, y)$ визначаються так:

$$F_1(r, x, y) = \sum_{i=1}^m \max \left\{ 0, x_i^2 + y_i^2 - (r - r_i)^2 \right\} + \sum_{i=1}^m \sum_{j=i+1}^m \max \left\{ 0, (x_i - x_j)^2 - (y_j - y_j)^2 + (r_i - r_j)^2 \right\}, \quad (3.21)$$

де Δx , Δy – задані допуски на відхилення координат центра ваги групи кіл від початку координат.

Використання в (3.20) штрафних коефіцієнтів P_k , $k = 1, 2, 3$ дозволяє

врахувати точність виконання обмежень (3.15), (3.16). Коефіцієнт P_1 , відповідає обмеженням (3.15), коефіцієнт P_2 – (3.16), а коефіцієнт P_3 – за обмеження (3.17).

Задачі компоновочного синтезу мають складну комбінаторну структуру, це вимагає розробки ефективних методів комбінаторної оптимізації. В роботі запропоновано новий підхід до реалізації генетичних алгоритмів в задачах оптимізації на евклідових комбінаторних конфігураціях. Евклідова комбінаторна конфігурація розглядається як відображення кінцевої абстрактної множини довільної природи в арифметичний евклідов простір. У результаті такого відображення задача комбінаторної оптимізації еквівалентно описується в термінах задач математичного програмування. У роботі розглянуто особливості реалізації генетичних алгоритмів для вирішення зазначеного класу задач: запропоновані способи формування початкової популяції і механізми відбору, формалізований і обґрунтований вибір операторів кросовера і мутації.

Також у даній роботі розглянуто задачу балансної упаковки об'єктів в заданій області за критерієм мінімізації довжини зв'язуючої мережі. Пошук локальних екстремумів здійснюється відповідно до принципу оптимізації по групах змінних. Перебір локальних екстремумів – методом околів, що звужуються. Перевірка взаємного неперетинання, дотику та перетинання n -вимірних сфер реалізована як єдина інформаційно-аналітична система.

Розглянуто задачу компоновки циліндричних об'єктів при розташуванні обладнання супутника із використання моделі С. Che, Y. Wang (URL: http://www.optimization-online.org/DB_HTML/2008/09/2093.html).

На рис. 3.6, *а* зображено компоновку 60 циліндричних об'єктів з допомогою методу змінного радіуса. При цьому послідовно розглядалися варіанти розбиття циліндрів на групи – по 12, 10, 6, 4, 3 у групі. Загальний час розв'язання становить 918 с. На рис. 3.6, *б* показано розташування циліндрів відповідно до ілюстрації на рис. 3.6, *а*. Для розташування 60 циліндрів на рис.

3.6, б наведено проекцію, що відповідає результату, отриманому за допомогою запропонованої технології (рис. 3.6).

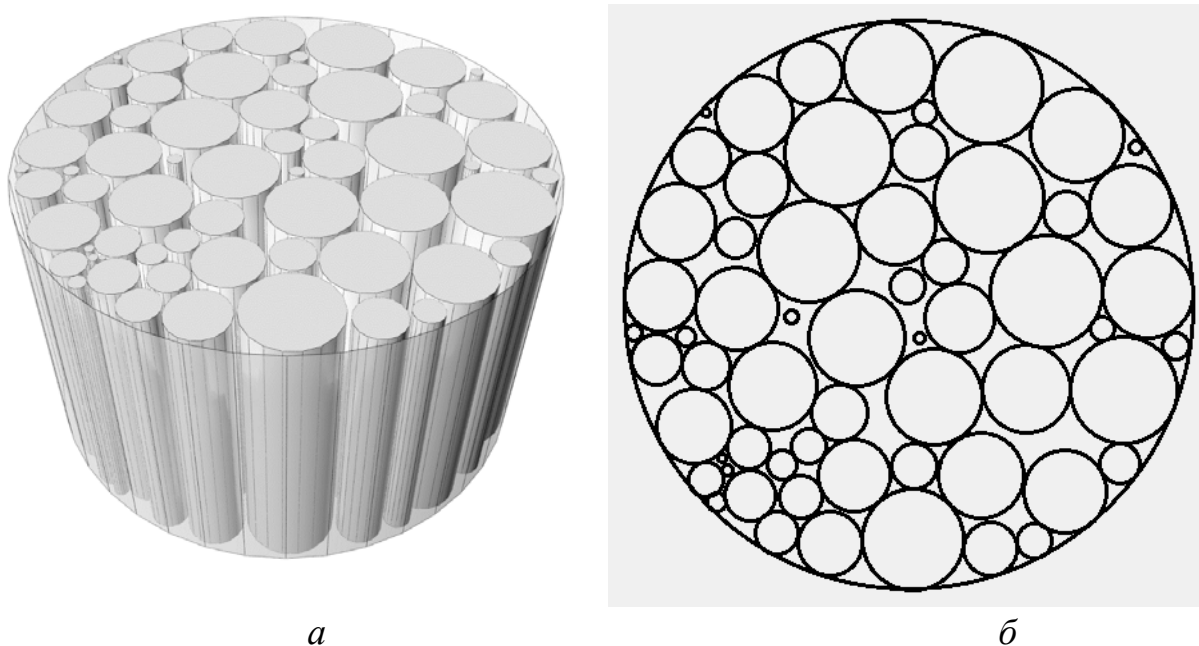


Рисунок 3.6 – Розташування циліндрів

3.3 Генетичний алгоритм розв'язання задачі балансування дискретно-розподілених об'єктів

Перестановка на основі задачі оптимізації у науковій літературі представлена у вигляді класу комбінаторних задач. Проте, NP-складність більшості задач вимагає розробки нових підходів, заснованих на отриманні та застосуванні специфічних властивостей кожного конкретного класу задач перестановок.

Сформулюємо задачу оптимізації функції $f(x)$, заданої на множині E евклідових комбінаторних конфігурацій, у вигляді:

$$f(x) \rightarrow \min, \quad x \in E.$$

Розглянемо особливості реалізації генетичних алгоритмів [220] для задач оптимізації на евклідових комбінаторних конфігураціях. Зауважимо, що генетичні алгоритми відносяться до класу еволюційних алгоритмів [221-224]

пошуку шляхом послідовного відбору, комбінування і варіації параметрів завдання з використанням механізмів, які лежать в основі біологічної еволюції і використовують терміни, взяті з генетики. Генетичні алгоритми [226] оперують множиною рішень (популяцій), сформованих кінцевою множиною особин. Особи, що входять в популяції, задаються хромосомами з закодованими в них параметрами завдання. Хромосоми являють собою впорядковані послідовності генів. Ген (який також називається властивістю) – це атомарний елемент генотипу, зокрема хромосоми. Набір хромосом у кожної особини задає її генотип (структуру). Таким чином, особинами популяції можуть бути генотипи або одиничні хромосоми. Сукупність зовнішніх і внутрішніх ознак, які відповідають цьому генотипу, задають фенотип особини.

Розробка генетичних алгоритмів передбачає вирішення наступних завдань:

- визначення способів формування початкової популяції;
- формування механізмів відбору;
- завдання оператора кросовера (схрещування);
- завдання оператора мутації;
- вибір умови закінчення пошуку.

Щоб вирішити цю задачу, використовуємо властивість евклідових комбінаторних множин, як застосовність теорії опуклих розширень, а також екстремальні властивості функцій, певні на вершино-розташовані набори. Евклідові комбінаторні множини називають вершино-розташовані, якщо вони збігаються з множиною вершин опуклої оболонки.

Для розглянутого класу задач припустимо, що генотип і фенотип особин популяції збігаються і в якості хромосоми виступає допустима евклідова комбінаторна конфігурація $x = (x_1, \dots, x_N)$, а генами є значення її компонент послідовності. Рішення позиціонуються в популяції відповідно до їх становища на поверхні досліджуваної функції. При цьому послідовно генеруються нові рішення як різні комбінації частин наявних популяцій.

Генерація початкової популяції, як правило, передбачає випадковий вибір особин. Для розглянутого класу задач мова йде про випадковий вибір допустимих евклідових комбінаторних конфігурацій $x = (x_1, \dots, x_N)$. Ця задача являє окремий інтерес і вирішується в залежності від розглянутого класу конфігурацій.

На наступному етапі здійснюється вибір батьківських пар. Як правило, при цьому використовується найкращий відбір, тобто вибирається k особин з найкращими значеннями цільової функції $f(x)$ і з них складаються батьківські пари. Особливості розглянутого класу задач дозволяють запропонувати наступний підхід до вибору батьківських пар $k(k-1)/2$. Обчислюючи евклідові відстані між кращими k особами, здійснимо кластеризацію формованого масиву. Виберемо $k_0 \leq k$ кластерів, в кожному з яких згруповані прилеглі особи. Будемо вибирати батьківські пари тільки з одного кластера. Звісно в цьому випадку кількість нащадків буде менше, ніж при повному переборі попарних сполучень. Однак різні правила схрещування, а також мутації дозволяють отримати необхідний обсяг потомства. У зв'язку з цим опишемо способи формування оператора кросовера (схрещування), засновані на властивостях різних класів множин евклідових комбінаторних конфігурацій.

Виберемо для схрещування дві особини $x = (x_1, \dots, x_N)$ і $y = (y_1, \dots, y_N)$. Одними з найбільш поширених способів схрещування є так звані одно- і двоточковий кросовери.

При одноточковому кросовері здійснюється випадковий вибір місця поділу послідовності координат на дві частини. Наприклад, здійснивши поділ по j -ій позиції, нащадками особин

$$x = (x_1, \dots, x_j, x_{j+1}, \dots, x_N),$$

$$y = (y_1, \dots, y_j, y_{j+1}, \dots, y_N),$$

вважатимемо

$$\tilde{x} = (x_1, \dots, x_j, y_{j+1}, \dots, y_N),$$

$$\tilde{y} = (y_1, \dots, y_j, x_{j+1}, \dots, x_N).$$

При двоточковому кросовері вихідні особини розбиваються на три частини в точках j_1 і j_2 , $j_1 < j_2$. В результаті нащадки матимуть вигляд:

$$\tilde{x} = (x_1, \dots, x_{j_1}, y_{j_1+1}, \dots, y_{j_2}, x_{j_2+1}, \dots, x_N),$$

$$\tilde{y} = (y_1, \dots, y_{j_1}, x_{j_1+1}, \dots, x_{j_2}, y_{j_2+1}, \dots, y_N).$$

Узагальненням двоточкового кросоверу є k -точковий кросовер, при якому батьківські особини розбиваються у точках j_1, j_2, \dots, j_k , $j_1 < j_2 < \dots < j_k$, а їх частини чергуються у нащадків.

Серед інших рекомендованих підходів до схрещування батьківських особин задамо рівномірний кросовер, при якому значення компонент з ймовірністю p береться від першого батька, а з ймовірністю $(1 - p)$ – від другого. Відомий також узагальнений кросовер, в якому спеціальний бітовий вектор-маска визначає значення гена якого з батьків отримає нащадок.

Складна комбінаторна структура множини E призводить до того, що отримані нащадки (евклідова комбінаторна конфігурація) \tilde{x} і \tilde{y} , як правило, не задовольняють системі обмежень Λ . Тому оператори кросовера, приклади яких наведені вище, назвемо операторами *квазісхрещування*. Результат z квазісхрещування евклідових комбінаторних конфігурацій $x = (x_1, \dots, x_N)$ і $y = (y_1, \dots, y_N)$ представимо у вигляді:

$$z = H(x, y) = xf(x) + yf(y).$$

Для формування допустимих евклідових комбінаторних конфігурацій на основі квазісхрещування батьківських особин необхідно здійснити спеціальні перетворення.

У зв'язку з цим запропонуємо наступний підхід. Виберемо евклідову комбінаторну конфігурацію $\tilde{z} = (\tilde{z}_1, \dots, \tilde{z}_N)$, яка задовольняє системі обмежень Λ , і є найближчою до особини $z = (z_1, \dots, z_N)$, отриманої в

результаті квазісхрещування. Таким чином, маємо допоміжну задачу проектування деякої точки z на множину допустимих евклідових конфігурацій E , тобто

$$\tilde{z} = \text{Pr}_E z.$$

Отже, оператор кросовера для евклідових комбінаторних конфігурацій $x = (x_1, \dots, x_N)$ і $y = (y_1, \dots, y_N)$ показано у вигляді суперпозиції операторів:

$$\tilde{z} = \text{Pr}_E H(x, y).$$

Знаходження точки \tilde{z} зводиться до вирішення оптимізаційної задачі

$$\|\tilde{z} - z\| \rightarrow \min, z \in E.$$

Специфіка різних множин евклідових комбінаторних конфігурацій дозволяє віднести їх до класу добре описаних, тобто множин, на яких лінійні задачі поліноміальної множини можна розв'язати. Перш за все мова йде про так званих сферично розташованих множин.

Множину $E \subset R^n$ назвемо сферично розташованою, якщо існують такі $\tau \in R^n$ і число $r > 0$, що для будь-яких $z \in E$

$$\|z - \tau\|^2 = r^2.$$

Нехай E – сферично розташовані множини евклідових комбінаторних конфігурацій. Тоді для будь-яких $z = (z_1, \dots, z_N) \in E$ і $z^0 = (z_1^0, \dots, z_N^0)$ маємо

$$\|z - z^0\|^2 = \|z - \tau\|^2 + \|z^0 - \tau\|^2 - 2(z - \tau, z^0 - \tau) = \sum_{i=1}^N c_i z_i + b,$$

де $c_i = -2(z_i^0 - \tau_i)$, $b = r^2 + \sum_{i=1}^N (z_i^0 - \tau_i)^2 + 2 \sum_{i=1}^N \tau_i (z_i^0 - \tau_i)$.

Таким чином, рішення задачі зводиться до знаходження мінімуму лінійної функції $f(z) = \sum_{i=1}^N c_i z_i$ на множині E , а отже, і на багатокутнику

$\text{conv } E$.

Розвиваючи цей підхід, запропонуємо такі способи отримання нащадків для особин $x = (x_1, \dots, x_N)$ та $y = (y_1, \dots, y_N)$. З огляду на те, що особини (евклідова комбінаторна конфігурація) є елементами арифметичного евклідового простору, скористаємося властивістю лінійності цього простору. Для пошуку потомства будемо вибирати лінійні комбінації особин x і y .

Розглянемо загальний підхід [231] для формування оператора кросовера, який враховує різні схеми побудови лінійних комбінацій x і y .

Проста лінійна комбінація батьківських пар:

$$\tilde{z} = \text{Pr}_E(x + y).$$

Зважена лінійна комбінація батьківських пар у відповідності зі значеннями функції $f(x)$ в цих точках:

$$\tilde{z} = \text{Pr}_E(xf(x) + yf(y)).$$

При цьому в задачі максимізації більшому значенню функції відповідає більший коефіцієнт.

Рандомізована зважена лінійна комбінація:

$$\tilde{z} = \text{Pr}_E(pxf(x) + (1-p)yf(y)),$$

де p – рівномірно розподілена на відрізку $[0, 1]$ випадкова величина.

У загальному випадку логічним буде припущення, що потомство зберігає гени не тільки своїх батьків, а й інших предків. Тоді оператор кросовера при зваженій лінійній комбінації k -особин набуде вигляду:

$$\tilde{z} = \text{Pr}_E\left(\sum_{i=1}^k x_i f(x_i)\right), \quad (3.22)$$

а при рандомізованій зваженій лінійній комбінації –

$$\tilde{z} = \text{Pr}_E\left(\sum_{i=1}^k p_i x_i f(x_i)\right),$$

де $\sum_{i=1}^k p_i = 1$.

Відомо, що евклідова множина перестановок E , індукована мультимножина $B = \{b_1, \dots, b_n\} \subset R^1$, ця вершина розташована і збігається з сукупністю рішень системи лінійних і квадратичних обмежень:

$$\sum_{i=1}^n z_i = \sum_{i=1}^n b_i, \quad \sum_{i \in W} z_i \geq \sum_{i=1}^{|W|} b_i, \quad \forall W \subset J_n,$$

$$\sum_{i=1}^n z_i^2 = \sum_{i=1}^n b_i^2,$$

де $|W| = \text{card } W$, $J_n = \{1, \dots, n\}$. З цього видно, що множина E вписана в гіперсфері. Звернемо увагу, що вершино-розташовану множину $E \subset R^n$ називають поліедральною [8, 9], якщо існує $\tau \in R^n$ і ряд $r > 0$ такий, що $\|z - \tau\| = r$ для будь-якого $z \in E$.

Евклідова множина перестановок E – є поліедрально-сферичною [183]. Ця перестановка задається наступними параметрами:

$$\tau = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n b_i, \quad r = \sqrt{\sum_{i=1}^n (b_i - \tau)^2},$$

$$\sum_{i=1}^n (z_i - \tau)^2 = r^2.$$

Ці властивості будуть використані в якості основи для побудови операторів кросоверу в алгоритмах генетичної оптимізації на множині перестановок у класі евклідових комбінаторних конфігурацій множин простору R^n .

З представленими генетичними алгоритми було проведено тести для вирішення завдання балансування при розміщенні від 50 до 300 мас, рівномірно розподілених на інтервалі (0, 100). Координати точок A_i , $i \in J_n$ були також генеровані випадковим чином в інтервалі (-50, 50) і $A_0 = (0, 0, 0)$. Для виконання розрахунків було використано комп'ютер з такими характеристиками: i3 / 8G / SSD 256G. Середній час виконання для розподілу 100 мас – 9 секунд. У всіх випадках було досягнуто загального небалансу не більше ніж 0,1 одиниць. Результати було порівняно з випадковим пошуком, де

число генерованих варіантів відповідає одному і тому ж часу, як і під час використання генетичних алгоритмів. При реалізації багатовимірної стратегії методом Монте-Карло з таким же числом розрахунків, було отримано небаланс системи, який дорівнює 5.47.

Відомий тест «проблема балансування мас, що обертаються» розглянуто у роботі [4] та наведено результати розв'язання для деяких методів комбінаторної оптимізації. Небаланс оцінювався за формулою (3.13), де $N = 96$ лопаток було розміщено на диску з рівним кутовим кроком $\varphi_i = 2\pi i / N$, $i \in J_N$. Було використано оператор кросоверу типу (3.22). Обрано популяцію з 1000 перестановок. Кращі 50 з них використовувались для формування нових популяцій за кросовером (3.22). Оптимальна значення дисбалансу, що дорівнює 0,054, було досягнуто на шостому поколінні і за 0,83 секунди. Відповідна перестановка має вигляд: {42; 7; -63; 7; -9, 3; -10; 7; -14; 17; -11; 22; 17; -30; 5; -28; 77; 19; -6; -46; 0; 25; -31; -6; 11; 3; 19; 8; 22; -26; 20; -4; -38; 2; -26; -14; 49; -27; 12; -4; 16; -7; -18; -55; 5; 9; -24; -33; -18; 2; -9; 11; 37; -25; -14; -2; -7; -16; 3; -53; 48; 14; 30; 29; 48; 0; 17; -36; -69; -2; 13; -5; -26; -4; 13; 5; 12; 42; -9; -3; -10; 0; 6; 7; -9; -40; 11; -30}. Загальна кількість обчислень значення функції дорівнює 9552. Для порівняння значення цільової функції для одних і тих же випадково генерованих перестановок дорівнює 5,491.

Аналіз наведених вище прикладів показує, що використання запропонованого підходу до завдання оператора кросовера для евклідових комбінаторних конфігурацій відповідає основним принципам, покладеним в основу формування нової популяції.

3.4 Висновки по розділу

Запропоновані моделі та методи інформаційної технології компоновочного синтезу просторових об'єктів сферичної форми.

Конкретизовані умови на взаємне розташування сферичних об'єктів та аналітичний вигляд критеріїв якості просторових конфігурацій.

Описані базові принципи інформаційної технології та властивості моделей просторових конфігурацій залежно від системи обмежень на узагальнені змінні відповідного конфігураційного простору.

Оптимізація просторових конфігурацій здійснюється за такими критеріями: мінімізація зайнятого об'єму (площі) контейнера, мінімізація небалансу системи та мінімуму сумарної мережі, яка зв'язує сферичні об'єкти, з урахуванням обмежень на мінімальні й максимальні відстані між ними. Процес оптимізації базується на використанні сучасних методів локальної оптимізації.

NP-складність задач оптимізації просторових конфігурацій потребує розроблення спеціальних методів глобальної оптимізації, побудованих на схемах перебору локально-оптимальних розв'язків. З метою поліпшення отриманих розв'язків у задачах компоновки сферичних об'єктів розроблений метод змінного радіуса, що являє собою подальший розвиток відомого методу штучного розширення простору.

Метод дозволяє при реалізації обчислювальних схем нелінійної оптимізації долати області тяжіння локальних екстремумів вихідної задачі. Ефективність методу змінного радіуса підтверджено чисельними експериментами. Наведено приклади компоновки сферичних об'єктів у сфері мінімального радіуса та при розв'язанні модельних задач компоновочного синтезу кругових об'єктів, які виникають при пакуванні рулонних матеріалів в логістичних системах складування.

Оскільки задачі компоновочного синтезу є багатоекстремальними й мають складну комбінаторну структуру, запропоновано новий підхід до реалізації генетичних алгоритмів у задачах оптимізації на евклідових комбінаторних конфігураціях. Описані особливості реалізації генетичного алгоритма, формалізовано й обґрунтовано вибір операторів кросовера і мутації. Розглянуто застосування алгоритму для розв'язання задач

балансування дискретно розподілених мас. Порівняння із результатами тестових задач підтвердили ефективність запропонованого підходу.

Наукові результати, наведені в даному розділі, опубліковані в роботах [185, 200–206], а список джерел, які використано, наведено у повному переліку використаних джерел [6, 8, 9, 20–23, 25, 26, 70, 125, 129, 199, 207–219, 225, 232, 233, 235, 237].

4 РЕАЛІЗАЦІЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ КОМПОНОВОЧНОГО СИНТЕЗУ ПРОСТОРОВИХ ОБ'ЄКТІВ ТА АПРОБАЦІЯ ОДЕРЖАНИХ РІШЕНЬ

4.1 Опис програмного додатку, що реалізує інформаційну технологію компоновочного синтезу сферичних об'єктів

У рамках запропонованих у попередніх розділах моделей та методів інформаційної технології компоновочного синтезу просторових конфігурацій розроблено наступний комплекс програмних додатків. Комплекс програм структурно описаний на рис. 4.1 та включає в себе:

- програмний додаток – солвер, для реалізації методів оптимізації просторових конфігурацій;
- програму-репозиторій – консолідоване сховище, для зберігання інформації про процес рішення задач;
- програмні додатки для візуалізації отриманих рішень.

Таким чином, програмний комплекс має ієрархічну структуру і складається з трьох функціональних частин. Перша складова програмного комплексу – це програмний додаток (ПД), який назвемо GeneralSolver, який реалізує інтегрування обраного солвера та необхідні обчислювальні програмні складові. GeneralSolver використовують для динамічного перетворення структури даних геометричної інформації у процесі синтезу просторових конфігурацій складних об'єктів. У свою чергу даний ПД розроблений на підґрунті платформи .NET Framework. Програма виконує валідацію даних, що вводяться користувачем, а також перевіряє їх коректність та відповідність до формату. У разі отримання некоректних даних на екран видається повідомлення про помилку та її характер. Якщо під час виконання програми виникає критична помилка, то програма автоматично завершує своє виконання.



Рисунок 4.1 – Структурна схема комплексу програмних додатків

Друга складова комплексу – ПД для збереження результатів обчислень GeneralSolve. Окрім обчислень, сховище містить повну інформацію про просторові конфігурації базових об'єктів, значення узагальнених змінних конфігураційного простору, які були залучені у процесі синтезу відповідно методу, описаному у розділі 3, та інформація про математичну постановку задачі (критерії якості, обмеження).

Процес обчислень та зберігання просторових об'єктів має чисельні результати. Для зручності уявлення отриманих просторових конфігурацій використовується третя складова – ПД 2D- або 3D-візуалізації. Для візуалізації 2D-конфігурацій у роботі розроблений відповідний ПД. Для 3D-візуалізації можна використовувати різні пакети візуалізації 3Ds Max Studio, Revit, VRED, Stingray, Maya тощо. Як приклад 3D-візуалізації у роботі вибраний графічний пакет – 3Ds Max Studio.

Розробка описаного програмного комплексу (ПК) здійснювалась у середовищі Visual Studio 2017 на різних мовах програмування (C#, C++ та ECMA Script).

Для експлуатації зазначених ПД необхідні такі програмно-технічні засоби:

- ЕОМ на апаратній платформі x64 під керуванням ОС сімейства WINDOWS (Windows 7/8/10);

- розрізнення екрану 1024x768 або вище;

- жорсткий диск з вільним простором не менше 1 Гб;

- обсяг ОЗП – не менш 1024 Мб;

- маніпулятор миша.

Програмні додатки надають користувачу наступні можливості:

- формування інформації про геометричні об'єкти. Вихідна інформація про матеріальні об'єкти базується на об'єктній структурі, яка описана у розділі 2;

- збереження даних у консолідованому сховищі;

- завантаження необхідної інформації для використання методів оптимізації у відповідності до обраної математичної моделі задачі синтезу оптимальної конфігурації;

- отримання локально-оптимального рішення задачі;

- візуалізація локально-оптимального рішення задачі.

Функціонування програми забезпечується шляхом послідовної обробки вихідної інформації. Для сферичних об'єктів моделі та методи інформаційної технології описані у розділі 3. Порядок виконання визначається ОПР вручну відповідно кроку дискретизації або за алгоритмом, заданим розробником, тобто у автоматичному режимі. Узагальнена UML діаграма послідовності дій ОПР при синтезі просторових конфігурацій показана на рис. 4.2 та рис. 4.3.

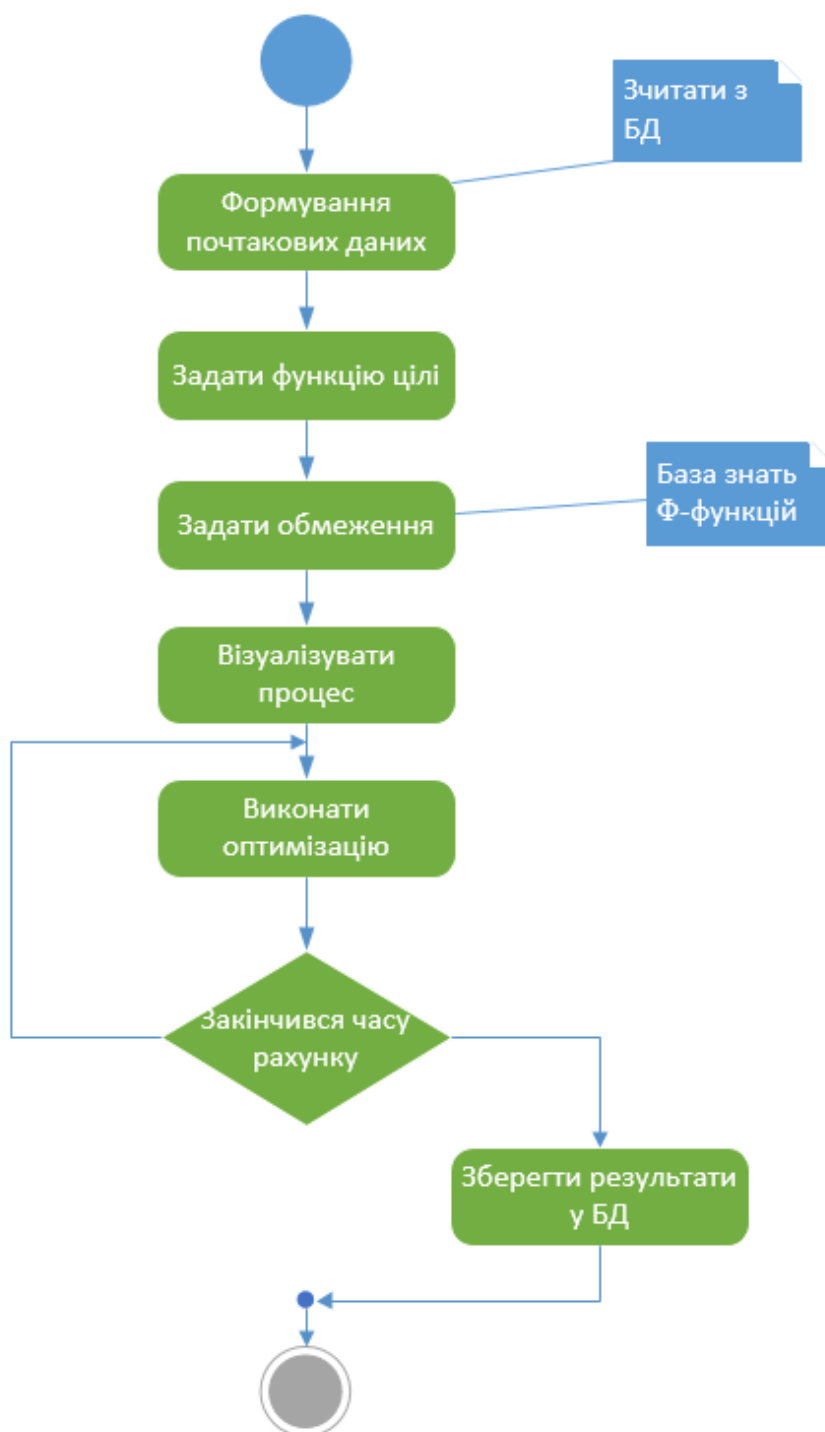


Рисунок 4.2 – UML-діаграма діяльності без втручання ОПР

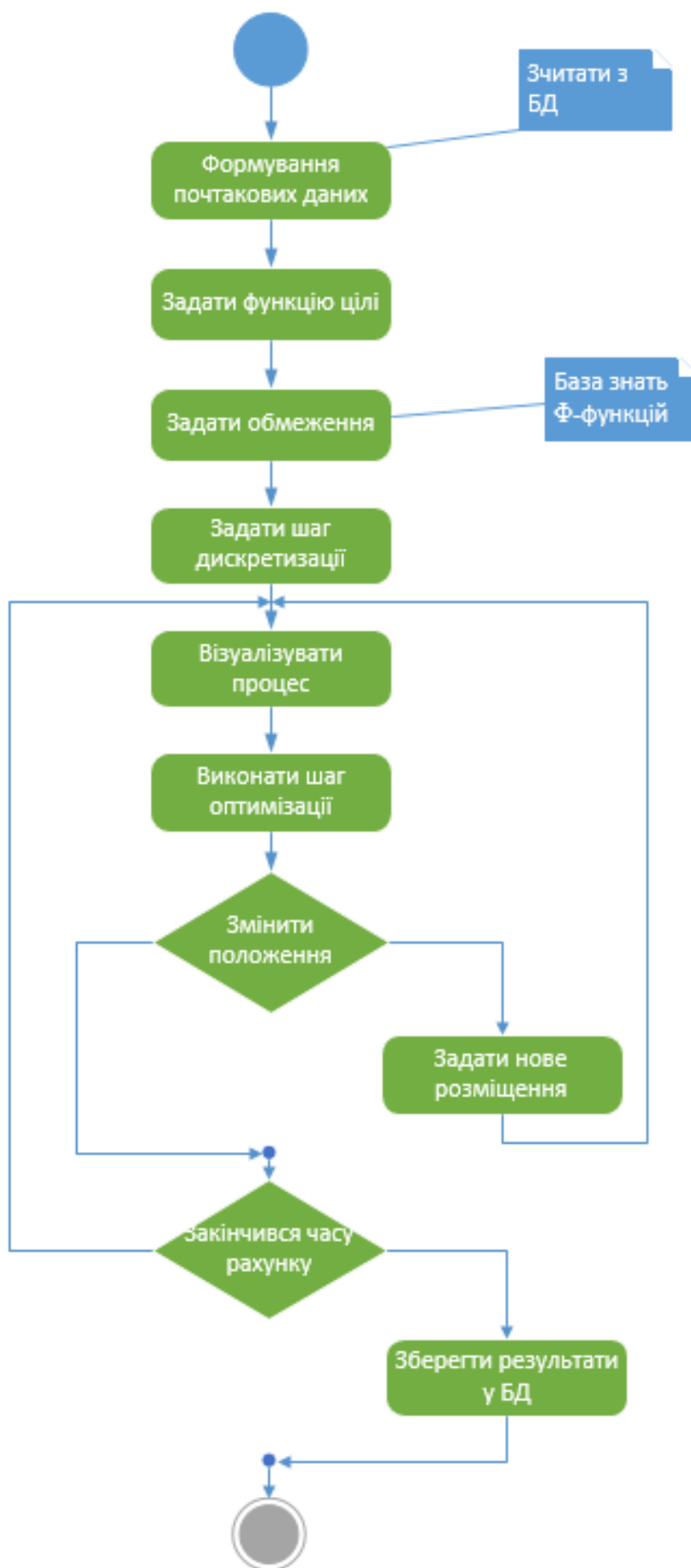


Рисунок 4.3 – UML-діаграма діяльності з втручанням у синтез ОПР

До основних принципів, які використовувались під час розробки програмного комплексу, відносять наступні:

- новизна підходу до проектування: в основу ІТ покладена розроблена інформаційно-аналітична модель синтезу оптимальних просторових конфігурацій;
- актуальний інтерфейс: ІТ представлена у вигляді програмних додатків, які розроблені за концепціями ООП та використанням графічних пакетів;
- модульність: ІТ представлена у вигляді комплексу застосувань, які інтегрують формування вихідних даних, NLP-солвер, 2D- й 3D-візуалізацію, та подальше збереження у консолідованому сховищі;
- достовірність отриманих результатів: отримані результати дозволяють приймати інженерне рішення відносно конфігурації розміщення просторових об'єктів.

4.2 Опис та структура програмного додатку GeneralSolver

Для рішення задач, які описані у першому розділі, необхідний програмний додаток, який дозволяє розв'язувати даного класу задачі. Клас задач має відповідати описаній математичній моделі. У процесі формалізації моделі було визначено, що рішення цього класу задач відноситься до *нелінійного програмування*. Для їх розв'язання потрібно враховувати критерії якості, велику кількість обмежень, різного типу обмежень змінних, а реалізація такої системи набирає форми окремого програмного продукту. Розглянемо існуючі програмні засоби (*солвери*) для рішення класу задач, які розглядається. Серед вимог до пошуку солвера наступні:

- можливість імпортувати на платформу програмування .Net, що дозволить інтегрувати з сучасними мовами програмування;
- умовно безкоштовний або у вільному доступі, наприклад, General Public License (GPL).

Програмний додаток Netlib знаходиться за наступною електронною адресою: <ftp://www.netlib.org/opt/index.html> і доступний для вільного скачування GPL з подальшим впровадженням в свій програмний код з інтегрованими наступними алгоритмами:

- conmax (мінімізація функції з нелінійними обмеженнями);
- donlp2 (нелінійна оптимізація для функцій, які диференціюються);
- dqed (метод найменших квадратів для нелінійних функцій при лінійних обмеженнях);
- hooke (оптимізація без обмежень і без використання похідних);
- lbfgs (нелінійна оптимізація при обмеженнях простої структури вигляду $a < x < b$);
- lsno (нелінійна оптимізація при лінійних обмеженнях);
- praxis (оптимізація без обмежень і без використання похідних);
- simann (оптимізація без обмежень з використанням методу відпалу Simulated Annealing);
- subplex (оптимізація без обмежень);
- tn (метод Ньютона для оптимізації без обмежень або з простими обмеженнями);
- varpro (метод найменших квадратів для сепарабельних функцій).

Розроблення пакета почалося в 1980 році мовами C++ і Fortran. Такий пакет містить багато алгоритмів розв'язання, але його мінусом є оптимізаційні алгоритми у вигляді давнини написання, мають мало функціоналу та не всі методи дозволяють працювати з обмеженнями. Крім того, було виявлено складність підключення на платформу .NET.

Програмний пакет TRON [195] – це реалізація метода Ньютона для рішення задач великої розмірності умовної оптимізації. TRON використовує метод проєкції градієнта для генерації кроку Коші, зумовленого методу сполученого градієнта з неповною факторизацією Холецького для генерації напряму і прогнозованого пошуку для обчислення кроку. Використання проєційованих пошуків, зокрема, дозволяє досліджувати межі допустимої

множини шляхом генерації невеликої кількості другорядних ітерацій навіть для задач із великою кількістю змінних. У результаті TRON ефективний при вирішенні великих задач умовної оптимізації.

Цей пакет має невелику кількість обмежень, у зв'язку з чим неможливо вирішення задач великої розмірності. Цей пакет є «умовно» безкоштовним та має обмежений термін використання безкоштовної версії. Перевагами є:

- відсутність припущень про строгу взаємодоповнюваність;
- глобальна конвергенція;
- швидка локальна збіжність;
- ідентифікація оптимальної межі в скінченному числі ітерацій;
- неповна факторизація Холецького з передбачуваними вимогами щодо зберігання.

Програмний пакет L-BFGS-B [196] використовує методи з обмеженої пам'яттю, серед яких є квазі-Ньютоновий. Даний пакет має обмежену оптимізацію, тобто використовується для задач, де єдині обмеження мають вигляд $a < x < b$. Початкові реалізації починалися ще в 1980 році та підтримуються і зараз. Поточний випуск – версія 3.0. Це програмне забезпечення є вільно доступним, але правовласники очікують, що всі публікації, в яких описано роботу з використанням цього програмного забезпечення, або всі комерційні продукти, які використовують його, будуть цитувати, принаймні одне із посилань, розміщених на офіційному сайті. У пакеті описується ітераційний метод чисельної оптимізації призначений для знаходження локального максимуму чи мінімуму нелінійного функціонала без урахування обмежень, що не задовольняє опис математичної моделі нашої задачі, хоча даний алгоритм дуже хороший при вирішенні складних нелінійних задач його використання неможливе.

Розглянемо групу солверів у *середовищі розроблення Matlab* [197]. Він має багато Toolbox, які сприяють написанню програм із використанням методів оптимізації. Наприклад, Optimization Toolbox містить алгоритми для задач NLP. Пакети TOMLAB, LOQO містять MATLAB-інтерфейс для

квадратичного програмування, MCS – пакет розв'язання задач глобальної оптимізації, який працює в середовищі MATLAB. Оптимізація Toolbox надає функції для пошуку параметрів, які мінімізують або максимізують цільові функції при заданих обмеженнях. Набір Toolbox містить солвери для лінійного програмування (LP), змішаного цілочисельного лінійного програмування (MILP), квадратичного програмування (QP), нелінійного програмування (NLP), обмежених лінійних найменших квадратів, нелінійних найменших квадратів і нелінійних рівнянь. Можна визначити свою задачу оптимізації з функціями і матрицями або шляхом вказівки змінних виразів, які відображають математику, що лежить в її основі.

TOMLAB [198] розроблений в 1999 році і продовжує розширювати свій функціонал, пропонує широкий спектр інструментів оптимізації, які підтримують глобальну оптимізацію, цілочисельне програмування, всі типи найменших квадратів та підтримує програмування для задач оптимізації у MATLAB. Доступний для 32x і 64-розрядних платформ у Windows, Linux і MAC OS X за наявності ліцензії на середу розроблення Matlab.

Список методів вирішення:

- glcCluster: змішана ціла нелінійна глобальна оптимізація;
- PDCO: метод первинно-подвійного бар'єра для опуклих цілей, керує лінійними обмеженнями;
- slsSolve: рідкісні найменші квадрати з нелінійними обмеженнями тощо.

TOMLAB обробляє широкий спектр класів задач, серед яких:

- лінійне програмування;
- квадратичне програмування;
- нелінійне програмування;
- змішане ціле програмування;
- змішане цілочислове програмування з опуклими квадратичними обмеженнями або без них;
- змішане ціле нелінійне програмування;

- глобальна оптимізація;
- генетичне програмування тощо.

Однією із причин мотивації TOMLAB є спрощення досліджень щодо практичних задач оптимізації, що дає легкий доступ до всіх типів солверів, у той же час маючи повний доступ до сили Matlab.

LOQO – потужний солвер для задач з гладкою обмеженою оптимізацією, оснований на методі внутрішньої точки, що застосовують до послідовності квадратичних наближень. Відповідно до вимоги, щоб визначальні функції були гладкими (в точках, оцінених алгоритмом), LOQO може обробляти ряд завдань: лінійний або нелінійний, опуклий або неопуклий, обмежений або необмежений. Для опуклих задач LOQO знаходять глобально-оптимальне рішення в іншому випадку – від ітерації з даної початкової точки, щоб знайти локально оптимальне рішення.

Підтримувані типи задач:

- лінійні;
- квадратичні;
- гладкі нелінійні задачі;
- обмеження безперервних змінних.

Зауважмо, що для більшої ефективності, даний пакет можливо використовувати при опуклій задачі.

Вище розглянуто методи, бібліотеки, надзвичайно ефективні і позитивні в плані реалізації алгоритмів. Вони мають ряд переваг поряд з деякими комерційними продуктами і в той же час один відмітний недолік: їх застосування можливе в середовищі Matlab і тільки в ньому.

Наведемо інформаційні відомості щодо *IpOpt* [199]. Використовує алгоритм внутрішньої точки для задач NLP великої розмірності. Вільно поширюється, має відкритий програмний код і не потребує зобов'язань при створенні комерційних програм. Початкова версія цього солвера була створена як навчальний проект, який викладався професором Франсуа Марго в Університеті Карнегі-Меллона. Його було створено з відкритим програмним

кодом та розповсюджено з ініціативи COIN-OR, яка на даний час є некомерційною корпорацією. IpOpt активно розвивається під назвою COIN-OR з 2002 року.

Поточна версія коду солвера IpOpt була збережена в IBM Research і залишається частиною ініціативою COIN-OR. Даний солвер дозволяє застосовувати для розв'язання оптимізаційних задач розміщення методи оптимізації IpOpt та відмінно імпортується всіма мовами платформи .NET, оскільки, реалізований на мові програмування C++, відповідно застосовуваний з використанням мови програмування C#. Даний солвер має велику кількість налаштувань роботи алгоритму, містить багато вбудованих методів, які не потребують повторної реалізації і відмінно оптимізовані за швидкістю виконання, простота освоєння – його сильна сторона. Документація написана в повному обсязі і є доступною на офіційному сайті без обмежень доступу.

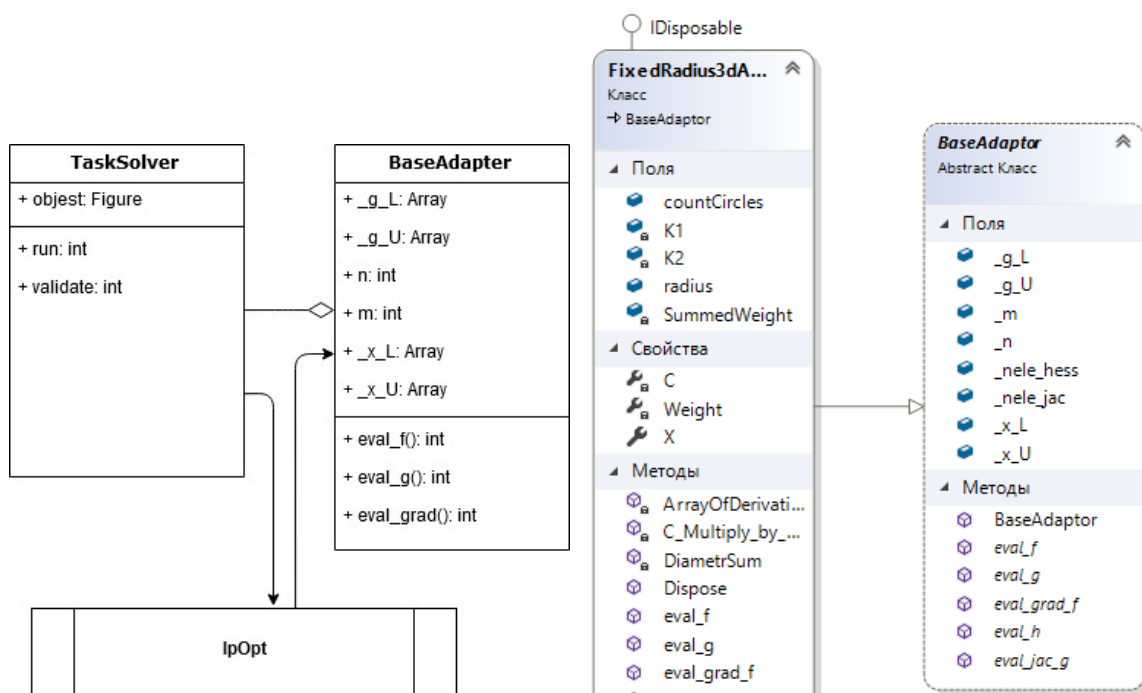
IpOpt – є бібліотекою програмного забезпечення для нелінійної оптимізації безперервних систем. Використовує в своїх обчисленнях інформацію про першу похідну (якобіан) і другу похідну від функції Лагранжа за кожною змінною заданою системою, якщо є можливість задання такої. Якщо гесіан від функції Лагранжа не надається, IpOpt буде використовувати методи квазі-Ньютона як деякі наближення.

На підставі приведенного аналізу був вибраний солвер – IpOpt . З одного боку він може застосовуватися з різними мовами програмування, має гнучкі налаштування, здатний вирішувати задачі багатьох областей, має можливість імпортуватись на платформу.Net. З іншого – може вільно використовуватись.

Відповідно до моделі солвера, описаної у другому розділі. Процес роботи GeneralSolver починається з підготовки даних, тобто їх формату. Програмний додаток має наступні формати:

- формат Карташова [200]: $x[0], y[0], z[0], m[0], \dots, x[i], y[i], z[i], m[i]$;
- Формат RI: $x[0], y[0], z[0], \dots, x[i], y[i], z[i], m[0], \dots, m[i]$.

Для адаптації вхідних параметрів поточного завдання розроблений клас BaseAdapter. У основній програмі виконується формування структури вихідних даних, їх верифікація. Формування необхідної структури даних для обраного солвера виконується у класі-адаптері. Опис структури підходу запропоновано на рис. 4.4 а та розроблені класи у межах даного програмного додатку показано на рис. 4.4 б.



а – структура взаємодії класів

б – розроблена структура класів

Рисунок 4.4 – Опис програмного додатку GeneralSolver

Структура адаптера створена на базі базового класу, який позначений модифікатором Abstract, який зобов'язує дочірній клас реалізувати всі методи базового класу і наповнити їх своєю логікою.

Почнемо більш детальний розгляд підготовки даних із полів класу, які показано на рис. 4.5

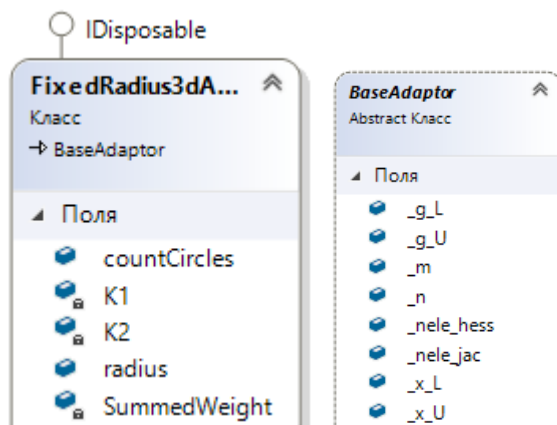


Рисунок 4.5 – Поля класу-адаптера

Поля частково позначені модифікатором доступу Private, оскільки є важливими при роботі з методами, які формують логіку функцій, обчислюють значення цільової функції і при роботі з іншими методами, отже, їх доступність ззовні є небажаною. Назви полів мають бути такими, як це показано на див. рис. 4.5, при зміні структури назв відбудеться збій роботи програми, тому що даний адаптер не просто передає дані ядру солвера, він передає посилання на даний екземпляр класу, де вже відбувається зв'язування з внутрішньою оболонкою IpOpt. Алгоритм програми, написаний на C++, на платформі .NET, має можливість в силу конструкції мови отримувати прямий доступ до цих змінних. Якщо ж ми змінимо назву змінних, то не відбудеться зв'язування назв закладених в IpOpt і адаптера даних, що призведе до недоотримання даних.

Наприклад, властивість X містить у собі після закінчення роботи методу пошуку мінімуму набір даних з усіх просторових характеристик отриманого рішення. Даний вектор у подальшому можна перезаписати окремо у відповідний своїй координаті масив. У цьому класі містяться як фізичні обмеження такі як Weight, набір даних з вагами кожної кулі, так і аналітичні обмеження, всі вони являють собою структуру масиву, використовуваного для розрахунку матриці других похідних і цільової функції. C – це двовимірний масив цілочисельних коефіцієнтів, які є показником важливості близькості розміщення об'єктів.

Розглянемо основні методи адаптера. Методи, як і поля, необхідно називати, як це зазначено в документації, інакше станеться помилка на етапі виконання (рис. 4.6):

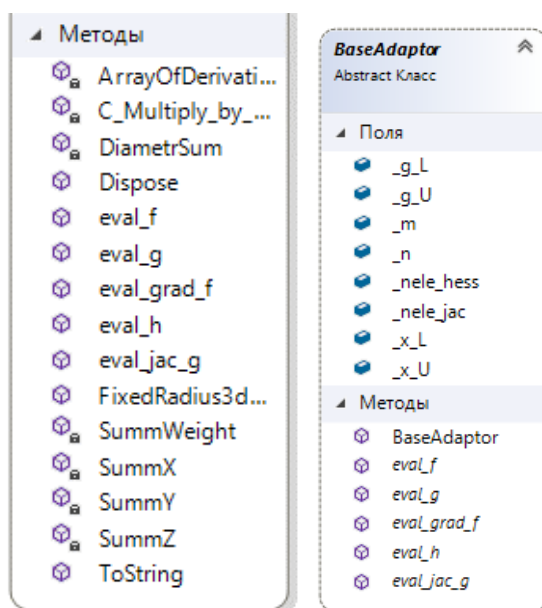


Рисунок 4.6 – Методи класу-адаптера

Назва кожного методу відображає його логіку і призначення в програмі. Метод `eval_g` призначений для знаходження значення обмежень, метод `eval_jac_g` проводить обчислення позицій ненульових елементів у матриці Якобі тощо. Щодо особливостей заповнення логікою вказаних вище методів можна звернутися до офіційної документації проекту IpOpt. `C_Multiply_by_Length` – метод, що забезпечує стислість реалізації методу `eval_f`, оскільки, є необхідною складовою цільової функції. `ArrayOfDerivatives` – допоміжний метод, який спрощує знаходження градієнта від цільової функції за всіма змінними.

Структура класу-адаптера написана таким чином, щоб забезпечити коректність роботи всієї системи в цілому: введення даних користувачем, передача їх в ядро солвера та за допомогою текстових файлів взаємодія із іншими програмними додатками програмного комплексу. Кінцевим кроком є передача результатів розрахунків користувачу для їх збереження, якщо це необхідно.

4.3 Модуль «консолідоване сховище»

При виборі архітектурного рішення для інструментального засобу враховувалися такі принципи:

- організація згідно паттерна «репозиторій»;
- розподілений доступ до даних, згідно вимог розробки баз даних;
- відповідність інтерфейсу вимогам юзабіліті.

Загальна структура паттерну «репозиторій» зображена на рис. 4.7

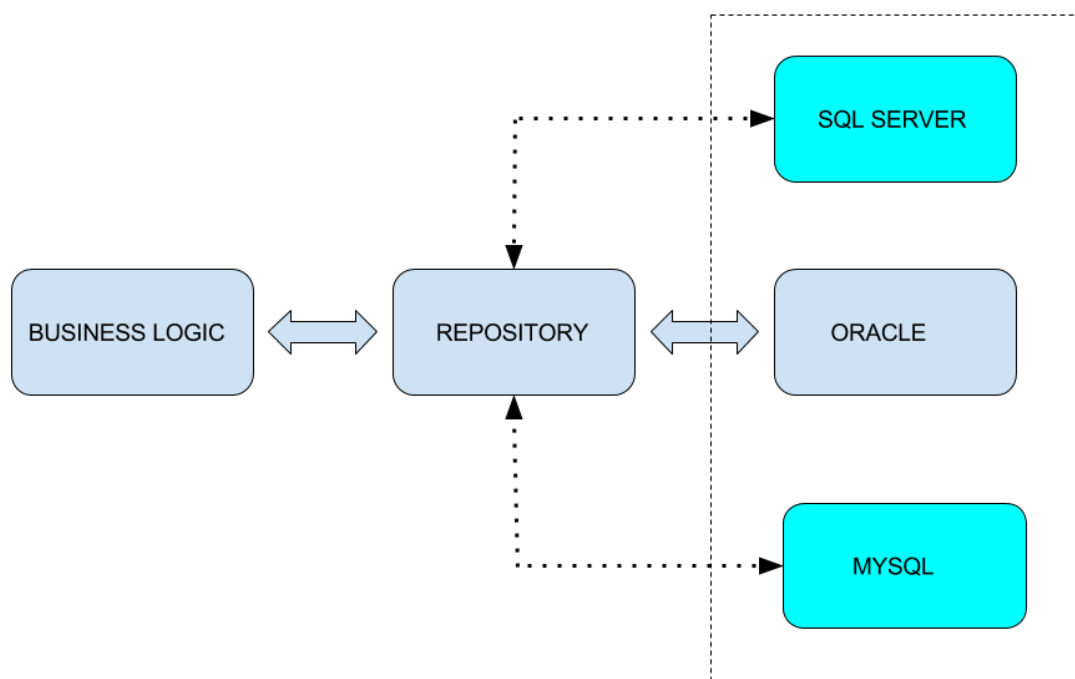


Рисунок 4.7 – Структура паттерна «репозиторій»

Результатом моделювання розділу 2 є DFD діаграма зображена на рис. 4.8. Вона містить основні потоки даних і сховища даних системи, серед вхідних даної моделі: – «Критерії якості», «Дані про узагальнені змінні» та «Дані про конфігураційний простір». Крім того, безпосередньо впливає на процес синтезу «Експерт», який є особою, яка приймає рішення. Знання експертів використовують для формування бази даних «ConfigurationRepository». У розділі 2 було запропоновано базові об'єкти, які зберігаються у БД «BaseObjects». Результат перетворювань системи об'єктів

можна зберегти у сховищі БД «ConfigurationRepository» або використати для повторного розрахунку задачі.

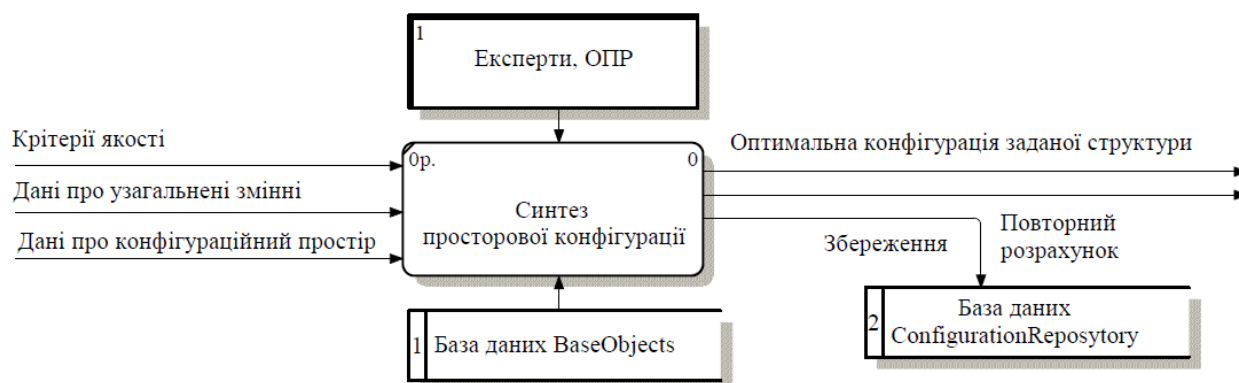


Рисунок 4.8 – DFD діаграма «Синтез конфігурацій»

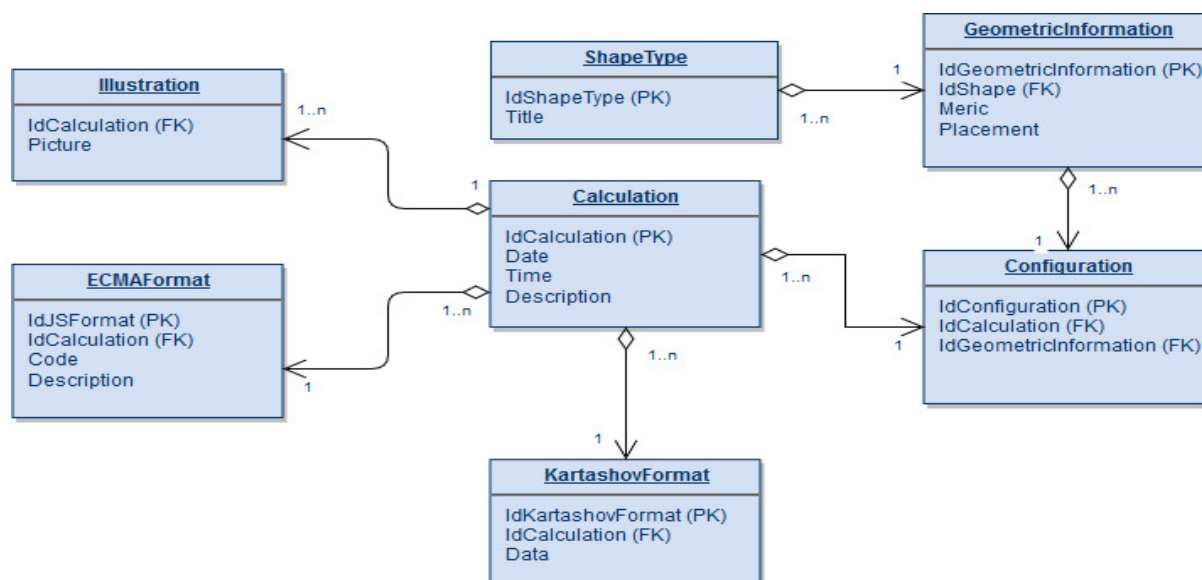


Рисунок 4.9 – Логічне представлення предметної області

Наступним кроком є створення логічної моделі. Ця модель має 7 сутностей, які зображені див. рис. 4.9. Розроблена ER діаграма – нормалізована.

Архітектура інструментального засобу для консолідації даних просторових об'єктів представлена на рис. 4.10.

Бази даних заповнюються експертами, які приймають участь у формуванні бази просторових конфігурацій.

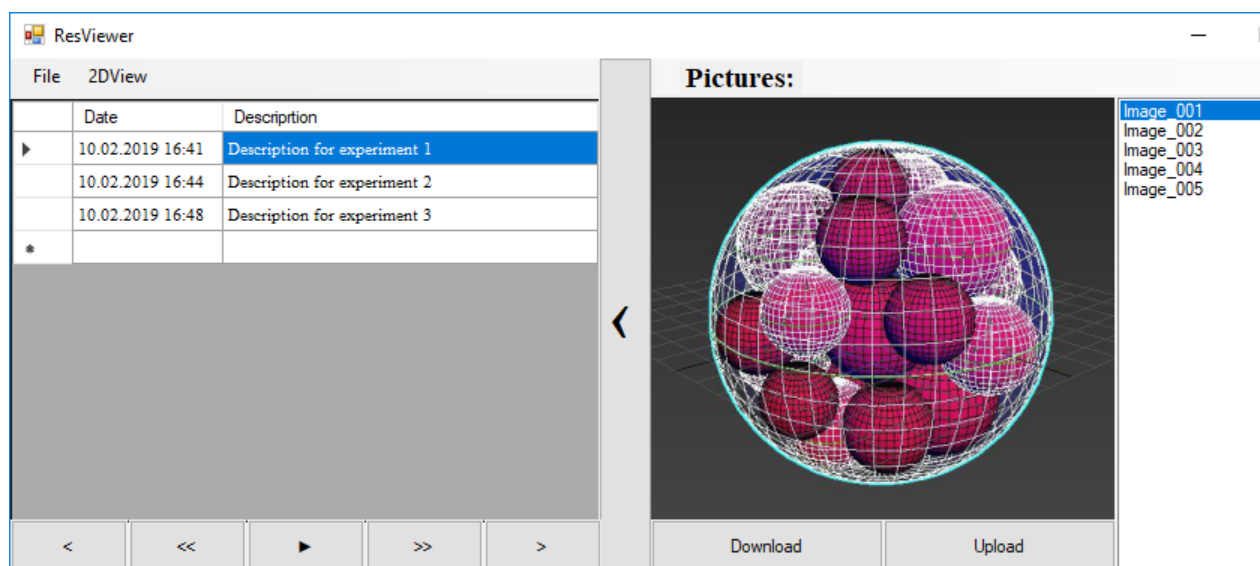


Рисунок 4.10 – Програмний додаток «Консолідоване сховище»

4.4 Модуль «Візуалізація»

Результатами роботи програмних додатків є розрахунки у вигляді множин чисел. Для відображення цих результатів у програмному комплексі запропоновано два варіанта. Перший для візуалізації двомірних конфігурацій. Другий для 3-х вимірного – програмне забезпечення компанії Autodesk 3ds MAX, яке надано по безкоштовній ліцензії, яка використовується в якості допоміжного інструменту для графічних візуалізацій складних об'єктів.

Після вимкнення користувач може відкрити програму – солвер, а може – візуалізатор. Після чого доцільно зробити запис початкової точки і матриці зв'язків в текстовий файл для початкового представлення даних на екрані. Після такого запису, користувач отримує повідомлення про завантаження наборів даних в солвер.

Далі відбувається відображення просторових характеристик кожного об'єкта (кулі) на екран з подальшим записом їх в текстовий файл. Потім користувачу можна зробити вибір: або подати інші дані на вхід ІрОрт повторно, або зробити візуалізацію записаних значень у 3Ds MAX. При виборі візуалізації користувач за допомогою програм – скриптів, написаних на

вбудованій мові 3ds MAX Scripts, які виконуються в середовищі внутрішнього інтерпретатора коду Listener, виробляє по рядках код кінця скрипта та візуалізує об'єкт. Цей крок дозволяє автоматизувати роботу по введенню параметрів кожної з куль.

При знаходженні помилки виконання користувачеві буде показано повідомлення в консолі інтерпретатора з номером рядка, який викликав помилку, інформацією про характер проблеми і щодо виконання подальшого коду програми. Помилки приведуть до часткового виконання скриптового коду, у разі коли програма-скрипт успішно виконується, на екрані поточної сцени буде показано бажаний результат.

Після побаченого отриманого рішення користувач має право вибору: завершити роботу, зробити запис даних в новий файл або змінити розташування куль і перезаписати їх зі зміненими параметрами для подальших обчислень.

Після закінчення роботи користувач проводить закриття всіх програм і файлів для звільнення виділеної оперативної пам'яті ЕОМ.

При передачі даних з класу в клас програма повинна компонувати дані і не створювати екземплярів класів без потреби на те. На цей випадок передбачена наявність двох класів Input і OutPut. Ці класи статичні і не потребують створення екземплярів класу для звернення до описаних методів, що спрощує схему введення або виведення даних в потік. Детальну декомпозицію внутрішніх членів зробимо нижче.

Клас Program.cs включає ще кілька статичних методів для зручності взаємодії з програмним продуктом: Density – метод для перевірки повноти процентного заповнення зовнішньої кулі внутрішніми об'єктами, CalculateWeightAndSetObjectType – метод відповідає за розрахунок ваги кожної з куль і вказівки типу об'єкта компонування, XYZFixR – метод формує сукупний масив складений з (X, Y, Z, R) координат, RunTask – метод приймає на вхід необхідні дані і запускає екземпляр класу Ipropt.cs. Після запуску додатку буде створено екземпляр головного класу.

Для реалізації методів, які описано у 3 розділі створено два статичних класи Input і OutPut. Їх призначення введення і виведення даних в потік. Потік може бути як файловим, так і для відображення на екран консолі.

Клас Input позначений як статичний. Він включає в себе тільки статичні методи та поля, це дозволяє їх використовувати без створювання екземпляра класу. Поля цього класу відповідно концепції інкапсуляції – закриті, а звертання здійснюється через оператор доступу.

Розглянувши дані класи детальніше, чітко бачимо методи, що відповідають за запис в файл, метод генерування даних в зазначеному діапазоні, метод, що здійснює формування звіту роботи, метод виміру часу роботи програми і безліч інших.

4.5 Застосування моделей та методів ІТ на прикладі упакування сферичних об'єктів

Наведемо приклад застосування запропонованої технології. Відповідно алгоритму роботи описаному у розділі 2, для початку роботи першої складової програмного комплексу необхідно обрати тип задачі та задати вихідні дані.

Розглянемо задачу упакування сферичних об'єктів у сферу з мінімальним радіусом. Виберемо для рішення поставленої задачі метод змінних радіусів, який описано у розділі 3. Програмна взаємодія користувача та програми-солвера певної проблеми не різняться одна від одної, тому було прийнято рішення на прикладі роботи з одним виконуваним проектом продемонструвати всі етапи та особливості.

Вибір засобів впливає на подальшу роботу ЕОМ, яка виконується відповідно до алгоритму (див. рис. 4.2). Початкова конфігурація зображена на рис. 4.11, зауважимо, що початкова конфігурація не є оптимальною, деякі об'єкти перетинаються, а деякі знаходяться на значній відстані один від одного.

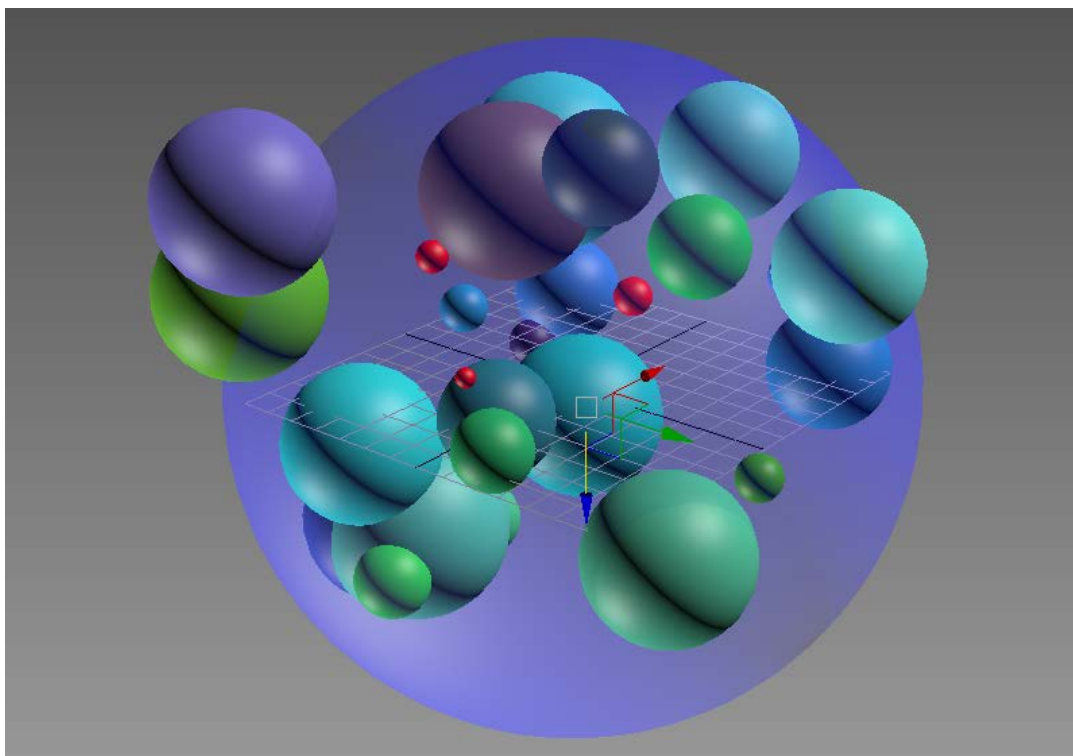


Рисунок 4.11 – Показ початкової точки

Для автоматизації процесу відображення розроблені скрипти, які виконують перетворення вихідної інформації про об'єкти та відображають у 3Ds Max.

Процес обчислення завершується відображенням параметрів отриманого рішення (рис. 4.12) та має змогу за допомогою скрипта запустити процес відображення у графічній складовій.

```

C:\> Выбрать C:\Windows\system32\cmd.exe
Number of inequality constraint evaluations           = 241
Number of equality constraint Jacobian evaluations  = 0
Number of inequality constraint Jacobian evaluations = 229
Number of Lagrangian Hessian evaluations           = 0
Total CPU secs in IPOPT (w/o function evaluations) = 16.581
Total CPU secs in NLP function evaluations         = 0.266

EXIT: Optimal Solution Found.

Optimization return status: Solve_Succeeded
RunTime: 00:00:16.93

```

Рисунок 4.12 – Інформаційні параметри отриманого рішення

Додаткові значення параметрів записуються у текстовий файл та відповідна інформація відображається на екрані (рис. 4.13)

```

C:\Windows\system32\cmd.exe
R_External = 79,9734857992384

Quality of solution = 0,4574976999762All Data has been written to D:\IterationFixedRadius.txt
All Data has been written to D:\CoordinateWithHoles.txt

Выполнение всей задачи RunTime: 00:00:17.31
Quality of solution = 0,4574976999762
===== Press <RETURN> to exit... =====

```

Рисунок 4.13 – Кінцевий результат пошуку локального рішення

Наступним кроком є візуалізація отриманого рішення (рис. 4.14 а) за допомогою відповідного скрипта у середовищі 3Ds Max.

ОПР може на свій розсуд змінити це локально-оптимальне рішення та отримати іншу просторову конфігурацію, яка буде вихідною для нового розрахунку (рис. 4.14, б).

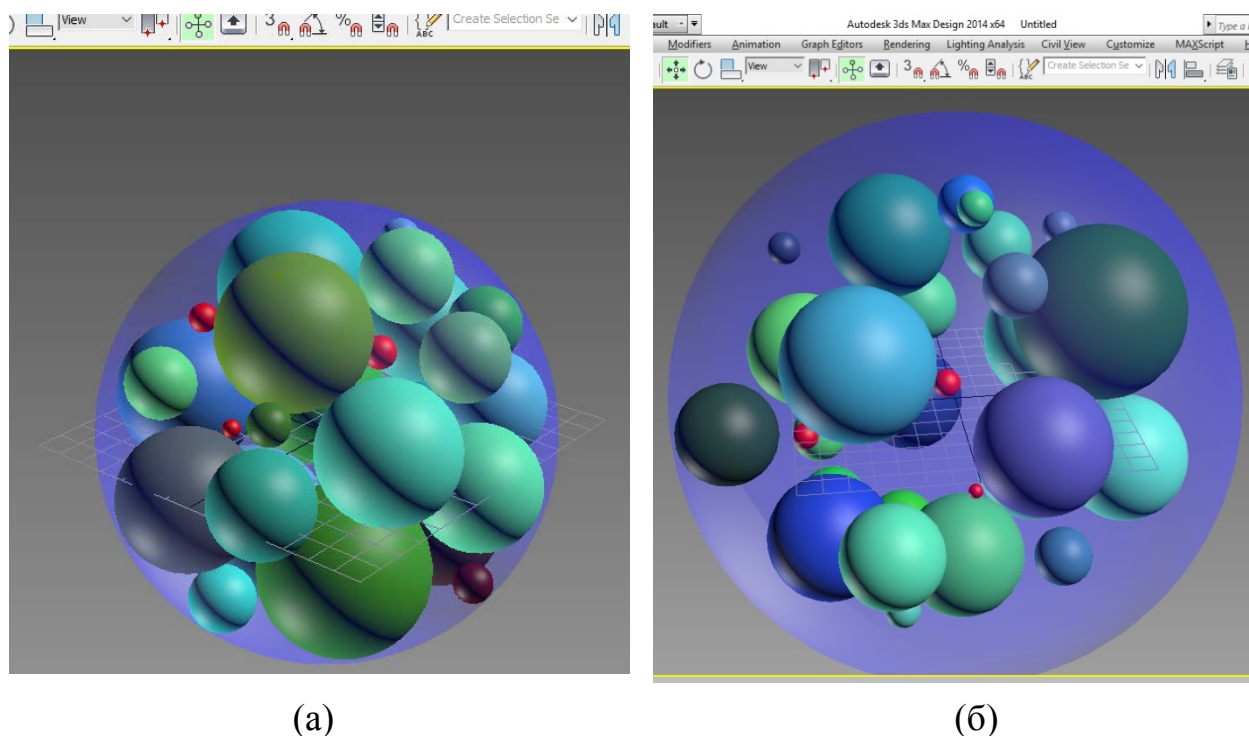


Рисунок 4.14 – Локально-оптимальне рішення (ліворуч) та його модифікація ОПР (праворуч)

Застосовуючи скрипт експорту просторової конфігурації сформуємо нові вихідні данні та запусимо Global-солвер для пошуку локально-оптимального рішення. Результат роботи зображений на рис. 4.15.

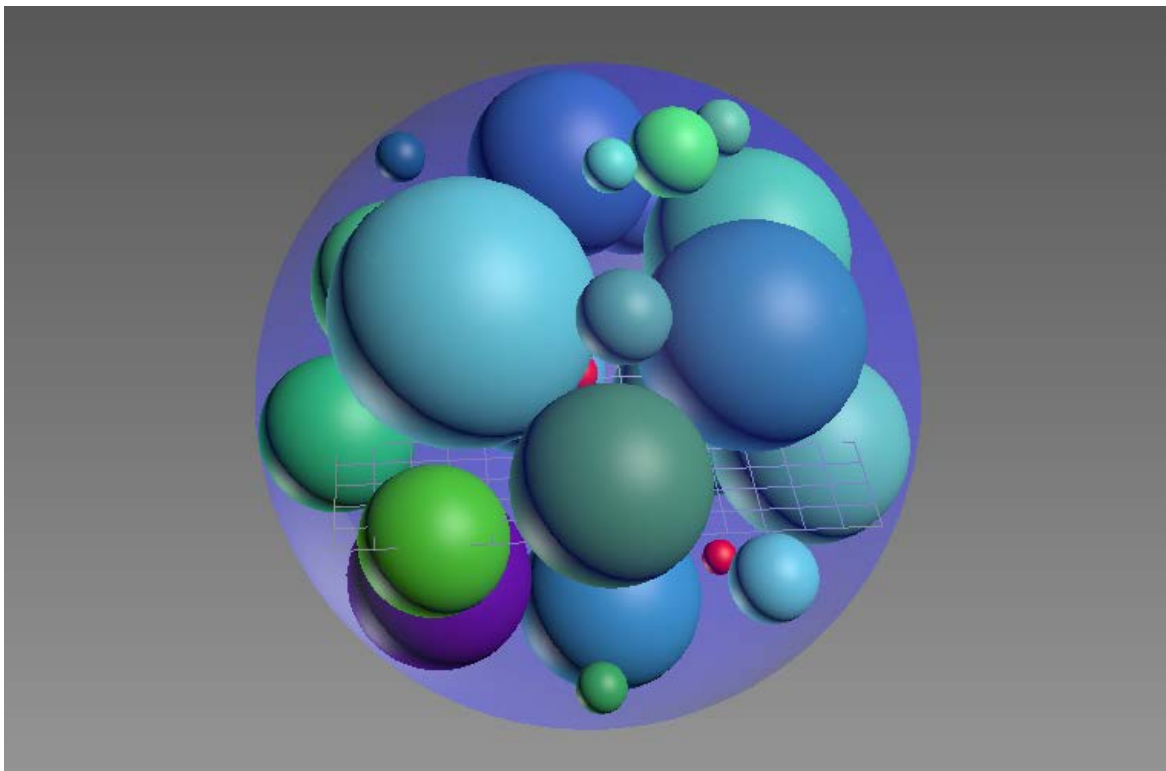


Рисунок 4.15 – Перевірка якості нового рішення

Результати обчислень як загальні, так і покрокові зберігаються у текстових файлах, таким чином можна повернутися до будь-якого кроку обчислення. Якщо рішення просторової конфігурації влаштовує ОПР, то просторову конфігурацію можна зберегти у репозиторії, а саме:

- графічні матеріали;
- файли з вихідними даними.

У репозиторії автоматично зберігається дата розрахунків, а якщо є потреба можна додати додаткову інформацію про виконані розрахунки.

4.6 Застосування просторових об'єктів у математичному моделюванні екологічних процесів

Розроблені моделі у другому розділі впроваджені у програмний додаток «Fire». На даний програмний продукт оформлене авторське свідоцтво [236]. Основою програмного додатку є моделі і методи процесів, які виникають під час моделювання екологічних процесів.

Обчислювальний експеримент грає важливу роль при вирішенні проблем екології атмосфери через відносно низьку собівартість однієї порівняно з фізичним експериментом промоделювати найнеймовірніші сценарії розвитку аварійних ситуацій і використовувати ЕОМ для прогнозування екологічних процесів в часі і просторі. Обчислювальний експеримент включає в себе серію розрахунків з використанням програмних засобів, які реалізують математичну модель розглянутого фізичного явища. Тому побудова математичної моделі адекватної до реального фізичного процесу, який протікає в атмосфері, відіграє вирішальну роль.

Математичне моделювання екологічних процесів включає в себе декілька основних етапів:

- побудова фізичної моделі екологічного процесу;
- розробка математичної моделі явища і формулювання постановки задачі;
- вибір методу вирішення поставленого завдання;
- розробка алгоритму розрахунку;
- реалізація математичної моделі у вигляді комп'ютерних засобів;
- верифікація математичної моделі на основі наявних експериментальних даних або результатів, отриманих з використанням інших математичних моделей;
- проведення серії розрахунків шляхом обчислювального експерименту.

В рамках розглянутої задачі залучені розроблені моделі у дисертації. Серед питань математичного моделювання газодинамічних процесів в промисловій аеродинаміці і екології атмосфери можна виділити наступні:

- випаровування скрапленого газу після протоки з ємності зберігання;
- миттєвий викид газової домішки в атмосферу, дифузійне змішання з повітрям і поширення суміші в просторі;
- вибух газоподібних домішок в атмосферу з урахуванням хімічної взаємодії;
- розсіювання газоповітряної суміші в багатозв'язній області;
- витікання газових домішок в атмосферу (аварійний витік з промислового обладнання);
- рух холодоагенту в робочій області морозильної камери;
- рух теплоносія в робочій області печі випалу;
- поширення домішок в приміщенні з вентиляцією.

Прикладом моделювання є застосування математичної моделі розсіювання в атмосфері газоподібних домішок, які утворилися в результаті випаровування зрідженого газу (пролитого при миттєвому руйнуванні ємності зберігання), для інженерного аналізу наслідків аварії [228, 229].

Для моделювання цього процесу застосовується модель просторових об'єктів, яка описана у другому розділі та задаються параметри конфігурації. Алгоритм роботи наступний:

- 1) запустіть на виконання розрахункову середу «Fire»;
- 2) підготуйте вихідні дані для розрахунку;
- 3) на діалоговій панелі «Сценарій розрахунку» виберіть варіант розрахунку «Випаровування протоки» з переліку можливих сценаріїв таких як:

- розсіювання хмари домішок у результаті миттєвого викиду;
- випаровування зрідженого газу з плями протоки;
- витікання струменя домішок у відкритий простір;
- вибух газо-повітряної суміші з урахуванням хімічної реакції;

- фізичний вибух стисненого газу;
 - вентиляція приміщення, забрудненого шкідливою домішкою;
 - тепломасообмін при термообробці.
- 4) Задайте назву розрахунку і геометричні параметри розрахункової області.
- 5) Введіть параметри потоку на вході до розрахункової області:
- висота точки виміру;
 - градієнт температури;
 - статична температура;
 - статичний тиск;
 - повна швидкість;
 - окружний кут;
 - шершавість поверхні;
 - молярна маса повітря;
 - коефіцієнт адіабати повітря;
 - статичний тиск в точці виміру.
- 6) Задайте початкові параметри домішки рис. 4.16.

Ці параметри характеризують термодинамічний стан газу-домішки, який випаровується з поверхні плями протоки. Передбачається, що температура газу домішки близька до температури кипіння проливої рідини при заданому атмосферному тиску. Масова концентрація домішки на межі випаровування дорівнює одиниці.

7) Визначте тимчасові параметри розрахунку.

Для виконання розрахунків необхідно задати умови протікання на границях у обчислювальній області та наявність твердих тіл у ній. Це виконується на вкладці «Границя» панелі «Сторінка власності». Непроникна є нижня поверхня простору. Суцільні тіла задають діапазони номерів комірок (L, M, N), які відповідають відповідним осям (Z, Y, X).

Задайте дані для плями проливу зрідженого газу, з поверхні якого відбувається випарювання: діапазон номерів комірок (L, M, N) відповідає відповідним осям (Z, Y, X), сумарні витрати випарювання та орієнтацією границі за відповідними осями координат. Це задається на вкладці «Пролив» панелі «Сторінка властивостей». Сумарний викид G_{Σ} визначається відповідно до:

- швидкості випарювання газоподібної фази з поверхні проливу;
- загальної маси рідини яка пролита;
- температури рідини, яка пролита T_2 , значення якої має співпадати із зазначеною температурою на вкладці.

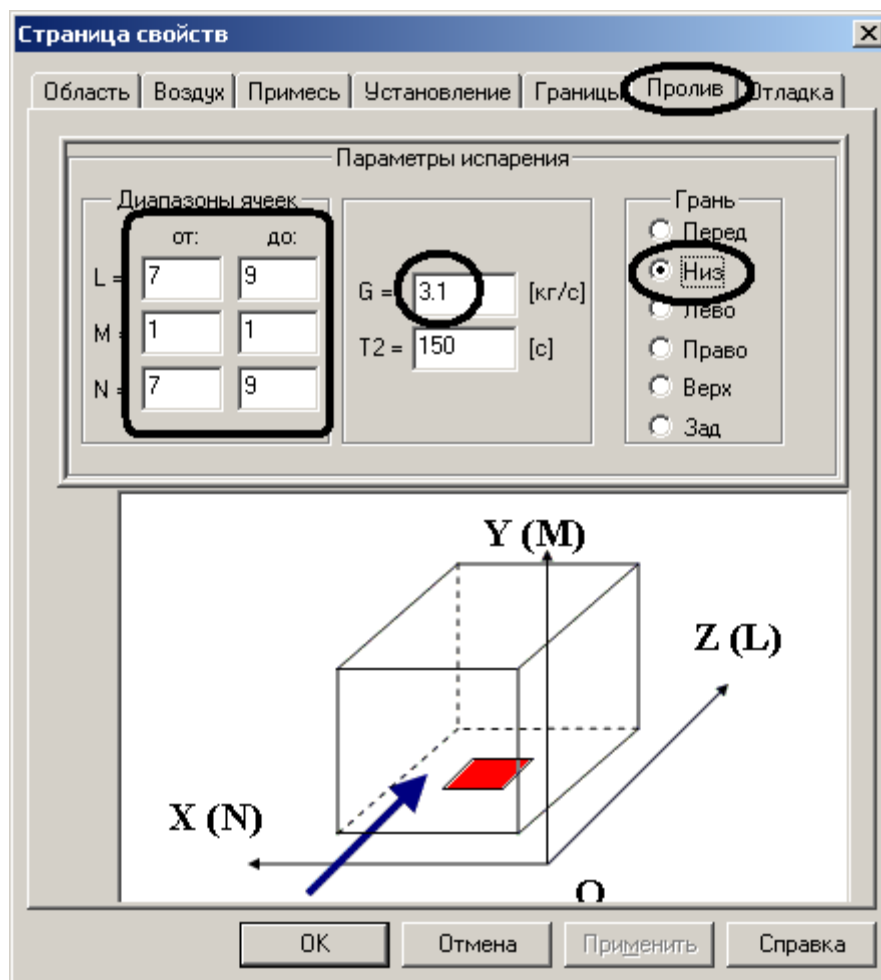


Рисунок 4.16 – Панель «Сторінка властивостей», вкладка «Пролив»

Наступними кроками є ініціювання параметрів розрахунків (кнопка I) та запуск на виконання (кнопка G, розрахунок геометричних параметрів), форма з наведеними кнопками зображена на рис. 4.17.

Виконайте запуск розрахунку за часом процесу випарювання газу-домішки з поверхні плями протоки (кнопка «Старт» немодального діалогової панелі «Потік»). Панель дозволяє контролювати розрахунок за часом. У разі необхідності розрахунок можна перервати кнопкою «Фініш». Крім того, кнопка «Show» відображає останній варіант розрахунків.

Оскільки панель «Поток» є немодальною, то можна паралельно візуалізувати потік (кнопка «V») (рис. 4.17).

У результаті обчислень з'являється модальна діалогова панель "Параметры визуализации". Ця форма налаштовує тип малюнку (група "Тип"), параметр яки виводиться (група "Параметр"), площину (група "Плоскость"), уздовж якої виводиться малюнок, і номер комірки по осі, перпендикулярно якої ця площина проводиться ("Номер ячейки"). У групі "Экстремумы функции" можна змінити крайові значення параметрів, в яких виводиться малюнок.

Після завершення розрахунку видаліть панель "Поток" (кнопка "Финиш") (рис. 4.17).

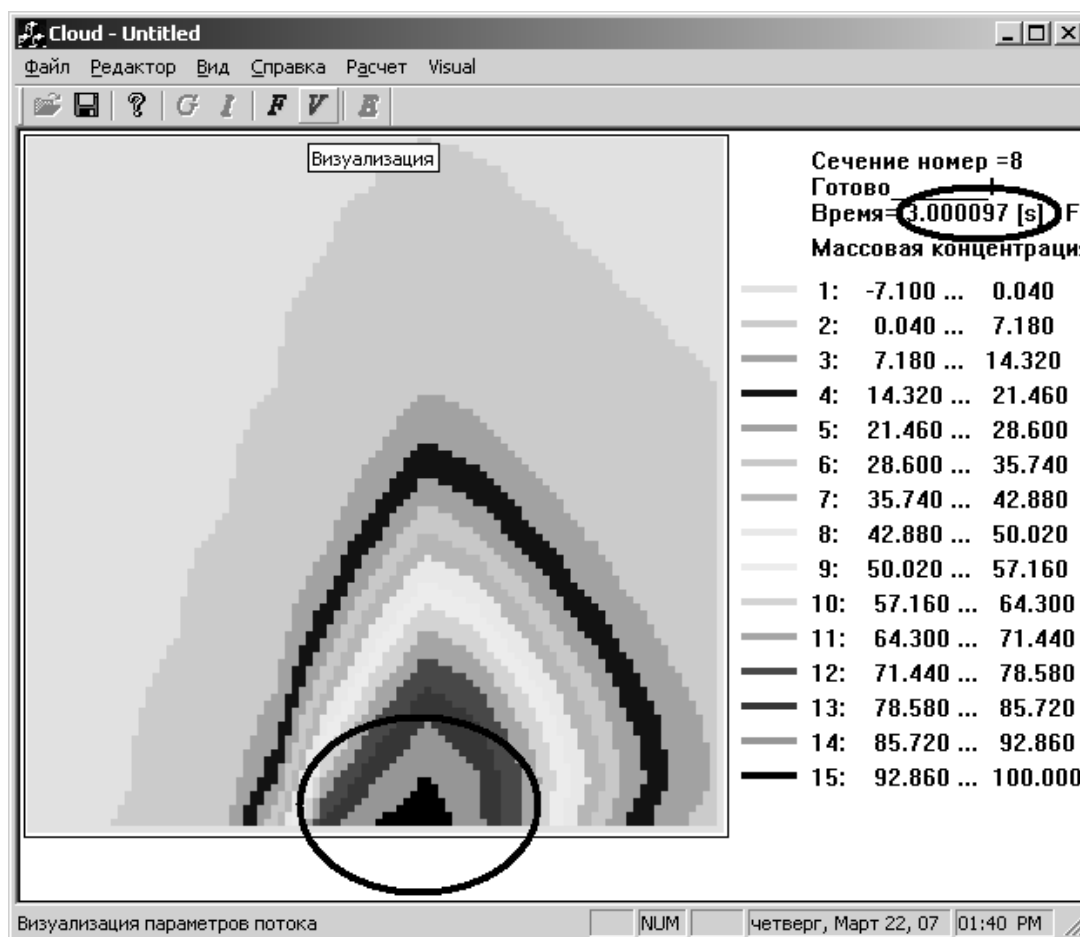


Рисунок 4.17 – Результат процесу розрахунків (збоку)

Програмний додаток виводить розподіл масової концентрації домішки в площині, перпендикулярній поверхні землі (YOZ) посередині розрахункової

області (див. рис. 4.17). Інший приклад роботи програмного додатку, у якому виводиться розподіл масової концентрації домішки в площині у землі (рис. 4.18).

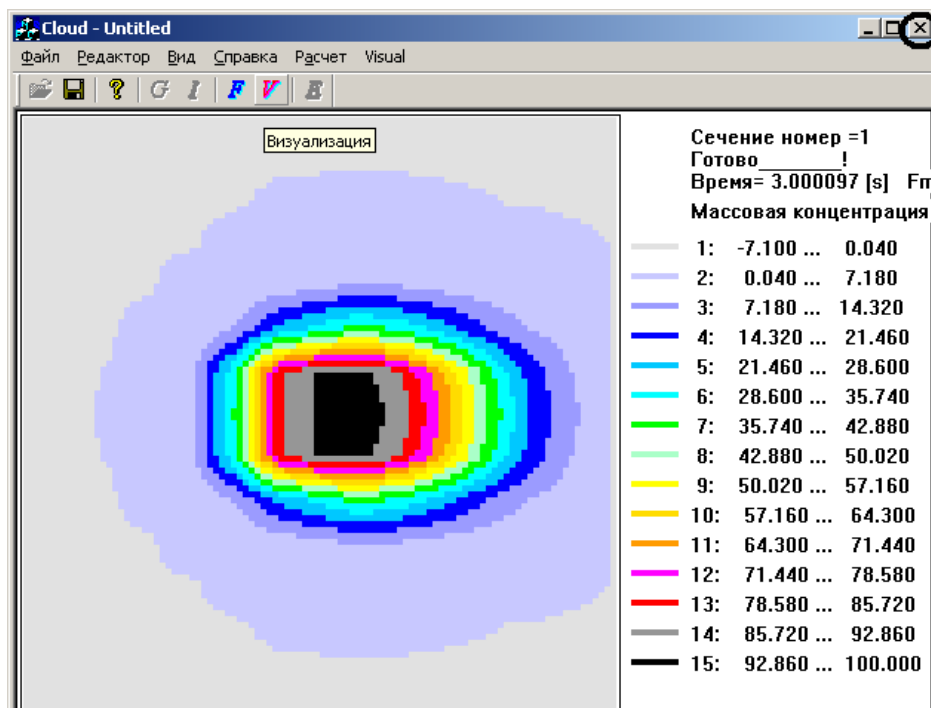


Рис. 4.18 – Результат процесу розрахунків (зверху)

Програма «Fire» дозволяє моделювати розповсюдження газоподібних сумішей. Результати розрахунків зберігаються у текстовому файлі "finish_M.out". Також можливо визначити довжину області, займаної сумішшю з концентрацією домішки в діапазоні через час та аналізувати результати розрахунку. У наведеному прикладі було виявлено, довжина зони складала приблизно 8 м.

4.7 Висновки по розділу

Розроблено інформаційну технологію динамічного перетворення структури даних геометричної інформації в процесі синтезу просторових конфігурацій складних об'єктів. На її базі розроблений програмний комплекс, який включає в себе: програмний додаток для реалізації методів оптимізації просторових конфігурацій, програму-репозиторій – консолідоване сховище

для зберігання інформації про процес рішення задач; програмні додатки для візуалізації отриманих рішень.

Розроблено програмний додаток GeneralSolver, який використовує бібліотеку солверу IpOpt для розв'язання задач оптимізації, які виникають. GeneralSolver забезпечує динамічне перетворення структури даних геометричної інформації у процесі синтезу просторових конфігурацій складних об'єктів. У межах узагальненої діаграми IDEF0 будується оптимальні просторові конфігурації для різних сценаріїв – в автоматичному режимі та за участю ОНР.

Розроблено програмний додаток для збереження результатів обчислень, який містить повну інформацію про просторові конфігурації базових об'єктів, значення узагальнених змінних конфігураційного простору та інформацію про математичну постановку задачі (критерії якості, обмеження). Для роботи зі сховищем даних розроблена БД та використана СКБД MS SQL. При виконанні розрахунків здійснюється систематизація та збереження одержаних результатів з допомогою консолідованого сховища даних геометричної інформації. Для інтеграції розробленої БД з відповідним програмним додатком впроваджено модель ORM, яка інтегрує Entity Framework й LINQ.

Запропоновано засоби візуалізації 2D та 3D конфігурацій. Для 2D візуалізації розроблений спеціальний програмний додаток, а для 3D візуалізації обрано графічний пакет 3Ds Max Studio.

Описано впровадження програмного зазначеного програмного комплексу для розв'язання задач синтезу оптимальних конфігурацій сферичних об'єктів. Наведено результати чисельних розрахунків, які на 5-10% перевищують відомі рішення.

Розглянуто моделі розповсюдження газової суміші в областях складної форми. Зазначені моделі впроваджені у програмний додаток «Fire».

Наукові результати, наведені в даному розділі, опубліковані в роботах [185, 201-206, 228, 236], а список джерел, які використано наведено у повному переліку використаних джерел [4, 11–14, 31, 172–184].

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальне науково-практичне завдання – розроблення моделей, методів та інформаційної технології компоновочного синтезу складних систем з урахуванням просторової форми об'єктів. Проведені дослідження дають змогу зробити такі висновки:

1. На основі аналізу практичних задач, що виникають в різних галузях виробництва (аерокосмічній, логістичній, енергетичній тощо), виділено клас задач компоновочного синтезу технічних систем, що потребують урахування просторової форми об'єктів, особливостей їх розташування та метричних характеристик. Здійснено класифікацію моделей просторових конфігурацій відповідно до аналітичного опису геометричних об'єктів, формалізації умов на їх взаємне розташування та критеріїв якості розв'язків.

2. Удосконалено модель просторової конфігурації базових об'єктів з урахуванням структури даних усіх компонентів геометричної інформації. Створено об'єктно-орієнтовану модель класів предметної області задач оброблення, перетворення й адаптації даних у системах компоновки об'єктів довільної форми, що дозволяє формувати й обробляти інформацію про просторові об'єкти будь-якого рівня складності.

3. Розроблено інформаційно-аналітичну модель синтезу оптимальних просторових конфігурацій, що інтегрує аналітичну складову, пов'язану з побудовою математичної моделі задачі, та інформаційну складову, пов'язану з формуванням структури даних просторових об'єктів і консолідованого сховища даних просторових конфігурацій.

4. Розроблено метод перетворення й адаптації даних, що дозволяє використовувати інфраструктуру COIN-OR для формування допустимих локально-оптимальних конфігурацій. На відміну від існуючих аналогів цей метод дає змогу інтегрувати об'єктно-орієнтовану модель вихідної задачі з NLP-солверами інфраструктури COIN-OR. При цьому враховується динаміка процесу синтезу оптимальних просторових конфігурацій.

5. Набув подальшого розвитку метод синтезу конфігурацій просторових об'єктів із залученням ОПР, який на відміну від існуючих забезпечує консолідацію структур даних які отримані в процесі оптимізації та при візуалізації проміжних та остаточних розв'язків.

6. Розроблено інформаційну технологію динамічного перетворення структури даних геометричної інформації в процесі синтезу просторових конфігурацій складних об'єктів та описані її базові принципи.

7. Досліджено властивості моделей та розроблено спеціальні методи синтезу просторових конфігурацій для класу сферичних об'єктів.

8. За для оптимізації пошуку розв'язків у задачах компоновочного синтезу конфігурацій сферичних об'єктів розроблено метод змінного радіуса, що є модифікацією методу штучного розширення простору. Побудовано еквівалентну модель задачі, у якій метричні параметри об'єктів є змінними, що дає змогу долати зони тяжіння локальних екстремумів у процесі оптимізації.

9. Запропоновано генетичний алгоритм розв'язку задач оптимізації на евклідових комбінаторних конфігураціях. Розглянуто особливості реалізації генетичних алгоритмів для розв'язання задач зазначеного класу, формалізовано й обґрунтовано вибір операторів кросовера і мутації. Розв'язано практична задача балансування дискретно розподілених мас, результати якої порівнювався із відомими.

10. Розроблено комплекс програмних додатків, що реалізують запропоновані моделі та методи інформаційної технології компоновочного синтезу просторових об'єктів. При цьому на відміну від існуючих враховується можливість змінних метричних параметрів (розмірів) об'єктів просторової конфігурації.

11. Моделі та методи інформаційної технології синтезу просторових об'єктів тестовано на модельних задачах компоновки циліндричних і сферичних об'єктів, результати порівнювались із відомими та підтвердили підвищення якості рішень за значеннями обраних критеріїв оптимізації

(мінімізація об'єму, небалансу системи, довжини мережі) на 3-5% в залежності від вихідних даних.

12. Результати роботи впроваджено, апробовано й застосовано на ДНВП «Об'єднання Комунар», використано в НДР і навчальному процесі Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», що підтверджено відповідними актами впровадження.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Стоян Ю. Г. Размещения геометрических объектов / Ю. Г. Стоян. – Киев : Наук. думка, 1975. – 239 с.
2. Stoyan Y. Mathematical methods for geometric design / Y. G. Stoyan // *Advances in CAD/CAM. Proceedings of the 5th International IFIP/IFAC Conference on Programming Research and Operations Logistics in Advanced Manufacturing Technology.* – Leningrad, USSR, May 1982. P. 67–86.
3. Стоян Ю. Г. Методы и алгоритмы размещения плоских геометрических объектов / Ю. Г. Стоян, Н. И. Гиль. – Киев : Наук. думка, 1976. – 247 с.
4. Стоян Ю. Г. Математические модели и оптимизационные методы геометрического проектирования / Ю. Г. Стоян, С. В. Яковлев. – Киев : Наук. думка. – 1986. – 268 с.
5. Стоян Ю. Г. Автоматизация проектирования компоновки оборудования летательных аппаратов / Ю. Г. Стоян, Е. Н. Кулиш. – Москва : Машиностроение, 1984. – 191 с.
6. Стоян Ю. Г. Размещение источников физических полей / Ю. Г. Стоян, В. П. Путятин. – Киев : Наук. думка, 1981. – 184 с.
7. Яковлев С. В. Элементы теории геометрического проектирования / С. В. Яковлев, Н. И. Гиль, В. М. Комяк // Под ред. В. Л. Рвачева. – Киев : Наук. думка, 1995. – 241 с.
8. Grebennik I. The Concept of a Regional Information-Analytical System for Emergency Situations / I. Grebennik, O. Khriapkin, A. Ovezgeldyyev, V. Pisklakova, I. Urniaieva // *International Conference on Information Technology in Disaster Risk.* – Vol. 516. – Springer, Cham, 2019. – P. 55–66.
9. Гребенник И. В. Принятие решений в информационных системах решения задач геометрического проектирования / И. В. Гребенник, Т. Е. Романова, С. Б. Шеховцов // *Бионика интеллекта.* – 2008. – №1 (68). – С. 79–83.

10. Гребенник И. В. Модели синтеза структур систем контроля в распределенных системах / И. В. Гребенник, С. В. Кузьменко // Вестник Херсонского национального технического университета. – Херсон, 2005. – № 1(21). – С. 340–345.
11. Гребенник И. В. Комбинаторные конфигурации в оптимизационных задачах балансной компоновки / И. В. Гребенник, А. А. Коваленко, Т. Е. Романова, И. А. Урняева, С. Б. Шеховцов // Кибернетика и системный анализ. – 2018. – Т. 54, № 2. – С. 55–67.
12. Kovalenko A. A. Balance Layout Problem for 3D-Objects: Mathematical Model and Solution Methods / A. A. Kovalenko, T. E. Romanova, P. I. Stetsyuk // Cybernetics and Systems Analysis. – 2015. Vol. 51, N 4. – P. 556–565.
13. Stoyan Yu. Balance Layout Problems: Mathematical Modeling and Nonlinear Optimization / Yu. Stoyan, T. Romanova, A. Pankratov, A. Kovalenko, P. Stetsyuk // Space Engineering. Modeling and Optimization with Case Studies. G. Fasano and J.Pintér (Eds.). Springer, New York. – 2016. Vol. 114, P. 369–400.
14. Киселева Е. М. Модели и методы решения непрерывных задач оптимального разбиения множеств: линейные, нелинейные и динамические задачи / Е. М. Киселева, Л. С. Коряшкина. – Киев : Наук. думка. – 2013. – 604 с.
15. Стоян Ю. Г. Построение начальных точек и поиск локальных экстремумов задачи компоновки 3D объектов в цилиндрической области / Ю. Г. Стоян, В. В. Сёмкин, А. М. Чугай // Докл. НАН Украины. – 2013, № 12, С. 52–58.
16. Стоян Ю. Г. Оптимизация компоновки трёхмерных объектов в многосвязной области с учётом кратчайших расстояний / Ю. Г. Стоян, В. В. Сёмкин, А. М. Чугай // Кибернетика и системный анализ. – 2014, № 3, С. 58–70.
17. Stoyan Yu. Mathematical Modeling of Interaction of Primary Geometric 3D Objects / Yu. Stoyan, G. Scheithauer, T. Romanova // Cybernetics and system analysis. – 2005. Vol. 41. № 3. P. 332–342.

18. Stoyan Yu. Mathematical Models of Placement Optimization: Two- and Three-Dimensional Problems and Applications / Yu. Stoyan, T. Romanova // Modeling and Optimization in Space Engineering, G. Fasano and J. Pintér (eds.). – Springer, New York, 2013. Vol. 73. – P. 363–388.
19. Bennell J. Tools of mathematical modelling of arbitrary object packing problems / J. Bennell, G. Scheithauer, Yu. Stoyan, T. Romanova // Annals of Operations Research. Springer, Netherlands, 2010. Vol. 179. № 1. – P. 343–368.
20. Stoyan Yu. Packing unequal circles into a strip of minimal length with a jump algorithm / Yu. Stoyan, G. Yaskov // Optimization Letters. – 2014. – Vol.8(3) – P. 949–970.
21. Stoyan Yu. Packing of Various Solid Spheres into a Parallelepiped / Yu. Stoyan, G. Yaskov, G. Scheithauer // Central European Journal of Operational Research. – 2003. – Vol. 11(4) – P. 389–407.
22. Stoyan Y. G. The configuration space of geometric objects / Y. G. Stoyan, S. V. Yakovlev // Cybernetics and Systems Analysis, Vol. 54, no. 5 2018. – P. 715–722.
23. Yakovlev S. V. The method of artificial space dilation in problems of optimal packing of geometric objects / S. V. Yakovlev // Cybernetics and Systems Analysis. – 2017. – Vol. 53(5). – P. 725–732.
24. Yakovlev S. V. On a class of problems on covering of a bounded set / S. V. Yakovlev // Acta Mathematica Hungarica. 1989. Vol. 53. №3. P. 253–262.
25. Shekhovtsov S. B. Formalization and solution of one class of covering problem in design of control and monitoring systems / S. B. Shekhovtsov, S. V. Yakovlev // Автоматика и телемеханика. – 1989. Vol. 50. № 5. – P. 705–710.
26. Komyak V. M. Obtaining local extremum in the problem of covering the fields by the circles of variable radii / V. M. Komyak, V. V. Komyak, A. V. Pankratov, A. Yu. Prikhodko // УСнМ. – 2016, №2, С. 22–27.
27. Komyak V. The problem of covering the fields by the circles in the task of optimization of observation points for ground video monitoring systems of forest

fires / V. Komyak, A. Pankratov, V. Patsuk, A. Prikhodko // *Econtechmod an International Quarterly Journal*. – 2016, vol.5, No.2, P. 133–138.

28. Данилин А. Н. Упаковка эллипсов в прямоугольник минимальных размеров / А. Н. Данилин, В. В. Комяк, В. М. Комяк, А. В. Панкратов // Киев: УСиМ. – 2016, №5. – С. 5–9.

29. Грицик В. В. Математичні методи оптимізації та інтелектуальні комп'ютерні технології моделювання складних процесів і систем з урахуванням просторових форм об'єктів / В. В. Грицик, А. І. Шевченко, О. М. Кісельова, С. В. Яковлев, П. І. Бідюк, М. І. Гіль, Ю. В. Крак, А. І. Куляс, Т. Є. Романова, П. І. Стецюк // Донецьк: ІІІ "Наука і освіта". – 2011. – 650 с.

30. Hulianytskyi L. Big Data in Information Analytical System "NEWSCAPE" / L. Hulianytskyi, S. Malyshko // In: *Data Stream Mining & Processing*. – Proc. IEEE First Int. Conf. on Data Stream Mining & Processing (23-27 August 2016, Lviv, Ukraine). – P. 382–386.

31. Hulianytskyi L. Formalization and Classification of Combinatorial Optimization Problems / L. Hulianytskyi, I. Riasna // Springer Optimization Methods and its Applications. – 2017. – 130. – P. 239–250.

32. Hulianytskyi L. Automatic Classification Method Based on a Fuzzy Similarity Relation / L. Hulianytskyi, I. Riasna // Cybernetics and Systems Analysis. – 2016. – 52, №1. – P. 30–37.

33. Zaslavsky V. Risk analyses and redundancy for protection of critical infrastructure / V. Zaslavsky, V. Ievgiienko // *Monographs of System Dependability*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wroclawskiej, Wroclaw, Poland. – 2010. – P. 161–173.

34. Заславський В. А. Інформаційна безпека та організація технічного захисту інформації у контексті євроатлантичної інтеграції / В. А. Заславський, А. В. Анісімов, О. М. Фаль // *Україна-НАТО*. – №4, 2007. – С. 20–27.

35. Доценко С. І. Теоретичне обґрунтування дидактичної багатовимірної технології моделювання знань / С. І. Доценко, В. І. Савенко //

Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. – 2017, №187. – С. 12–14.

36. Доценко С. І., Теоретичне обґрунтування ізоморфізму організаційної структури підприємства / С. І. Доценко, В. І. Савенко // Енергетика та комп'ютерно-інтегровані технології в АПК. – 2017, №1(6), С. 43–47.

37. Доценко С. І. Принцип цілісної організації інтелектуальних систем / С. І. Доценко // Журнал Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2019, №1(89). – С. 4–16.

38. Доценко С. І. Визначення шляхів розвитку інтелектуальних інформаційних технологій / С. І. Доценко // Інформаційні технології та інновації в економіці, управлінні проектами та програмами: монографія. – 2016. – С. 263–288.

39. Доценко С. І. Методологія цілісного підходу до дослідження інтелектуальних систем // Математичні моделі та новітні технології управління економічними та технічними системами: монографія. – 2018. – С. 292–207.

40. Згуровский М. З.. Анализ и управление большими космическими конструкциями. / М. З. Згуровский, П. И. Бидюк – Киев : Техніка, 1997. – 450 с.

41. Згуровский М. З., Труднорешаемые задачи комбинаторной оптимизации в планировании и принятии решений. / М. З. Згуровский, А. А. Павлов – Киев : Наук. думка, 2016. – 115 с.

42. Кривонос Ю. Г., Моделювання, аналіз і синтез маніпуляційних систем. / Ю. Г. Кривонос, Ю. В. Крак, М. Ф. Кириченко – Київ : Наукова думка, 2006. – 207 с.

43. Кривонос Ю. Г. Аналіз і синтез ситуацій в системах прийняття рішень. / Ю. Г. Кривонос, М. Ф. Кириченко, Ю. В. Крак, В. С. Донченко, А. І. Куляс – Київ : Наукова думка. – 2009. – 365 с.

44. Mashtalir V. P., Point-set methods of clusterization of standard information / V. P. Mashtalir, S. V. Yakovlev // *Cybernetics and Systems Analysis*. – 2001. – 37, №3. – P. 295–307.

45. Mashtalir V. P., Group structures on quotient sets in classification problems / V. P. Mashtalir, V. V. Shlyakhov, S. V. Yakovlev // *Cybernetics and Systems Analysis*. – 2014. – 50, №4. – P. 507–518.

46. Mashtalir S., Video shot boundary detection via sequential clustering / S. Mashtalir, V. Mashtalir, M. Stolbovyi // *International Journal of Information Theories and Applications*. – 24, № 1. – 2017. – P. 50–59.

47. Kobylin O. Video Clustering via Multidimensional Time-Series Analysis / O. Kobylin, S. Mashtalir, M. Stolbovyi // *Proceedings of the 9th International Conference on Information Management and Engineering*. – 2017. – Spain, Barcelona. – P. 60–63.

48. Mashtalir S. Detecting significant changes in image sequences / S. Mashtalir, O. Mikhnova // *Multimedia Forensics and Security*. Springer, Cham. – 2017. – P. 161–191.

49. Богучарский С. И. Иерархическая агломеративная кластеризация изображений в больших базах данных / С. И. Богучарский, А. Г. Каграманян, С. В. Машталир // *Системы обробки інформації*. – 2014. – №8. – С. 93–97.

50. Харченко В. С. Оценка и обеспечение качества программных средств космических систем: монография / В. С. Харченко, В. В. Скляр, Б. М. Конорев и др.; под ред. В. С. Харченко, Б. М. Конорева. – Харьков., 2007. – 244 с.

51. Инвариантно-ориентированная оценка качества программного обеспечения космических систем: монография / Б. М. Конорев, Ю. С. Манжос, В. С. Харченко, Ю. Г. Алексеев, В. В. Сергиенко, Г. Н. Чертков; под ред. Б. М. Конорева, В. С. Харченко. – Харьков., 2009. – 224 с.

52. Технологии высокой готовности для программно-технических комплексов космических систем: монография / В. С. Харченко,

О. Н. Одарущенко, Ю. Л. Поночовный и др.; под ред. В. С. Харченко, Б. М. Конорева. – Харьков., 2010. – 372 с.

53. Федорович О. Е, Разработка и эксплуатация качественного программного обеспечения в условиях киберпреступности / О. Е. Федорович, Ю. А. Лещенко // *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*, 2014. – С. 88–91

54. Федорович О. Е., Иванов М. В., Лещенко Ю. А. Анализ и минимизация узких мест в логистике управления жизненным циклом сложной техники / О. Е. Федорович, М. В. Иванов, Ю. А. Лещенко // *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*, 2014. С. 170–173

55. Bennell J. A., Optimal clustering of a pair of irregular objects / J. A. Bennell, G. Scheithauer, Y. Stoyan, T. Romanova, A. Pankratov // *Journal of Global Optimization*. – 2015. – № 61(3). – P. 497–524.

56. Bennell J. A. The geometry of packing problems: A tutorial. / J. A. Bennell, J. F. Oliveira / *Europ. Journal of Oper. Res* – 2008 – Vol. 184, Issue 2, P. 397–415

57. Bennell J. A. A tutorial in irregular shape packing problem / J. A. Bennell, J. F. Oliveira // *Europ. Journal of Oper. Res*. – 2008. – № 60. – P. 93–105.

58. Bennell J. Tools of mathematical modelling of arbitrary object packing problems / J. Bennell, G. Scheithauer, Y. G. Stoyan, T. Romanova // *Annals of Operations Research*. Springer, Netherlands, 2010. Vol. 179. № 1. P. 343–368.

59. Chao Che, Test problems for quasi-satellite packing: Cylinders packing with behavior constraints and all the optimal solutions known. / Chao Che, Yi-Shou Wang, Hong-fei Teng – 2008. – 11 P. URL: http://www.optimization-online.org/DB_HTML/2008/09/2093.html .

60. Li N. A study on the particle swarm optimization with mutation operator constrained layout optimization / N. Li, F. Liu, D. B. Sun // *Chinese J Comput*. – 2004. –49. № 27. – P. 897–903.

61. Lei K. Y. A study of constrained layout optimization using adaptive particle swarm optimizer / K. Y. Lei, Y. H. Qiu // *J Comput Research Develop.* – 2006. – № 43. – P. 1724–1731.
62. Fei T. A modified genetic algorithm and its application to layout optimization / T. Fei, H. F. Teng // *Journal of Software.* – 1999. – № 10. – P. 1096–1102.
63. Teng H. Layout optimization for dishes installed on a rotating table – the packing problem with equilibrium behavioral constraints / H. Teng, S. Sun, W. Ge, W. Zhong // *Science in China. Series A – Mathematics Physics Astronomy & Technological Sciences.* – 1994. – № 37 (10). – P. 1272–1280.
64. Sun Z. Optimal layout design of a satellite module / Z. Sun, H. Teng // *Engineering optimization.* – 2003. – № 35 (5). – P. 513–530.
65. Teng H. Test problems of circles in circle packing with constraints and known the optimal solutions / H. Teng, C. Che, Y. Wang, Y. Chen // *Optimization Online* (2004). URL: http://www.optimization-online.org/DB_FILE/2004/10/976.pdf
66. Lei K. Constrained Layout Optimization Based on Adaptive Particle Swarm Optimizer / K. Lei // *Advances in Computation and Intelligence. Series: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.* – Zhihua C., Zhenhua L., Zhuo K., Yong L. (Eds.). – 2009 – no. 1. – P. 434–442.
67. Oliveira W. A. Nonidentical circle packing problem: multiple disks installed in a rotating circular container / W. A. Oliveira, L. L. Salles-Neto, A. C. Moretti, E. F. Reis // *International Transactions in Operational Research.* – 2014. – P. 1–16. URL: <http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1401/1401.4952.pdf>
68. J. Wang, “Packing of unequal spheres and automated radiosurgical treatment planning,” *Journal of Combinatorial Optimization*, – 1999. – vol. 3, P. 453–463
69. Oliveira W. A. A heuristic for the nonidentical circle packing problem / W. A. Oliveira, L. L. Salles-Neto, A. C. Moretti // *Anais do CNMAC.* – 2010. – № 3. – P. 626 – 632.

70. Huang W. Q. Note on: an improved algorithm for the packing of unequal circles within a larger containing circle / Huang W. Q., Chen M. // *Comput. Indust. Eng.* – 2006. – № 50. – P. 338–344. Doi:10.1016/j.cie.2006.06.004

71. Wang H. Q. An improved algorithm for the packing of unequal circles within a larger containing circle / H. Q. Wang, W. Q. Huang, W. Q. Zhang , et al. // *Eur J Oper Res.* – 2002. – № 141. – P. 440–453. Doi: 10.1016/S0377-2217(01)00241-7.

72. Wang Y. S. An improved scatter search for circles packing problem with the equilibrium constraint / Y. S. Wang, Y. J. Shi, H. F. Teng // *Chinese J Comput.* – 2009. – № 32. – P. 1214–1221. DOI: 10.3724/SP.J.1016.2009.01214.

73. Fadel G. M. Packing Optimization of Free-Form Objects in Engineering Design / G. M. Fadel, M. M. Wiecek // *Optimized Packing's with Applications. Springer Optimization and its Applications.* – 2015. – Vol. 105. – P. 37–65. Doi: 10.1007/978-3-319-18899-7_3.

74. Fasano G. A. Global Optimization point of view for non-standard packing problems. / G. A. Fasano // *J. Glob. Optim.* – 2013 – Vol. 55 (2), P. 279–299

75. G. Fasano, J. D. Pinte'r (Eds.), “Model Development and Optimization for Space Engineering: Concepts, Tools, Applications, and Perspectives”. Modeling and optimization in space engineering. Series: Springer optimization and its applications – 2012 –Vol. 73, P. 1–32.

76. Fasano G. A Mixed Integer Linear Programming Model for Traffic Logistics Management at the International Space Station. / G. Fasano // *Modeling and optimization in space engineering. Series: Springer optimization and its applications* – 2013 – Vol. 73, P. 215–233.

77. Fasano G. CAST: A Successful Project in Support of the International Space Station Logistics / G. Fasano, C. Lavopa, D. Negri, M. C. Vola // *Optimized Packing's with Applications. Springer Optimization and its Applications.* – 2015. – Vol. 105. – P. 87–117. Doi: 10.1007/978-3-319-18899-7_5.

78. Fasano G. MIP-based heuristic for non-standard 3D-packing problems. / G. Fasano // 4OR: Quarterly Journal of the Belgian, French and Italian Operations Research Societies – 2008 – Vol. 6, Issue 3, P. 291–310.
79. Wang J. Packing of Unequal Spheres and Automated Radiosurgical Treatment Planning / J. Wang // Journal of Combinatorial Optimization, 1999. – Vol. 3 – P. 453–463.
80. Fasano G., Pinter J. editors. Modeling and Optimization in Space Engineering, Dordrecht: Springer. – 2013. – 404 p.
81. Nikowitz M. Advanced Optimization and Operations Research, Hardcover: Springer. / M. Nikowitz editor. – 2016. – 211 p.
82. Fathi M. Optimization in Large Scale Problems, Hardcover: Springer. / M. Fathi, M. Khakifirooz, M. Panos editors – 2018. – 292 p.
83. Velásquez-Bermúdez J. M. Large Scale Optimization in Supply Chains and Smart Manufacturing Theory and Applications, Hardcover: Springer. / J. M. Velásquez-Bermúdez, M. Khakifirooz, M. Fathi editors – 2018. – 282 p.
84. Fasano G. Space Engineering: Modeling and Optimization with Case Studies (Springer Optimization and Its Applications), Hardcover: Springer. / G. Fasano, J. Pinter, editors. – 2017. – 487 p.
85. Fasano G. Optimized Packing's with Applications / G. Fasano, J. Pinter editors. New York: Springer. – 2015. – 326 p.
86. Junqueira L. Optimization Models for the Three-Dimensional Container Loading Problem with Practical Constraints. / L. Junqueira, R. Morabito, D. S. Yamashita, H. H. Yanasse, Modeling and optimization in space engineering. Series: Springer optimization and its applications. – 2015. – Vol. 73, P 271–294, 2013. Doi: 10.1007/978-1-4614-4469-5_12.
87. Fischer A. Cutting and Packing Problems with Placement Constraints / A. Fischer, G. Scheithauer // Optimized Packing's with Applications. Springer Optimization and its Applications. – 2015. – Vol. 105. – P. 119–155. Doi: 10.1007/978-3-319-18899-7_6.

88. Litvinchev I. Approximate Packing: Integer Programming Models, Valid Inequalities and Nesting / I. Litvinchev, L. Infante, L. Ozuna // Optimized Packing's with Applications. Springer Optimization and its Applications. – 2015. – Vol. 105. – P. 187–205.
89. Freitag M. Dynamics in Logistics. Bremen, Germany: Springer. / M. Freitag, H. Kotzab, J. Pannek editors. – 2018. – 428 p.
90. Póvoa A., Corominas de Miranda A., Luís J. editors. Optimization and Decision Support Systems for Supply Chains. Hardcover: Springer. – 2016. – 190 p.
91. Zijm H. Logistics and Supply Chain Innovation. Hardcover: Springer. / H. Zijm, M. Klumpp, U. Clausen, M. Hompel editors – 2015. – 431 p.
92. Mattfeld D. Logistics Management: Contributions of the Section Logistics of the German Academic Association for Business. Braunschweig, Germany: Springer. / D. Mattfeld, T. Spengler, J. Brinkmann, M. Grunewald editors – 2015. – 284 p.
93. Erlach K. Value Stream Design: The Way Towards a Lean Factory. Hardcover: Springer. / K. Erlach editor. – 2014. – 324 p.
94. Clausen U. Efficiency and Innovation in Logistics. Hardcover: Springer. / U. Clausen, M. Hompel F. Meier editors – 2015. – 178 p.
95. Hompel M., Cloud Computing for Logistics. Hardcover: Springer. / M. Hompel, J. Rehof, O. Wolf editors. – 2015. – 139 p.
96. Zijm H., Klumpp M., Clausen U., ten Hompel M. editors. Logistics and Supply Chain Innovation. Hardcover: Springer. / H. Zijm M. Klumpp, U. Clausen, M. Hompel – 2015. – 431 p.
97. Кривцов В. С. Основы аэрокосмической техники: учебник для высш. учеб. заведений (направление "Авиация и космонавтика"): в 2ч. / В. С. Кривцов, Я. С. Карпов, М. Н. Федотов. – Харьков : Нац. аэрокосм. ун-т "Харьковский. авиационный. институт", 2003. – Ч.2. – 901 с.
98. Федотов М. Н. Основы конструирования элементов аэрокосмической техники [Текст]: учебник: в 3 ч. / М. Н. Федотов. – Харьков

: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского Харьк. авиац. ин-т, 2014. – Ч.1. – 704 с.

99. Balabuyev P. V. PRINCIPLES OF DESIGNING OF AIRPLANES WITH GAS TURBINE ENGINES / P. V. Balabuyev, S. A. Bichkov, A. G. Grebenikov, V. N. Zjeldochenko, A. A. Kobilyanskiy, A. K. Myalitsa, V. I. Ryabkov, T. P. Tseplyaeva. - Study Guide. - Kharkiv: National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", 2013. – 731 p.

100. Гребенников А. Г. Методология интегрированного проектирования и моделирования сборных самолетных конструкций / А. Г. Гребенников. – Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2006. – 532 с.

101. ВС ГА-Р4761. Руководство по методам оценки безопасности систем и бортового оборудования воздушных судов гражданской авиации. — Введ. 2011-01-01. — М.: ОАО «Авиаиздат», 2011. — 265 с.

102. Галушкин В. В. Сквозная технология проектирования комплексов бортового оборудования перспективных воздушных судов / В. В. Галушкин Д. И. Катков, В. В. Косьянчук, Н. И. Сельвесюк // Известия Южного федерального университета. — 2012. — № 3. — С. 201-209.

103. Хакимов Д. В. Оптимизация структуры комплексов бортового оборудования летательных аппаратов на основе оптимизации функциональной структуры на ранних стадиях проектирования / Д. В. Хакимов, С. К. Киселев // Электротехнические и информационные комплексы и системы. — 2016. — С. 65-69.

104. Wäscher G. An improved typology of cutting and packing problems. / G. Wäscher, H. Haußner, H. Schumann, // European Journal of Operational Research, — 2007. — Vol. 183, P. 1109–1130.

105. Burke E. Applying Ant Algorithms and the No Fit Polygon to the Nesting Problem / E. Burke, G. Kendall // Australasian Joint Conference on Artificial Intelligence. Advanced Topics in Artificial Intelligence. – 1999. – P. 453-464

106. Bischoff E. E. Loading pallets with nonidentical items / E. E. Bischoff, F. M. Janets, S. W. Ratcliff // *European Journal of Operational Research*. – 1995. – № 84. – P. 681–692.
107. Сумець О. М. Логістика: теорії, ситуації, практичні завдання / О. М. Сумець Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка Академія внутрішніх військ МВС України, – 2010 – Частина 1, 343 с.
108. Дудар Т. Г. Основа логістики / Т. Г. Дудар, Р. В. Волошина Київ : «Центр учбової літератури», 2012 – 169 с
109. Армстронг Введение в маркетинг. 5-е издание / Армстронг, Гари, Котлер, Филип // Пер. с англ.: Уч. пос. – М.: Издательский дом „Вильямс”, 2000. – 640 с.
110. Бажин И. И. Логистика: Компакт-учебник. / И. И. Бажин – Харьков: Консум, 2003. – 240 с.
111. Бауэрсокс Д. Дж.,. Логистика: интегрированная цепь поставок. – 2-е изд. / Бауэрсокс Д. Дж., Клосс Д. Дж. Пер. с англ. – М.: ЗАО «Олимп-Бизнес», 2005. – 640 с.
112. Vanek J. PackMerger: A 3D Print Volume Optimizer. / J. A. Garcia Galicia, B. Benes, R. Mech, N. Carr, O. Stava, G. Miller // *Computer graphics forum*. 00: 111.2014.
113. Чугай А. М. Оптимізація процесу 3D-друку для SLS технології адитивного виробництва. / А. М. Чугай, О. В. Панкратов, Т. Є. Романова, Ю. Є. Стоян // *Системи управління, навігації та зв'язку*, 2017. № 6(46). С. 127–130.
114. Kumar L. 3D Printing and Additive Manufacturing Technologies / L. Kumar. P. Juotish, D. Wimpenny (Eds.) // *Finite Element Analysis of Melt Pool Characteristics in Selective Laser Spot Melting on a Powder Layer* Yadav, Anshul (et al.), P 1-13.

115. Kumar L. 3D Printing and Additive Manufacturing Technologies / L. Kumar, P. Juotish, D. Wimpenny (Eds.) // Thermal Transport Phenomena in Multi-layer Deposition Using Arc Welding Process Yadav, Anshul (et al.), P 15-27.

116. Kumar L. 3D Printing and Additive Manufacturing Technologies / L. Kumar, P. Juotish, D. Wimpenny (Eds.) // Comparison of Bonding Strength of Ti-6Al-4V Alloy Deposit and Substrate Processed by Laser Metal Deposition Jyothish Kumar, L. (et al.) P 29-37.

117. Ramya A. 3D printing technologies in various applications. / A. Ramya, Sai Vanapalli. International Journal of Mechanical Engineering and Technology. Vol. 7, No 3. 2016. P. 396-409.

118. Dyckhoff H. A typology of cutting and packing problems / H. Dyckhoff // Euro-pean Journal of Operational Research. – 1990. – № 44. – P. 145–159.

119. Golden B. L. Approaches to the cutting stock problem / B. L. Golden // AIIE Transactions. – 1976. –№ 8. – P. 265–274.

120. Coffman E. G. Approximation algorithms for bin-packing - A survey / E. G. Coffman, M. R. Garey, D. S. Johnson // Approximation Algorithms for Bin Packing for NP-Hard Problems. – Hochbaum D. S. (Eds.). – Boston: PWS Publishing Company. – 1997. – P. 46–93.

121. Martello S. Knapsack Problems / S. Martello, P. Toth // Algorithms and Com-puter Implementations, Wiley, Chichester, UK. –1990. –296 p.

122. Hinxman A. I. The trim loss and assortment problems. A survey / A. I. Hinxman // European Journal of Operational Research. – 1980. – № 5. – P. 8–18.

123. Eilon S. N. The loading problem / S. Eilon, N. Christofides // Management Science. –1971. – № 17. – P. 259–268.

124. Szykman S. simulated annealing approach to three-dimensional component packing. / S. Szykman, J. A. Cagan // Journal of Mechanical Design. 1995. Vol. 95, Issue 2A. P. 308-314.

125. Sutou A. Global optimization approach to unequal sphere packing problems in 3D. / A. Sutou, Y. Dai // Journal of optimization theory and applications, –2002. – Vol. 114, No. 3, P. 671–694
126. Stoyan Y. Packing of various radii solid spheres into a parallelepiped. / Y. Stoyan, G. Yaskov, G. Scheithauer // Central European Journal of Operations Research, –2003. – Vol. 11, P. 389–407.
127. Stoyan Y. Packing congruent hyperspheres into a hypersphere / Y. Stoyan, G. Yaskov // Journal of Global Optimization, – 2012 – Vol. 52, No. 4, P. 855–868.
128. Yaskov G. Packing identical spheres into a cylindrical domain. / G. Yaskov, Y. Stoyan // A. Chugay Proceedings of the Workshop on Cutting Stock Problems, Miercurea-Ciuc, Romania – 2003. – P. 75–82.
129. Hifi M. A literature Review on Circle and Sphere Packing Problems: Model and Methodologies / M. Hifi, R. M'Hallah // Advances in Optimization Research. – 2009. – P. 27–28.
130. Gan M. A. Predicting packing characteristics of particles of arbitrary shapes / M. Gan, N. Gopinathan, X. Jia , R. Williams // KONA. – 2004 – . № 22. P. 82-93.
131. Мизгулин В. В., Моделирование плотных материалов методом упаковки сферополлиэдров / В. В. Мизгулин, Р. М. Кадушников, Д. М. Алиевский, В. М. Алиевский // Компьютерные исследования и моделирование. – 2012. – Т. 4, № 4. С. 757-766.
132. Birgin E. G. Optimizing the packing of cylinders into a rectangular container / E. G. Birgin, J. M. Martinez, D. P. Ronconi // European Journal on Operations Research. – 2005. – Vol. 160, Issue 1. P. 19-33.
133. Egeblad J. Heuristics for Container Loading of Furniture / J. Egeblad, C. Garavelli, S. Lisi, D. Pisinger // European Journal of Operational Research. – 2010. – Vol. 200, Issue 3. P. 881-892.

134. Fasano G. MIP-based heuristic for non-standard 3D-packing problems / G. Fasano // 4OR: Quarterly Journal of the Belgian, French and Italian Operations Research Societies. – 2008. – Vol. 6, Issue 3. P. 291-310.
135. Lee Y. A 3D ellipsoid-based model for packing of granular particles / Y. Lee, C.-T. Yang, C.-S. Chien // International Journal of Computer Applications in Technology, – 2003. – Vol. 17, Issue 3, P. 148–155.
136. Egeblad J. Fast neighborhood search for two - and three-dimensional nesting problems. / J. Egeblad, B.K. Nielsen, A. Odgaard // Eur. J. Oper. Res., – 2007. – Vol. 183, Issue 3, P. 1249–1266.
137. Stoyan Y. Packing of convex polytopes into a parallelepiped / Stoyan Y., Gil N., Scheithauer G., Pankratov A. // Optimization. – 2005. – Vol. 54, N 2. P. 215–235.
138. Stoyan Yu. Packing cylinders and rectangular parallelepipeds with distances between them into a given region / Yu. Stoyan, A. Chugay // European Journal of Operational Research. – 2009. – Vol. 197, Issue 2. P. 446-455.
139. Torquato S. Dense polyhedral packings: Platonic and Archimedean solids / S. Torquato, Y. Jiao // Physics Review E. – 2009. – Vol. 80. P. 1–21.
140. George J. A. A heuristic for packing boxes into a container / J. A. George, D. F. Robinson // Computers and Operational Research, – 2009. – Vol. 7, Issue 3, P. 147–156.
141. Pisinger D. Heuristics for the container loading problem / D. Pisinger // European Journal of Operational Research, – 2009. – Vol. 141, Issue 2, P. 382–392.
142. Brunetta L. A general purpose algorithm for three-dimensional packing / L. Brunetta, P. Grégoire // INFORMS Journal on Computing, – 2005. – Vol. 17, Issue 3, P. 328–338.
143. Bortfeldt A. Constraints in container loading: a state-of-the-art review / A. Bortfeldt, G. Wascher // European Journal of Operational Research, – 2013. – Vol. 229, no.1, P. 1–20.

144. Crainic T. G. Two-Stage Tabu Search Heuristic for the Three-dimensional Bin Packing Problem / T. G. Crainic, G. Perboli, R. A. Tadei // European Journal of Operational Research. 2009. Vol. 195, Issue 3. P. 744-760.

145. Dai Z., Cha J. An octree method for interference detection in computer aided 3-D packing // Advances in Design Automation 1994: Proceedings of the 20th ASME Design Automation Conference. – 1994. – № 1. P. 29-33.

146. Dai Z. An octree based heuristic algorithm for 3D packing / Z. Dai, J. Cha // Advances in Design Automation: Proceedings of the 20th ASME Design Automation Conference. – 1994. – № 2. P. 125-133.

147. Landon M. D. Optimal packaging of complex parametric solids according to mass property criteria / M. D. Landon, R. J. Balling // Journal of Mechanical Design. – 1994. – Vol. 116, Issue 2. P. 375-381.

148. Dixon L. C. W. Towards global optimization / L. C. W. Dixon, G. P. Szegö // Amsterdam: North-Holland. – 1975,1978. – Vols. 1-2

149. Vinoth J. A. Layout problem optimization in VLSI circuits using genetic algorithm / J. A. Vinoth, K. Batri // International Journal of Engineering Sciences & Research Technology. – 2014. – Vol. 3, Issue 4. P. 711-716.

150. Muntean O. An evolutionary approach for the 3D packing problem / O. Muntean // Proceedings of the International Conference on Knowledge Engineering, Principles and Techniques, KEPT2007, Cluj-Napoca, Romania, June 6-8, – 2007. – P. 193–200.

151. Ikonen I. A genetic algorithm for packing three-dimensional non-convex objects having cavities and holes / I. Ikonen, W. Biles, A. Kumar, J. C. Wissel, R. K. Ragade // Proceedings of 7th International Conference on Genetic Algorithms. – 1997. – P. 591-598.

152. Goldberg D. E. Genetic algorithms in search, optimization and machine learning / D. E. Goldberg // Addison-Wesley. Reading, MA, USA. – 1984. – 412 p.

153. Glover F. Heuristics for integer programming using surrogate constraints / F. Glover // Decisions Science. – 1977. – Vol. 8. P. 156-166.

154. Glover F. Tabu Search - Part I / F. Glover// ORSA Journal on Computing. – 1989. – Vol. 1, N 3. P. 190-206.
155. Glover F. Tabu Search - Part II / F. Glover // ORSA Journal on Computing. – 1990. – Vol. 2, N 1. P. 4-32.
156. McCulloch W. S. A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity / W. S. McCulloch, W. Pitts // Bulletin of Mathematical Biophysics. – 1943. – Vol. 5. P. 115-137.
157. Jang S. H. A study on three dimensional layout design by the simulated annealing method / S. H. Jang // Journal of Mechanical Science and Technology. – 2008. – Vol. 22, Issue 11. P. 2016-2023.
158. Jajodia S. CLASS: Computerized Layout Solutions Using Simulated Annealing / S. Jajodia, I. Minis, G. Harhalakis, J. M. Proth // International Journal of Production Research. – 1992. – Vol. 30, Issue 1. P. 95-108.
159. Huang M. D. An efficient general cooling schedule for simulated annealing / M. D. Huang, F. Romeo, A. Sangiovanni-Vincentelli // IEEE International Conference on Computer Aided Design – Digest of Technical Papers. Santa Clara, CA. 11-13 November, – 1986. – P. 381-384.
160. Hustin M. D. TIM, a new standard cell placement program based on the simulated annealing algorithm / M. D. Hustin, A. Sangiovanni-Vincentelli // IEEE Physical Design Workshop on placement and Floorplanning. – 1987. – 122 p.
161. Kolli A. Packing of generic, three dimensional components based on multi-resolution modeling / A. Kolli, J. Cagan, R. A. Rutenbar // Proceedings of the 22nd ASME Design Automation Conference (DAC-1479). Irvine, CA. 19-22 August, 1996.
162. Hooke R., Direct search solution of numerical and statistical problems. Journal of the Association for Computing Machinery / R. Hooke, T. A. Jeeves // Journal of the Association for Computing Machinery. – 1980. – Vol. 8, Issue 2. P. 212-229.

163. Torczon V. From evolutionary operation to parallel direct search: pattern search algorithms for numerical optimization / V. Torczon, M. Trosset // *Computing Science and Statistics*. – 1998. – Vol. 29. P. 396-401.

164. Yin S. An extended pattern search algorithm for three-dimensional component layout / S. Yin, J. Cagan // *ASME Journal of Mechanical Design*. – 2000. – Vol.122, Issue 1. P. 102-108.

165. Yin S. Layout of an automobile transmission using three-dimensional shapeable components / S. Yin, J. Cagan, P. Hodges, X. Li // *Journal of Mechanical Design*. – 2004. – Vol. 126, Issue 1. P. 188-191.

166. Yin S. Exploring the effectiveness of various patterns in an extended pattern search layout algorithm / S. Yin, J. Cagan // *Journal of Mechanical Design*. – 2004. – Vol. 126, Issue 1. P. 22-28.

167. Aladahalli C. Objective function effect based pattern search – theoretical framework inspired by 3D component layout / C. Aladahalli, J. Cagan, K. Shimada // *Journal of Mechanical Design*. – 2007. – Vol. 129, Issue 3. P. 243-254.

168. Eisenbrand F. Packing a trunk – now even with a twist / F. Eisenbrand, S. Funke, A. Karrenbauer, E. Schömer, J. Reichel // *Proceedings of ACM Symposium on Solid and Physical Modeling (SPM)*. Cambridge. – 2005. – P. 197-206.

169. Allen S. D. A hybrid placement strategy for the three-dimensional strip packing problem / S. D. Allen, E. K. Burke, G. A. Kendall // *European Journal of Operational Research*. – 2011. – Vol. 209, Issue 3. P. 219-227.

170. Peng Y. A hybrid simulated annealing algorithm for container loading problem / Y. Peng, D. Zhang, Y. Francis, L. Chin // *Proceedings of the first ACM/SIGEVO Summit on Genetic and Evolutionary Computation*. Shanghai, China. 12-12 June, – 2009. – P. 919-928.

171. Grunbaum B. Configurations of Points and Lines. Graduate studies in mathematics. / B. Grunbaum // *American Mathematical Society*. Providence, Rhode Island. – 2009. – Vol. 103. 404 p.

172. Gropp H. Configurations between geometry and combinatorics. / H. Gropp // *Discrete Applied Mathematics*. – 2004. – Vol. 138. № 1. P. 79–88.
173. Solla S. A. Configuration Space Analysis for Optimization Problems. / S. A. Solla, G. B. Sorkin, S. R. White // *Disordered Systems and Biological Organization*. Bienenstock E. et al. (eds.). Berlin, Heidelberg: Springer. – 1986. – P. 283-293.
174. Westerland C. Configuration spaces in geometry and topology. / C. Westerland // *Australian Mathematical Society Gazette*. – 2011. – Vol. 38. № 5. P. 279 – 283.
175. Edward R. Geometry and topology of configuration spaces. / R. Edward, F. Sufian, Y. Hussein // *Springer Monographs in Mathematics*. – 2001. – 313 p.
176. Стоян Ю. Г. Пространства геометрических информаций. / Ю. Г. Стоян // Препринт № 223. Ин-т пробл. машиностроения. Харьков. – 1985. – 68 с.
177. Стоян Ю. Г. Алгебро-топологические свойства объектов. / Ю. Г. Стоян, В. Я. Винарский // Препринт № 166. Ин-т пробл. машиностроения. Харьков. – 1981. – С. 34.
178. Рвачев В. Л. Теория R – функций и некоторые ее приложения. / В. Л. Рвачев – Киев : Наук. думка, – 1982. – 552 с.
179. Stoyan Y. Φ - function for 2D primary objects / Y. Stoyan, N. Gil, J. Terno, T. Romanova, G. Schithauer // *Studia Informatica*. – Paris. – 2002. – Vol. 2. – № 1. – P. 1–32.
180. Stoyan Y. Φ - function for complex 2D objects / Y. Stoyan, M. Gil, J. Terno, T. Romanova, G. Schithauer // *4OR Quarterly Journal of the Belgian, French and Italian Operations Research Societies*. – 2004. – Vol. 2. – № 1. – P. 69–84.
181. Стоян Ю. Г. Математическое моделирование взаимодействий базовых геометрических 3D объектов. / Ю. Г. Стоян, Г. Шайтхауэр, Т. Е. Романова // *Кибернетика и системный анализ*. – 2005. – №3. С. 19–31.

182. Kiseleva E. M. Solution of continuous problems of optimal covering with spheres using optimal set-partition theory / E. M. Kiseleva, L. I. Lozovskaya, E. V. Timoshenko // *Cybernetics and Systems Analysis*, – 2009. – Vol. 45, no. 3, P. 421–437.

183. Стоян Ю. Г. Евклидовы комбинаторные конфигурации. / Ю. Г. Стоян, С. В. Яковлев, О. С. Пичугина – Харьков : Константа, 2017. – 404 с.

184. Yakovlev S. The Informational Analytical Technologies of Synthesis of Optimal Spatial Configuration. / S. Yakovlev, O. Kartashov, K. Korobchynskiy // *Proceedings of IEEE 13th International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT 2018)*. – 2018. – Vol. 2. – P. 140 – 143. (Индексується в Scopus)

185. Коробчинский К. П. О некоторых задачах оптимизации в конфигурационном пространстве сферических объектов / К. П. Коробчинский, Б. Ю. Скрипка // *Математическое моделирование, оптимизация и информационные технологии : Материалы 6-й международной конференции*. Кишинёв. – 2018. – С. 359–362.

186. Коробчинский К. П. Анализ методов сохранения объектов конфигурационного пространства / К. П. Коробчинский, И. С. Томина, В. С. Песчаный // *I Міжнародна науково-практична конференція ІТ-професіоналів та аналітиків комп'ютерних систем, присвяченої 50-річчю кафедри інформатики ХАІ «ProfIT Conference» : зб. тез доп. міжнар. наук. – практ. конф. / Нац. аерокосм. ун-т «Харк. авіац. ін-т» (Харків, 24 – 26 квітня 2018 р.)*. – С. 55–57.

187. Карташов О. В. Об одном классе задач равновесной упаковки с учетом зон запрета / О. В. Карташов, К. П. Коробчинский, С. В. Яковлев // *Математичне та програмне забезпечення інтелектуальних систем (MPZIS-2017) : зб. тез. доп. XV Міжнар. наук.-практ. конф. (Дніпро, 22-24 листопада 2017 р.)*. – С. 83–85.

188. Kartashov O. Some problems of optimization in the configuration space of spherical objects / O. Kartashov, K. Korobchynskiy, V. Skrypka // Матеріали Двадцятого Міжнародного науково-практичного семінару «Комбінаторні конфігурації та їх застосування» (Кропивницький, 13-14 квітня 2018 р.). – С. 11–13.

189. Коробчинский К. П. Об одном подходе решения задачи равновесной упаковки с учетом длины связывающей сети / К. П. Коробчинский, А. А. Сивак // Всеукраїнська науково-технічна конференція «Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні ІКТМ-2017» : зб. тез доп. конф. / Нац. аерокосм. ун-т «Харк. авіац. ін-т» (Харків, 20 жовтня 2017 р.). – С. 129.

190. Stoyan Yu. Optimized object packings using quasi-phi-functions. Optimized Packings with Applications / Yu. Stoyan, T. Romanova, A. Pankratov, A. Chugay, G. Fasano, J. D. Pinte'r (Eds.). Springer, New York, 2015. Vol. 105. P. 265–293.

191. Stoyan Yu. Placement Problems for Irregular Objects: Mathematical Modeling, Optimization and Applications. Optimization Methods and Applications / Yu. Stoyan, A. Pankratov, T. Romanova, S. Butenko et al. (eds.). Springer, New York, – 2017. – P. 521–558.

192. Chernov N. Mathematical model and efficient algorithms for object packing problem / N. Chernov, Y. Stoyan, T. Romanova // Computational Geometry: Theory and Applications. – 2010. – № 43(5). P. 535–553. Doi: 10.1016/j.comgeo.2009.12.003.

193. Stoyan Y. E. Construction of a Φ -function for two convex polytopes. / Y. E. Stoyan, J. Terno, M. Gil, T. Romanova, G. Scheithauer, // *Applicationes Mathematicae*, – 2002. – Vol. 2, No. 29, P. 199–218.

194. Стоян Ю. Г. Математическое моделирование ограничений на допустимые расстояния между геометрическими объектами / Ю. Г. Стоян, А. В. Панкратов, Т. Е. Романова // *Кибернетика и системный анализ*. – 2012. – № 48 (3). – С. 12–17.

195. TRON : URL: <https://tron.network/> Дата звернення: 26.04.2018
196. L-BFGS-B : URL: <http://bergant.github.io/nlexperiment/> Дата звернення: 20.04.2018
197. MATLAB : URL: <https://www.mathworks.com> Дата звернення: 26.03.2017
198. TOMLAB : URL: <https://tomopt.com/tomlab/> Дата звернення: 15.04.2018
199. IpOpt : URL: <https://tomopt.com/tomlab/> Дата звернення: 26.04.2018
200. Карташов А. В. Математические модели и информационные технологии компоновочного синтеза сферических конфигураций / А. В. Карташов, К. П. Коробчинский // Радіоелектронні і комп'ютерні системи : сб. науч. тр. / Нац. аерокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». Харьков, – 2017. – Вып. 4 (84). – С. 82–88.
201. Скоб Ю. А. Разработка алгоритма параллельных вычислений при решении задач газовой динамики / Ю. А. Скоб, К. П. Коробчинский, Д. С. Морозов, В. В. Шенцов. // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии : сб. науч. тр. / Нац. аерокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». Харьков, – 2009. – Вып. 41. – С. 109–115.
202. Коробчинский К. П. Концепция распараллеливания вычислений / К. П. Коробчинский, Д. С. Морозов // Всеукраїнська науково-технічна конференція «Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні ІКТМ-2007» : зб. тез доп. конф. / Нац. аерокосм. ун-т «Харк. авіац. ін-т», (Харків, 20 жовтня 2007 р.). Харків, – 2007. – С. 146.
203. Карташов А. В. Об особенностях решения дискретно-континуальных задач с помощью специализированного пакета COIN-OR. / А. В. Карташов, К. П. Коробчинский, Ю. С. Санин, // Free and Open Source Software : VIII Всеукраїнська науково-практична конференція «Free and Open Source Software» FOSS-2016 (Харків. 22-24 листопада 2016 р.). Харків. – 2016. – С. 43.

204. Пичугина О. С. Об одном подходе к условной оптимизации на сферически расположенных дискретных множествах. / О. С. Пичугина, К. П. Коробчинский // Информатика и системные науки : VIII Всеукраинской научно-практической конференции "Информатика и системные науки", ПУЕТ (Полтава, Украина, 2017 р.). – С. 219.

205. Коробчинський К. П. Перетворення структури даних в програмних системах при рішенні задач оптимізації / К. П. Коробчинський, В. М. Рудик // I Міжнародна науково-практична конференція ІТ-професіоналів та аналітиків комп'ютерних систем, присвяченої 50-річчю кафедри інформатики ХАІ «ProfIT Conference» : зб. тез доп. міжнар. наук. –практ. конф. / Нац. аерокосм. ун-т «Харк. авіац. ін-т» (Харків, 24 – 26 квітня 2018 р.). – С. 57–58.

206. Скрипка Б. Ю. Использование параллельных вычислений в задачах упаковки шаровых объектов в контейнер с применением пакета IpOpt для решения задач оптимизации / Б. Ю. Скрипка, К. П. Коробчинский // I Міжнародна науково-практична конференція ІТ-професіоналів та аналітиків комп'ютерних систем «ProfIT Conference» : зб. тез доп. міжнар. наук. –практ. конф. / Нац. аерокосм. ун-т «Харк. авіац. ін-т» (Харків, 24 – 26 квітня 2018 р.). – С. 61–63.

207. Castillo I. Solving circle packing problems by global optimization: numerical results and industrial applications. / I. Castillo, F. J. Kampas, J. D. Pinter // Eur.J. Oper. Res. – 2008. – 191(3), P. 786–802.

208. López, C. O.: Packing unequal circles using formulation space search. / C. O. López, J. E. Beasley // Comput. Oper. Res. 40 – 2013. – Vol. 5, P. 1276–1288.

209. Liu J. An effective hybrid algorithm for the circles and spheres packing problems / J. Liu, Y. Yao, Yu. Zheng, H. Geng, G. Zhou // Combinatorial Optimization and Applications. Lecture Notes in Computer Science. – 2009. – Vol. 5573. – P. 135–144.

210. He K. An action-space-based global optimization algorithm for packing circles into a square container. / K. He, M. Huang, C. Yang // *Computers & Operations Research* – 2013. – Vol. 58, P. 67–74.

211. Shang Y. A novel method for equal and unequal circle packing problem. / Y. Shang // *Applied Mechanics and Materials* – 2014. – Vol. 513, P. 3942–3945.

212. Amirgaliyeva Z., Solving the maximum minsum dispersion by alternating formulations of two different problems. / Z. Amirgaliyeva, N. Mladenovic, R. Todosijevic, D. Urosevic // *European Journal of Operational Research* – 2014. – Vol. 260, no. 2, P. 444–459.

213. Wachter A. On the implementation of an interior-point filter line-search algorithm for large-scale nonlinear programming / A. Wachter, L. Biegler // *Mathematical Programming*. – 2006. – Vol. 106, no. 1, – P. 25–57.

214. Stoyan Yu. G. Packing Unequal Spheres into Various Containers. / Yu. G. Stoyan, G. Scheithauer, G. N. Yaskov // *Cybernetics and Systems Analysis* – 2016. – Vol. 52, no. 3, P. 419–426.

215. Yakovlev S. V. The method of artificial space dilation in problems of optimal packing of geometric objects. / Yakovlev S. V // *Cybernetics and Systems Analysis* – 2017. – Vol.53, no. 5, P. 725-732. ==11

216. Pichugina O. S. Functional and analytic representations of the general permutations. / O. S. Pichugina, S. V. Yakovlev // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies* – 2016. – Vol. 1, no. 4, P. 27–38.P43 == 12

217. Pichugina O. S. Continuous representations and functional extensions in combinatorial optimization. / O. S. Pichugina, S. V. Yakovlev // *Cybernetics and Systems Analysis* – 2016. – Vol. 52, no. 6, P. 921–930. P43 == 13

218. Yakovlev S. V. Properties of combinatorial optimization problems over polyhedral-spherical sets. / S. V. Yakovlev, O. S. Pichugina // *Cybernetics and Systems Analysis* – 2018. – Vol. 54, no. 1, P. 99–109.P43 == 14

219. Yakovlev, S. V. Polyhedral spherical configuration in discrete optimization. / S. V. Yakovlev, O. S. Pichugina, O. V. Yarovaya // Journal of Automation and Information Sciences – 2019. – Vol. 51, no. 1, P. 38-50. P43 == 15
220. Mitchell M. An Introduction to Genetic Algorithms, Reprint edition. / M. Mitchell – Cambridge, Mass.: MIT Press, 1998.
221. Kramer O., Genetic Algorithm Essentials, 1st ed. 2017 edition. / O. Kramer – New York: Springer, 2017.
222. Gulianitsky L. F. Meta-evolutionary method of deformed polyhedron in combinatorial optimization / L. F. Gulianitsky, I. V. Sergienko // Cybernetics and system analysis, – 2007 – vol. 44, no. 6, P. 70–79.
223. Phiwhorm K. A hybrid genetic algorithm with multi-parent crossover in fuzzy rule-based / K. Phiwhorm, K. R. Saikaew // International Journal of Machine Learning and Computing, – 2017 – Vol. 7, no. 5, P. 114-117.
224. Stoyan Yu. G. Method of balancing rotating discretely distributed masses / Yu. G. Stoyan // Energomashinostroenie, –1982 – no. 2, P. 4–5.
225. Яковлев С. В. О методах переменного радиуса в задаче упаковки шаров в контейнеры / С. В. Яковлев, Г. Н. Яськов, К. П. Коробчинский // Питання прикладної математики і математичного моделювання : зб. наук. пр. / Нац. ун-т ім. Олеся Гончара. Дніпро, 2017. Вып. 17. – С. 265–272.
226. Яковлев С. В. Об одном классе генетических алгоритмов в задачах оптимизации на комбинаторных конфигурациях / С. В. Яковлев, А. В. Карташов, К. П. Коробчинський // Бионика интеллекта : науч.-техн. журнал / Нац. ун-т радіоелектроніки ХНУРЕ. Харків, 2017. Вып. 27. – С. 31–36.
227. Мазорчук М. С. Формування банку тестових завдань на основі аналізу психометричних властивостей тестів в умовах малих популяцій досліджуваних. Радіоелектронні і комп'ютерні системи : сб. науч. тр. / М. С. Мазорчук, К. П. Коробчинський, Т. О. Григор'єва – Нац. аерокосм. ун-т ім. Н.Е. Жуковського «ХАИ». Харків, 2015. Вып. 4 (74). – С. 150–156.

228. Коробчинский К. П. Численная оценка последствий взрыва водорода в атмосфере. Авиационно-космическая техника и технология : сб. науч. тр. / К. П. Коробчинский, Ю. А. Скоб, М. Л. Угрюмов, В. В. Шенцов – Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». Харьков, 2008. Вып. 1 (48). – С. 79–88.

229. Skob Yu. A. Numerical Modeling of Hydrogen Deflagration Dynamics in Enclosed Space / Yu. A. Skob, M. L. Ugryumov, K. P. Korobchynskiy, V. V. Shentsov, E. A. Granovskiy, V. A. Lyfar // 3-nd International Conference on Hydrogen Safety (Ajaccio-Corsica, France, 2009). (ICHS Paper No. ID 182) 12 p.

230. Коробчинский К. П. Об особенностях решения задач оптимизации на перестановках. / К. П. Коробчинский, О. С. Пичугина // Математичне та програмне забезпечення інтелектуальних систем : Тези доповідей XIV Міжнародної науково - практичної конференції MPZIS – 2016 (Дніпро, 16 - 18 листопада 2016 р.). Дніпро. ДНУ, 2016. – С. 104–105.

231. Карташов А. В. Особенности реализации генетических алгоритмов в задачах евклидовой комбинаторной оптимизации. / А. В. Карташов, К. П. Коробчинский, О. С. Пичугина // Обчислювальний інтелект (результати, проблеми, перспективи) : зб. тез доп. IV Міжнар. наук.-практ. конф. (Київ, 16-18 травня 2017 р.). Київ. 2017. – С. 120–122.

232. Яковлев С. В. Метод змінних радіусів в задачі розміщення нерівних кіл / С. В. Яковлев, О. В. Карташов, К. П. Коробчинський // Інформаційні технології та комп'ютерне моделювання : зб. тез доп. міжнар. наук.-практ. конф. (11–16 вересня 2017 р., Івано-Франківськ). Івано-Франківськ. 2017. – С. 319–322.

233. Коробчинский К. П. Пакування нерівних куль у кулі методом змінного радіуса / К. П. Коробчинский, Н. С. Лаухін // Всеукраїнська науково-технічна конференція «Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні ІКТМ-2017» : зб. тез доп. наук.-техн. конф. / Нац. аэрокосм. ун-т «Харк. авіац. ін-т» (Харків, 20 жовтня 2017 р.). Харків. 2017. – С. 127–128.

234. Коробчинский К. П. О некоторых подходах к распараллеливанию вычислений в генетических алгоритмах / К. П. Коробчинский, Б. Ю. Скрипка // Всеукраїнська науково-технічна конференція «Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні ІКТМ-2017»: зб. тез доп. конф. / Нац. аерокосм. ун-т «Харк. авіац. ін-т» (Харків, 20 жовтня 2017 р.). – С. 144.

235. Яковлев С. В. Методы искусственного расширения пространства в задачах размещения гомотетичных объектов / С. В. Яковлев, К. П. Коробчинский // Сучасна інформатика: проблеми, досягнення та перспективи розвитку : зб. тез доп. Міжнар. наукової конф. (Київ 13–15 грудня 2017 р.). Київ. 2017. – С. 171–172.

236. Комп'ютерна програма «Комп'ютерна інтерактивна система інженерного аналізу та прогнозу руху хімічно реагуючих газоповітряних сумішей в задачах промислової аеродинаміки та екології атмосфери «FIRE» / Скоб Ю. А., Угрюмов М. Л., Коробчинський К. П. : Свідectво про реєстрацію авторського права на твір № 30079 (Україна). – Дата реєстрації 28.08.2009.

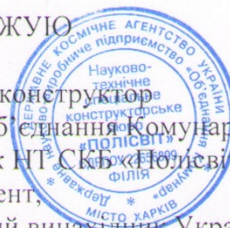
237. Kubach T. Parallel greedy algorithms for packing unequal spheres into a cuboidal strip or a cuboid / T. Kubach, A. Bortfeldt, T. Tilli, H. Gehring // Technical report, Diskussionsbeitrag Nr. 440, Fakultät für Wirtschaftswissenschaft, FernUniversität in Hagen. – 2009. – 20 p.

ДОДАТОК А

АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

ЗАТВЕРДЖУЮ

Головний конструктор
ДНВП «Обладнання Комунар» –
Начальник НТ СКБ «Полісвіт»
к.т.н., доцент,
Заслужений винахідник України



М.Ф. Сидоренко.

17.06.2018р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

наукових результатів дисертаційної роботи Коробчинського Кирила Петровича, виконаної на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Комісія у складі: голови комісії – заступника начальника відділу, к.т.н. Тарасенка В.В., членів комісії – начальника лабораторії Сальникова В.В., провідного інженера Гуртового В.М. встановила, що результати наукових досліджень Коробчинського Кирила Петровича, а саме:

- 1) об'єктно-орієнтована модель ієрархії класів складних просторових об'єктів, що дозволяє адаптувати та комплексно враховувати структури даних в системах компоновки бортового обладнання з урахуванням геометричної інформації;
- 2) інформаційно-аналітична модель опису структур даних в процесі синтезу оптимальних конфігурацій аерокосмічних об'єктів з урахуванням їх просторової форми, що інтегрує ієрархічну об'єктно-орієнтовану модель з програмними комплексами, що забезпечують оптимізацію та візуалізацію проектних рішень;
- 3) інформаційна технологія багатоетапної обробки, перетворення та адаптації даних, що дозволяє змінювати їх структуру в процесі формування оптимальних конфігурацій бортового обладнання та реалізовувати зворотній зв'язок за участю ОПР,

були впроваджені в процесі розробки електронних цифрових регуляторів для газотурбінних авіаційних двигунів, а також контрольно-перевірочної апаратури.

Впровадження результатів дисертаційного дослідження дозволило підвищити якість проектних рішень, забезпечити їх візуалізацію, зменшити часові витрати на оцінювання схем компоновки бортового обладнання, підвищити достовірність отриманих даних, підтвердити виконання вимог технічної та нормативної документації.

Голова комісії

В. В. Тарасенко

Члени комісії:

В.В. Сальников

В. М. Гуртовий

ЗАТВЕРДЖУЮ

Ректор

Національного аерокосмічного університету

ім. М. С. Жуковського «Харківський

авіаційний інститут»

д-р техн. наук, професор



М.В. Нечипорук

2018 р.

**впровадження результатів дисертаційної роботи
старшого викладача кафедри інформатики Коробчинського К.П.
у науково-дослідницьку роботу Національного
аерокосмічного університету ім. М.С. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»**

Ми, що підписалися нижче, декан факультету систем управління літальними апаратами к.т.н., доцент Заболотний О.В., заступник декана факультету систем управління літальними апаратами з наукової роботи к.т.н., доцент Яшина О.С., завідувач кафедри інформатики, д.т.н., професор Чухрай А. Г., склали цей акт про те, що результати дисертаційної роботи Коробчинського Кирила Петровича впроваджені при виконанні держбюджетних НДР № ДР 0103U004032 «Розробка науково обґрунтованих математичних моделей інформаційних технологій при формуванні просторового уявлення вузлів літальних апаратів», № ДР 0106U001036 «Розробка методів інформаційних технологій підтримки прийняття рішень для проектування елементів аерокосмічних систем», ДР № 0108U011072 «Методологічне забезпечення підготовки та управління комплексними проектами розвитку підприємств машинобудівної та транспортної галузей»; № ДР 0109U001089 «Енергоефективні та ресурсозберігаючі технології і засоби моделювання, вимірювання і перетворення процесів і енергоносіїв літальних апаратів і паливно-енергетичних комплексів», № ДР 0111U001072 «Методологія проектування елементів та інформаційно-вимірювальних систем контролю параметрів авіаційних двигунів і промислових паливно-енергетичних комплексів».

В рамках вказаних держбюджетних НДР Коробчинським К.П. розроблено:

- інформаційно-аналітичну модель задачі синтезу просторових конфігурацій, що дозволяє комплексно враховувати структури даних геометричної інформації;
- інформаційну технологію багатоетапної обробки, перетворення та адаптації даних, що дозволяє змінювати їх структуру в процесі формування синтезу оптимальних конфігурацій та реалізовувати зворотній зв'язок за участю ОПР;
- технологію паралельних обчислень для багатоядерних комп'ютерних систем при оптимізації просторових конфігурацій аерокосмічних об'єктів;
- методи обчислювального інтелекту, що враховують комбінаторну структуру багато екстремальних задач синтезу конфігурацій;
- технологію 3D моделювання для візуалізації конфігурацій, що враховує перетворення вихідних даних задачі в об'єктно-орієнтовану структуру;

Результати наукових досліджень Коробчинського К.П. дозволили підвищити якість проектних рішень за рахунок комплексного застосування запропонованих ним моделей та методів інформаційної технології компоновочного синтезу аерокосмічних об'єктів.

Декан факультету систем управління
літальними апаратами,
к.т.н., доцент

О.В. Заболотний

Заступник декана факультету систем
управління літальними апаратами
з наукової роботи, к.т.н., доцент

О.С. Яшина

Завідувач кафедри інформатики,
д.т.н., професор

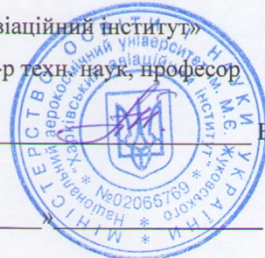
А.Г. Чухрай

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з науково-педагогічної роботи
 Національного аерокосмічного університету
 ім. М. С. Жуковського «Харківський
 авіаційний інститут»
 д-р техн. наук, професор

_____ В.М. Павленко

«_____» _____ 2018р

**Акт**

**впровадження результатів дисертаційної роботи
 на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук
 Коробчинського Кирила Петровича у навчальний процес
 Національного аерокосмічного університету ім. М.С. Жуковського
 «Харківський авіаційний інститут»**

Ми, що підписалися нижче, голова методичної комісії факультету систем управління літальними апаратами к.т.н., доцент Анікін А. М., завідувач кафедри інформатики д.т.н., професор Чухрай А. Г., к.т.н., доцент кафедри інформатики Скоб Ю.О., склали цей акт про те, що результати дисертаційної роботи Коробчинського Кирила Петровича впроваджені у навчальний процес Національного аерокосмічного університету ім. М.С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут» при викладанні наступних дисциплін:

- «Організація баз даних та знань»;
- «Алгоритми і структури даних»;
- «Web-програмування»;
- «Об'єктно-орієнтоване програмування»;
- «Методи оптимізації та дослідження операцій»;
- «Теорія оптимальних систем»;
- «Паралельні та розподілені обчислення»;
- «Обчислювальна геометрія та комп'ютерна графіка»;
- «Обробка зображень та мультимедіа».

При викладанні наведених дисциплін використовується:

- підходи для формування структури та адаптації даних для виконання алгоритмів паралельних обчислень з використанням бібліотек COIN-OR та пакетів прикладних програм нелінійної оптимізації;
- технології паралельних обчислень для багатоядерних комп'ютерних систем при оптимізації геометричної інформації;
- методи обробки, зберігання та консолідації даних;
- підходи для візуалізації 2D та 3D об'єктів з урахуванням їх об'єктно-орієнтованих структур.

Результати дисертаційної роботи К.П. Коробчинського впроваджені у програму курсових та дипломних робіт у якості завдань та методик проведення розрахунків для підготовки бакалаврів і магістрів за спеціальностями 122 «Комп'ютерні науки та інформаційні технології» та 113 «Прикладна математика».

Голова методичної комісії
Факультету систем управління
літальними апаратами
к.т.н., доцент

А. М. Анікін

Завідувач кафедри інформатики,
д.т.н., професор

А. Г. Чухрай

Науковий секретар кафедри інформатики,
к.т.н., доцент

Ю. О. Скоб



УКРАЇНА
Міністерство освіти і науки України
Державний департамент інтелектуальної власності

СВІДОЦТВО

про реєстрацію авторського права на твір

№ 30079

Комп'ютерна програма "Комп'ютерна інтерактивна система інженерного аналізу та прогнозу руху хімічно реагуючих газоповітряних сумішей в задачах промислової аеродинаміки та екології атмосфери "FIRE"

(вид, назва твору)

Автор(и) Скоб Юрій Олексійович, Угрюмов Михайло Леонідович,
Коробчинський Кирил Петрович

(повне ім'я, псевдонім (за наявності))

Дата реєстрації

28.08.2009

Голова Державного департаменту
інтелектуальної власності

М.В.Паладій



ДОДАТОК Б
СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА:

1. Карташов А. В., Коробчинский К. П. Математические модели и информационные технологии компоновочного синтеза сферических конфигураций // Радіоелектронні і комп'ютерні системи : сб. науч. тр. / Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». Харьков, 2017. Вып. 4 (84). – С. 82–88.
2. Коробчинський К. П., Яковлев С. В. Вычислительные аспекты метода искусственного расширения пространства в задачах размещения гомотетичных объектов // Комп'ютерна математика : зб. наук. пр. / Інститут кібернетики ім. В. М. Глушкова НАН України. Київ, 2017. Вып. 2. – С. 118–126.
3. Яковлев С. В., Яськов Г. Н., Коробчинский К. П. О методах переменного радиуса в задаче упаковки шаров в контейнеры // Питання прикладної математики і математичного моделювання : зб. наук. пр. / Нац. ун-т ім. Олеса Гончара. Дніпро, 2017. Вып. 17. – С. 265–272.
4. Яковлев С. В., Карташов А. В., Коробчинський К. П. Об одном классе генетических алгоритмов в задачах оптимизации на комбинаторных конфигурациях // Бионика интеллекта : науч.-техн. журнал / Нац. ун-т радіоелектроніки ХНУРЕ. Харьков, 2017. Вып. 27. – С. 31–36.
5. Yakovlev S., Kartashov O., Korobchynskyi K. The Informational Analytical Technologies of Synthesis of Optimal Spatial Configuration. Proceedings of IEEE 13th International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT 2018). 2018. Vol. 2. – P. 140 – 143. *(Індексується в Scopus)*
6. Скоб Ю. А., Коробчинский К. П., Морозов Д. С., Шенцов В. В. Разработка алгоритма параллельных вычислений при решении задач газовой динамики // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии : сб. науч. тр. / Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». Харьков, 2009. Вып. 41. – С. 109–115.

7. Мазорчук М. С., Коробчинський К. П., Григор'єва Т. О. Формування банку тестових завдань на основі аналізу психометричних властивостей тестів в умовах малих популяцій досліджуваних. *Радіоелектронні і комп'ютерні системи* : сб. науч. тр. / Нац. аерокосм. ун-т ім. Н.Е. Жуковського «ХАИ». Харків, 2015. Вып. 4 (74). – С. 150–156.
8. Коробчинский К. П., Скоб Ю. А., Угрюмов М. Л., Шенцов В. В. Численная оценка последствий взрыва водорода в атмосфере. *Авиационно-космическая техника и технология* : сб. науч. тр. / Нац. аерокосм. ун-т ім. Н. Е. Жуковського «ХАИ». Харків, 2008. Вып. 1 (48). – С. 79–88.
9. Skob Yu. A., Ugryumov M. L., Korobchynskiy K. P., Shentsov V. V., Granovskiy E. A., Lyfar V. A. Numerical Modeling of Hydrogen Deflagration Dynamics in Enclosed Space // 3-nd International Conference on Hydrogen Safety (Ajaccio-Corsica, France, 2009). (ICHS Paper No. ID 182) 12p.
10. Коробчинский К. П., Морозов Д. С. Концепция распараллеливания вычислений // *Всеукраїнська науково-технічна конференція «Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні ІКТМ-2007»* : зб. тез доп. конф. / Нац. аерокосм. ун-т «Харк. авіац. ін-т», (Харків, 20 жовтня 2007 р.). Харків, 2007. – С. 146.
11. Коробчинский К. П., Пичугина О. С. Об особенностях решения задач оптимизации на перестановках. *Математичне та програмне забезпечення інтелектуальних систем* : Тези доповідей XIV Міжнародної науково - практичної конференції MPZIS – 2016 (Дніпро, 16 - 18 листопада 2016 р.). Дніпро. ДНУ, 2016. – С. 104–105.
12. Карташов А. В. Коробчинский К. П. Санин Ю. С. Об особенностях решения дискретно-континуальных задач с помощью специализированного пакета COIN-OR. *Free and Open Source Software* : VIII Всеукраїнська науково-практична конференція «Free and Open Source Software» FOSS-2016 (Харків. 22-24 листопада 2016 р.). Харків. 2016. – С. 43.
13. Пичугина О. С., Коробчинский К. П. Об одном подходе к условной оптимизации на сферически расположенных дискретных множествах.

Информатика и системные науки : VIII Всеукраинской научно-практической конференции "Информатика и системные науки", ПУЕТ (Полтава, Украина, 2017 р.). – С. 219.

14. Карташов А. В., Коробчинский К. П., Пичугина О. С. Особенности реализации генетических алгоритмов в задачах евклидовой комбинаторной оптимизации. Обчислювальний інтелект: зб. тез доп. IV Міжнар. наук.-практ. конф. (Київ, 16-18 травня 2017 р.). Київ. 2017. – С. 120–122.

15. Яковлев С. В., Карташов О. В., Коробчинський К. П. Метод змінних радіусів в задачі розміщення нерівних кіл // Інформаційні технології та комп'ютерне моделювання : зб. тез доп. міжнар. наук.-практ. конф. (11–16 вересня 2017 р., Івано-Франківськ). Івано-Франківськ. 2017. – С. 319–322.

16. Коробчинский К. П., Лаухін Н. С. Пакування нерівних куль у кулі методом змінного радіуса // Всеукраїнська науково-технічна конференція «Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні ІКТМ-2017» : зб. тез доп. наук.-техн. конф. / Нац. аерокосм. ун-т «Харк. авіац. ін-т» (Харків, 20 жовтня 2017 р.). Харків. 2017. – С. 127–128.

17. Коробчинский К. П., Сивак А. А. Об одном подходе решения задачи равновесной упаковки с учетом длины связывающей сети // Всеукраїнська науково-технічна конференція «Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні ІКТМ-2017» : зб. тез доп. конф. / Нац. аерокосм. ун-т «Харк. авіац. ін-т» (Харків, 20 жовтня 2017 р.). – С. 129.

18. Коробчинский К. П., Скрипка Б. Ю. О некоторых подходах к распараллеливанию вычислений в генетических алгоритмах // Всеукраїнська науково-технічна конференція «Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні ІКТМ-2017» : зб. тез доп. конф. / Нац. аерокосм. ун-т «Харк. авіац. ін-т» (Харків, 20 жовтня 2017 р.). – С. 144.

19. Карташов О. В., Коробчинский К. П., Яковлев С. В. Об одном классе задач равновесной упаковки с учетом зон запрета // Математичне та програмне забезпечення інтелектуальних систем (MPZIS-2017) : зб. тез. доп. XV Міжнар. наук.-практ. конф. (Дніпро, 22-24 листопада 2017 р.). – С. 83–85.

20. Яковлев С. В., Коробчинский К. П. Методы искусственного расширения пространства в задачах размещения гомотетичных объектов // Сучасна інформатика: проблеми, досягнення та перспективи розвитку : зб. тез доп. Міжнар. наукової конф. (Київ 13–15 грудня 2017 р.). Київ. 2017. – С. 171–172.
21. Kartashov O., Korobchynskiy K., Skrypka V. Some problems of optimization in the configuration space of spherical objects // Матеріали Двадцятого Міжнародного науково-практичного семінару «Комбінаторні конфігурації та їх застосування» (Кропивницький, 13-14 квітня 2018 р.). – С. 11–13.
22. Коробчинский К. П., Томина И. С., Песчаный В. С. Анализ методов сохранения объектов конфигурационного пространства // I Міжнародна науково-практична конференція ІТ-професіоналів та аналітиків комп'ютерних систем : зб. тез доп. міжнар. наук. -практ. конф. / Нац. аерокосм. ун-т «Харк. авіац. ін-т» (Харків, 24 – 26 квітня 2018 р.). – С. 55–57.
23. Коробчинський К. П., Рудик В. М. Перетворення структури даних в програмних системах при рішенні задач оптимізації // I Міжнародна науково-практична конференція ІТ-професіоналів та аналітиків комп'ютерних систем : зб. тез доп. міжнар. наук. -практ. конф. / Нац. аерокосм. ун-т «Харк. авіац. ін-т» (Харків, 24 – 26 квітня 2018 р.). – С. 57–58.
24. Скрипка Б. Ю., Коробчинский К. П. Использование параллельных вычислений в задачах упаковки шаровых объектов в контейнер с применением пакета IpOpt для решения задач оптимизации // I Міжнародна науково-практична конференція ІТ-професіоналів та аналітиків комп'ютерних систем : зб. тез доп. міжнар. наук. -практ. конф. / Нац. аерокосм. ун-т «Харк. авіац. ін-т» (Харків, 24 – 26 квітня 2018 р.). – С. 61–63.
25. Коробчинский К. П., Скрипка Б. Ю. О некоторых задачах оптимизации в конфигурационном пространстве сферических объектов // Математическое моделирование, оптимизация и информационные технологии : Материалы 6-й международной конференции. Кишинёв. 2018. – С. 359–362.

26. Комп'ютерна програма «Комп'ютерна інтерактивна система інженерного аналізу та прогнозу руху хімічно реагуючих газоповітряних сумішей в задачах промислової аеродинаміки та екології атмосфери «FIRE» / Скоб Ю. А., Угрюмов М. Л., Коробчинський К. П. : Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 30079 (Україна). – Дата реєстрації 28.08.2009.