МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ МОРСЬКИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

МАЛАКСІАНО МИКОЛА ОЛЕКСАНДРОВИЧ

УДК 005.4: 004.942: 656.6

ДИСЕРТАЦІЯ

ІННОВАЦІЙНО-ОРІЄНТОВАНЕ УПРАВЛІННЯ ПРОЕКТАМИ РОЗВИТКУ ІНФРАСТРУКТУРИ МОРСЬКОГО ТРАНСПОРТУ

05.13.22 – Управління проектами та програмами
(122 – Комп'ютерні науки та інформаційні технології)

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

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

М.О. Малаксіано

Науковий консультант:
доктор економічних наук, професор Інна Олександрівна Лапкіна

Одеса – 2020

АНОТАЦІЯ

Малаксіано М.О. Інноваційно-орієнтоване управління проектами розвитку інфраструктури морського транспорту. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.22 «Управління проектами та програмами» (122 – Комп'ютерні науки та інформаційні технології). – Одеський національний морський університет Міністерства освіти і науки України, Одеса, 2020.

Дисертація присвячена розробці нової методології інноваційно-орієнтованого управління проектами розвитку інфраструктури морського транспорту. Метою роботи є підвищення ефективності функціювання та розвитку інфраструктури морського транспорту шляхом створення методів та моделей, що формують нову методологію інноваційно-орієнтованого управління проектами. Об'єктом дослідження є процеси інноваційно-орієнтованого управління проектами розвитку інфраструктури морського транспорту. Предметом дослідження є методології, методи та моделі управління проектами інноваційного розвитку інфраструктури морського транспорту. При дослідженні використано: теорію систем і системного аналізу; теорію управління проектами і програмами; засоби математичного моделювання; методи багатокритеріального оцінювання; теорію випадкових процесів.

Розроблено концептуальну модель системи управління інноваційною діяльністю, яка дозволяє реалізувати переваги як класичних методів управління проектами, так і Agile методів. Запропоновано концепцію «інкубатора проектів», в рамках якої реалізовано нову структуру управління проектно-орієнтованою компанією, та концепцію «пісочниці». Оскільки реалізація інноваційних проектів пов'язана зі значними невизначеностями і ризиками, в роботі запропоновано, за аналогією з IT сферою, в теорії управління проектами називати «пісочницею» таку організацію доступу до

ресурсів компанії, при якій можна було б безпечно реалізовувати проекти, рівень ризику і невизначеності яких є неприпустимо високим за мірками стандартів, що прийняті в офісі управління проектами і програмами даної компанії. Отримали розвиток концепція «дозрівання інновації», в рамках якої реалізується управління передумовами своєчасної ініціації та успішної реалізації інноваційного проекту, та концепція «управління можливостями», в рамках якої реалізується диференційований підхід до управління невизначеністю інноваційних проектів: управління можливостями на початкових етапах «дозрівання» інноваційного проекту і перехід до управління ризиками на стадії ініціації і реалізації R&D проекту. Представлено порівняльний аналіз підходів до організації системи управління роботами в рамках інкубатора проектів і в рамках портфеля або програми R&D проектів. В роботі були досліджені різні варіанти побудови архітектури організації інкубатора проектів: дифузна, вузлова і матрична архітектура. Було запропоновано загальну схему переходу від ітеративних досліджень, що проводяться в рамках інкубатора проектів, до реалізації R&D проектів.

Розроблено метод управління послідовністю робіт, що виконуються в рамках інноваційних проектів, який дозволяє робити обґрунтований вибір такого порядку виконання робіт, при якому досягається збалансований мінімум значень середньої очікуваної тривалості та середніх очікуваних сумарних витрат проекту. Запропоновано методи обґрунтування оптимальних термінів впровадження проектів інноваційного розвитку інфраструктури морського транспорту з урахуванням морального і фізичного старіння обладнання.

Розроблено метод оцінювання динаміки середніх значень та коливань показників ефективності проектів модернізації та подальшого використання об’єктів інфраструктури морського транспорту, яка враховує випадкові змінення параметрів зовнішнього оточення, а також запропоновано метод обґрунтування стратегій модернізації об’єктів транспортної інфраструктури,

які скорочують ризики, що пов'язані з неповною визначеністю інтенсивності вантажопотоку.

Було вдосконалено модель усувного і неусувного зносу технічних засобів, на основі якої базуються методи оптимізації термінів операційної фази проектів створення та використання складних інноваційних технічних систем. Запропонована модель, в порівнянні з існуючими, використовує більш розвинені інструменти кількісного аналізу, що базуються на застосуванні апарату стохастичних диференційних рівнянь та статистичного моделювання.

Розроблено методи управління проектами інноваційного розвитку транспортної інфраструктури з урахуванням особливостей операційної фази. В тому числі запропоновано методи обґрунтування вибору проектів придбання і подальшого використання суден з врахуванням кон'юнктури фрахтового ринку та розроблено методи управління проектами інноваційного розвитку судноплавних компаній з урахуванням можливих режимів використання суден. Запропоновано метод обґрунтування вибору проекту поповнення флоту судноплавної компанії з урахуванням особливостей структури вантажопотоку, зважаючи на можливість експлуатації суден на різних швидкісних режимах.

Були запропоновані та проаналізовані підходи до створення СППР (систем підтримки прийняття рішень) щодо проектів розвитку інфраструктури морського транспорту з урахуванням умов навігації, змін структури вантажопотоку і ряду технологічних особливостей. Було запропоновано метод розробки СППР щодо проектів розвитку інфраструктури, який передбачає реалізацію механізмів внутрішньої координації проекту створення СППР та проекту обґрунтування параметрів об'єкта або комплексу об'єктів транспортної інфраструктури. Головні задачі, на вирішення яких спрямовані проекти створення відповідних СППР, зазвичай пов'язані з дослідженням стратегічних планів розвитку транспортної інфраструктури. Однак у більшості випадків розв'язання цих задач потребує урахування та глибокого аналізу ще й специфіки ряду процесів, керування якими має здійснюватися на

операційному рівні. Дослідження показали, що основні складнощі, що виникають при створенні СППР, як правило, стосуються реалізації алгоритмів управління процесами, які протікають саме на операційному рівні: моделювання динаміки приливів та відливів, складання оперативних графіків руху суден, оптимізації процесів прийняття рішень щодо вибору причалів та оперативного перерозподілу ресурсів стивідорних бригад, тощо. Завдяки реалізації відповідних алгоритмів, результати використання СППР дозволяють з високою точністю прогнозувати показники ефективності проектів розвитку інфраструктури при різних сценаріях змінення зовнішнього середовища та створити надійне підґрунтя для рішень, що приймаються.

Запропоновані методи та моделі управління проектами були використані на практиці та довели свою ефективність при реалізації проектів інноваційного розвитку транспортної інфраструктури в ряді українських та закордонних компаній. Результати досліджень впроваджені у діяльність корпорації Sellhorn Ingenieurgesellschaft GmbH (Німеччина), компанії Project Tender Information Service GmbH (Німеччина), компанії Inveni Portum Solutions GmbH (Німеччина), компанії Сігран (Україна), компанії Укррічфлот (Україна) та інших компаній. Також результати досліджень були впроваджені у навчальний процес Одеського національного морського університету. На основі запропонованих в дисертаційній роботі концепцій, методів і моделей було створено програмне забезпечення системи підтримки прийняття рішень для проекту розвитку інфраструктури логістичного центру Wrzesnia, Wielkopolska (Польща), 2016 р., та реалізовано програмне забезпечення системи підтримки прийняття рішень проекту розвитку RoRo терміналу порту Emden (Німеччина), 2017 р.

Отримані результати розвивають фундаментальні основи теорії проектного управління інноваційною діяльністю та мають наукове і практичне значення. Результати досліджень дозволяють розширити і конкретизувати теоретичні положення щодо організації системи управління проектами інноваційного розвитку інфраструктури морського транспорту, узагальнити та

доповнити науково-теоретичні і практичні знання в області проектного менеджменту.

Ключові слова: управління проектами, інновації, проекти розвитку транспортної інфраструктури, дослідницькі проекти, інноваційна діяльність, системи підтримки прийняття рішень, морська інфраструктура, проекти розвитку судноплавних компаній.

ABSTRACT

Malaksiano M.O. Innovation-oriented management of maritime transport infrastructure development projects. – Manuscript.

Dissertation for obtaining the scientific degree of the doctor of technical sciences in the specialty 05.13.22 «Project and Program Management» (122 – Computer Science and Information Technology). – Odessa National Maritime University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Odessa, 2020.

The dissertation is devoted to the elaboration of a new methodology of innovation-oriented management of maritime transport infrastructure development projects. The aim of the work is to increase the efficiency of the functioning of the maritime transport infrastructure by creating methods and models that form a new methodology of innovation-oriented project management. The object of the research is the processes of innovation-oriented project management for the development of maritime transport infrastructure. The subject of the research is the methodology, methods and models of project management for the innovative development of maritime transport infrastructure. The research is based on the theory of systems and system analysis; theory of project and program management; mathematical modeling methods; multicriteria evaluation methods; theory of random processes.

A conceptual model of the innovation management system has been developed, which allows to implement the advantages of both classical project management methods and Agile methods. The concept of "project incubator" has been introduced, within the framework of which a new management structure of a

project-oriented company is implemented, and the "sandbox" concept has been proposed within the framework of which the control of access to resources of a project-oriented company is being realized. Since the implementation of innovative projects is associated with significant uncertainties and risks, it is proposed, by analogy with the IT sphere, in the theory of project management to name a "sandbox" such an arranging of access to the company's resources, which would provide safe environment to implement the projects for which level of uncertainty and risk is unacceptably high according to the company standards. The "maturation of innovation" and "opportunity management" concepts have been developed also. The concept of "maturation of innovation" refers to the management of the prerequisites for the timely initiation and successful implementation of an innovative project. The concept of "opportunity management" is a concept within which a differentiated approach to managing the uncertainty of innovative projects is implemented implying management of opportunities at the initial stages of maturation of an innovative project and transition to risk management at the stage of initiation and implementation of the appropriate R&D project. A comparative analysis is performed for the management systems within a project incubator and within a portfolio or program of R&D of projects. The various options for building the architecture of the project incubator were explored: diffuse, nodal and matrix architectures. The general scheme for the transition from iterative research carried out within the framework of a project incubator to the implementation of the R&D projects was proposed.

The method of optimal scheduling has been developed for activities carried out within the framework of innovative projects, which provides a balanced minimum of the mean expected duration and the average expected total cost of the project.

The methods of substantiation of the optimal initiation time for the projects of innovative development of the sea transport infrastructure were elaborated, taking into account wear and tear and obsolescence of the equipment. The method for estimating the dynamics of average values and fluctuations in performance

indicators was developed for the projects of modernization of the maritime transport infrastructure, which takes into account random fluctuations in the parameters of the external environment. The method for the substantiating the renovating strategies for sea transport infrastructure facilities was proposed which allowed to reduce the risks associated with the uncertainty of the freight traffic intensity. The model of removable and irreparable wear and tear of technical means was developed. This model, in comparison with the existing ones, uses more advanced quantitative analysis tools based on the stochastic differential equations and statistical modeling methods. On the basis of the developed model, the methods of scheduling for operational phase have been developed for projects of creation of the complex innovative technical systems.

The methods for managing projects for innovative development of transport infrastructure objects have been proposed, considering the specifics of the operation stage. In particular, methods for justifying the choice of a vessel acquisition project were developed taking into account the conjuncture of the freight market. On this basis, project management methods have been introduced for the innovative development of shipping companies considering the possibility of using vessels in different modes. The method for substantiating the choice of a project for replenishing the fleet of a shipping company is proposed taking into account the peculiarities of the structure of cargo traffic and using possibility to operate vessels at different speeds.

Approaches to the creation of DSS (decision support systems) for projects of the maritime transport infrastructure development were proposed and analyzed, taking into account the navigation conditions, changes in the structure of freight traffic and the number of technological features. The method for developing a DSS for infrastructure projects was introduced, which provides the implementation of mechanisms for internal coordination of a project for creating a DSS and a project for justifying the parameters of an object or a complex of transport infrastructure objects. The main tasks to be solved by the projects of creating appropriate DSS are usually related to the study of strategic plans for the transport infrastructure

advanced growth. However, in most cases, solving these strategic level problems requires consideration and in-depth analysis of the specifics of a number of processes that must be managed at the operational level. Studies have shown that the main difficulties that arise when creating a DSS, as a rule, relate to the implementation of algorithms for optimal control of processes that occur at the operational level: modeling the dynamics of tides, drawing up operational schedules for the optimal movement of vessels, optimizing decision-making processes for berths and stevedoring brigades allocation etc. Relying on the implementation of the appropriate algorithms, the developed DSSs allow to predict with high accuracy the performance indicators of infrastructure development projects under various scenarios of changing the external environment and create a reliable basis for decisions that are made.

The proposed methods and models of project management have been used in practice and their effectiveness has been proven by the implementation of projects for the innovative development of transport infrastructure in a number of companies in Ukraine and abroad. The results of the research were implemented into practice at Sellhorn Ingenieurgesellschaft GmbH (Germany), Project Tender Information Service GmbH (Germany), Inveni Portum Solutions GmbH (Germany), Sigran (Ukraine), Ukrrichflot (Ukraine) and other companies. Also, the research results were implemented into the educational process at the Odessa National Maritime University. Based on the concepts, methods and models proposed in the dissertation, software was created for the decision support system for the project of infrastructure development for the logistics center Wrzesnia, Wielkopolska (Poland), 2016, and the decision support system was designed for the infrastructure development project for the RoRo terminal at the port of Emden (Germany), 2017.

The obtained results are of scientific and practical significance for the development of the fundamental basics of the theory of management of innovative projects. The results of the research allow to expand and specify the theoretical provisions for the organization of the project management system of innovative

development of maritime transport infrastructure, to summarize and supplement scientific, theoretical and practical knowledge in the field of project management.

Keywords: project management, innovations, transport infrastructure development projects, research projects, innovation activities, decision support systems, maritime infrastructure, shipping companies' development projects.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Монографії:

1. Малаксіано М.О. Моделювання складних систем: Монографія [Текст] / В.М. Соловйов, В.В. Вітлінський, М.О. Малаксіано та ін. За заг. ред. В.М. Соловйова. – Черкаси: Видавець Третьяков О.М., 2015. – 352 с. *Автором написано розділ 2.6.*

2. Малаксіано М.О. Проектний та логістичний менеджмент: нові знання на базі двох методологій. Том 1: Монографія [Текст] / С.В. Руденко, І.О. Лапкіна, Т.А. Ковтун, А.В. Бондар, В.Ю. Смрковська, М.О. Малаксіано та ін. За заг. ред. І.О. Лапкіної. – Одеса: Купрієнко СВ, 2018. – 188 с. *Автором розроблено метод підвищення стійкості показників ефективності проектів оновлення обладнання.*

3. Малаксіано М.О. Сучасні тенденції розвитку регіонів та галузей народного господарства [Текст] / Л.М. Савчук, Л.М. Бандоріна, М.О. Малаксіано та ін. за ред. Л.М. Савчук, Л.М. Бандоріної. – Дніпро: Пороги, 2018. – 348 с. *Автором запропоновано метод визначення термінів поновлення складного обладнання.*

4. Malaksiano M. Relevant issues of development and modernization of the modern science: the experience of countries of Eastern Europe and prospects of Ukraine: monograph [Text] / T. Bilushchak, Z. Myna, V. Bondarchuk, I. Lapkina, M. Malaksiano and others. – Riga, Latvia: Baltija Publishing, 2018. – 434 p.

Автором запропоновано метод визначення оптимального часу завершення проекту придбання та використання складного обладнання з урахуванням нестабільності рівня його завантаження.

5. Малаксіано М.О. Проектний та логістичний менеджмент: нові знання на базі двох методологій. Том 2: Монографія [Текст] / І.О. Лапкіна, В.О. Андриєвська, В.Ю. Смрковська, М.О. Малаксіано та ін. За заг. ред. І.О. Лапкіної. – Одеса: Купрієнко СВ, 2019. – 242 с.

Автором розроблено метод обґрунтування оптимальних термінів початку та завершення проектів придбання та використання об'єктів транспортної інфраструктури з врахуванням фізичного та морального старіння.

6. Rudenko S. Development of Scientific Schools of Odessa National Maritime University [Text] / S. Rudenko, A. Shakhov, M. Malaksiano and others. – Riga, Latvia: Baltija Publishing, 2020. – 490 p.

Автором запропоновано метод створення систем підтримки прийняття рішень щодо розвитку інфраструктури морського транспорту, який на відміну від існуючих методів, орієнтований на створення та використання інтелектуальних алгоритмів управління технологічними процесами.

Статті в міжнародних та національних фахових виданнях:

7. Lapkina I. Elaboration of the equipment replacement terms taking into account wear and tear and obsolescence [Text] / I. Lapkina, M. Malaksiano // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2018. – Vol. 3, No. 3 (93). – P. 30–39.

*База(и): **SCOPUS** та інші. Автором розроблено метод обґрунтування оптимальних термінів реалізації проектів розвитку інфраструктури морського транспорту, зважаючи на динаміку рівня фізичного та морального зносу.*

8. Malaksiano M. Effectiveness assessment of non-specialized vessel acquisition and operation projects, considering their suitability for oversized cargo transportation [Text] / M. Malaksiano, O. Melnyk // Transactions on Maritime Science, 2020. – Vol. 9, No. 1. – P. 23–34.

*База(и): **SCOPUS** та інші. Автору належить розробка метода оцінки проектів поповнення флоту судноплавної компанії, зважаючи на особливості їх операційної фази.*

9. Lapkina I. Estimation of fluctuations in the performance indicators of equipment that operates under conditions of unstable loading [Text] / I. Lapkina, M. Malaksiano // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2018. – Vol. 1, No. 3 (91). – P. 22–29.

*База(и): **SCOPUS** та інші. Автором запропоновано метод та математичну модель, які дозволяють кількісно оцінювати рівень коливань значень показників ефективності проектів будівництва та використання об'єктів інфраструктури морського транспорту, що функціонують в умовах мінливого, неповністю передбачуваного рівня завантаження.*

10. Malaksiano N.A. On the stability of economic indicators of complex port equipment usage [Text] / N.A. Malaksiano // Actual Problems of Economics, 2012. –Issue 12. – P. 226–233.

*База(и): **SCOPUS** та інші.*

11. Lapkina I.O. Modelling and optimization of perishable cargo delivery system through Odesa port [Text] / I.O. Lapkina, M.O. Malaksiano // Actual Problems of Economics, 2016. – Issue 3. – P. 353–365.

*База(и): **SCOPUS** та інші. Автором розроблено метод обґрунтування оптимальних режимів функціювання системи доставки швидкопсувних вантажів через Одеський морський порт з урахуванням фактору невизначеності.*

12. Lapkina I. Design and optimization of maritime transport infrastructure projects based on simulation modeling [Text] / I. Lapkina, M. Malaksiano, Y. Savchenko // Proceedings of the 1st International Workshop IT Project Management (ITPM 2020). Slavsko, Lviv region, Ukraine, February 18-20, 2020. – P. 36–45.

*База(и): **SCOPUS** та інші. Автором запропоновано метод створення систем підтримки прийняття рішень щодо проектів розвитку інфраструктури морських терміналів з врахуванням особливих умов навігації.*

13. Lapkina I.O. Optimization of the structure of sea port equipment fleet under unbalanced load [Text] / I.O. Lapkina, M.O. Malaksiano, M.O. Malaksiano // Actual Problems of Economics, 2016. – Issue 9. – P. 364–371.

*База(и): **SCOPUS** та інші. Автором розроблено математичну модель функціювання морських терміналів, що дає можливість робити обґрунтовані висновки щодо вибору оптимальної структури парків перевантажувального обладнання морських зернових терміналів.*

14. Lapkina I. To the issue of the possibility of operating vessels at slow speeds [Text] / I. Lapkina, M. Malaksiano, V. Glavatskih // Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки, 2019. – Т. 30(69), Ч. 2, № 4. – С. 134–140. *База(и): Index Copernicus. Автором запропоновано метод оцінки показників ефективності роботи суден, зважаючи на можливість застосування різних режимів їх використання.*

15. Лапкина И.А. Многокритериальный подход к обоснованию выбора проекта приобретения и эксплуатации судна-балкера [Текст] / И.А. Лапкина, Н.А. Малаксиано, В.И. Главатских // Транспортные системы и технологии, 2019. – Т. 2. № 33. – С. 99–110. *Автору належить розробка моделі багатокритеріальної оцінки ефективності проектів придбання та використання суден-балкерів.*

16. Лапкина И.А. О выборе судна с учетом изменений конъюнктуры фрахтового рынка и цены на топливо [Текст] / И.А. Лапкина, Н.А. Малаксиано // Вісник Одеського національного морського університету: збірник наукових праць, 2019. – Вип. 1(58). – С. 184–198. *Автором розроблено метод вибору проекту придбання та використання судна з врахуванням кон'юнктури фрахтового ринку і ціни на пальне.*

17. Malaksiano M. Vessel selection prospects and suitability assessment for oversized cargo transportation [Text] / M. Malaksiano, O. Melnyk // Вчені записки ТНУ ім. В.І. Вернадського, 2020. – Т. 31 (70), Ч. 2, № 1, – С. 135–140.

Автором розроблено модель, що дозволяє оцінювати ефективність проектів придбання та використання суден для перевезень негабаритних вантажів.

18. Малаксіано М.О. Обґрунтування вибору судна для фрахтування на умовах тайм-чартеру з урахуванням можливості його використання для перевезень негабаритних вантажів [Текст] / М.О. Малаксіано, О.М. Мельник // Вісник Вінницького політехнічного інституту, 2020 – № 1. – С. 90–96. *Автором запропоновано метод, що дозволяє оцінювати ефективність роботи суден, які фрахтуються на умовах тайм-чартеру з урахуванням специфіки структури вантажопотоку.*

19. Малаксіано М.О. Методика обґрунтування вибору неспеціалізованих суден з врахуванням можливості їх використання для перевезень негабаритних і важковагових вантажів та експлуатації на уповільнених швидкостях [Текст] / М.О. Малаксіано, О.М. Мельник // Наукові вісті Далівського університету, 2020. – № 18. http://nvdu.snu.edu.ua/wp-content/uploads/2020/02/2020-18-11.pdf *Автором розроблена модель обґрунтування вибору неспеціалізованих суден з врахуванням специфіки структури вантажопотоку та можливості використання суден на різних швидкісних режимах.*

20. Лапкина И.А. О повышении устойчивости показателей эффективности при планировании сроков обновления сложного оборудования [Текст] / И.А. Лапкина, Н.А. Малаксиано // Вісник Одеського національного морського університету: збірник наукових праць, 2018. – Вип. 1 (54). – С. 207–217. *Автором розроблено методи оцінки показників ефективності проектів придбання та використання складного портового обладнання та обґрунтування стратегій модернізації об’єктів транспортної інфраструктури, що скорочують ризики, пов'язані з неповною визначеністю інтенсивності вантажопотоку.*

21. Лапкіна І.О. Проектування та оптимізація транспортних систем з використанням методів імітаційного моделювання [Текст] / І.О. Лапкіна, М.О. Малаксіано, Є.С. Савченко // Вісник Одеського національного морського

університету: збірник наукових праць, 2018. – Вип. 3 (56). – С. 80–91. *Автором розроблено метод створення систем підтримки прийняття рішень відносно проектів розвитку інфраструктури портів з урахуванням змін структури вантажопотоку.*

22. Лапкина И.А. Определение сроков замены оборудования с учетом износа и изменений его рыночной стоимости [Текст] / И.А. Лапкина, Н.А. Малаксиано // Вісник Одеського національного морського університету: збірник наукових праць, 2018. – Вип. 4 (57). – С. 188–201. *Автором запропоновано метод обґрунтування термінів закінчення проектів придбання та використання обладнання з урахуванням динаміки рівня його зносу.*

23. Malaksiano M. On optimization of the management system of an innovation-oriented organization [Text] / M. Malaksiano // The scientific heritage, 2020. – No. 52, Vol. 1. – P. 47–51. *База(и): Index Copernicus, IJIFACTOR, CYBERLENINCA, ISSUU, Elibrary, Cosmos, Quality Factor, Calameo, SlideShare, ISI.*

24. Малаксиано А.А. О соотношении загрузки и пропускной способности морского грузового фронта совокупности взаимозаменяемых причалов / А.А. Малаксиано, Н.А. Малаксиано [Текст] // Вісник ОНМУ: Зб. наук. праць, 2004. – Вип. 13. – С. 144–156. *Автору належить розробка математичної моделі та метода оцінки показників ефективності та стійкості роботи морських терміналів.*

25. Malaksiano M. Improving the organization of the tug fleet operations [Text] / M. Malaksiano // Sciences of Europe, 2020. – No. 56. – Vol. 1. – P. 57–61. *База(и): CiteFactor, Index Copernicus, IJIFACTOR, CYBERLENINCA, Elibrary.*

26. Biloshchytska S., Bondar A., Bushuev S., Malaksiano M. Structure of the project-oriented organization energy entropy [Text] / S. Biloshchytska, A. Bondar, S. Bushuev, M. Malaksiano // Scientific Journal of Astana IT University, 2020. – No. 3. – P. 28–34. *База(и): Index Copernicus, Base, Applied Science & Technology Source. Автору належить розрахунок енергетичних характеристик проектів.*

27. Malaksiano M. On managing innovative development within project-oriented companies [Text] / M. Malaksiano // Danish Scientific Journal, 2020. – No. 41, Vol. 1. – P. 56–62. База(и): Elibrary, IJIFACTOR, ISSUU, Calameo, Journal Factor, Cosmos, SIS.

28. Malaksiano M. On the organization of the structure of innovative developments management within the framework of project-oriented companies [Text] / M. Malaksiano // The scientific heritage, 2020. – No. 53, Vol. 1. – P. 48–53. *База(и): Index Copernicus International, IJIFACTOR, CYBERLENINCA, ISSUU, Elibrary, Cosmos, Quality Factor, Calameo, SlideShare, ISI.*

29. Малаксиано Н.А. Об оптимизации порядка выполнения работ, проводимых в рамках проекта [Текст] / Н.А. Малаксиано // Scientific discussion, 2020. – No. 48, Vol. 1. – P. 41–46. *База(и): IJIFACTOR, SIS, DIIF, Index Copernicus.*

30. Малаксиано Н.А. Оптимизация работы морских зерновых терминалов [Текст] / Н.А. Малаксиано, И.А. Горчинский // Slovak international scientific journal, 2020. – No. 46, Vol. 1. – P. 13–16. *База(и): IIJIF, SIS, CiteFactor, Index Copernicus.*

Праці апробаційного характеру і роботи, що додатково відображають наукові результати дисертації:

31. Малаксиано Н.А. Использование многокритериальных оценок для уменьшения рисков при планировании ремонтов и замен сложного портового оборудования, функционирующего в условиях неполностью определенного грузопотока [Текст] / Н.А. Малаксиано // Методи та засоби управління розвитком транспортних систем: зб. наук. праць. ОНМУ, 2013. – № 1 (20). – С. 7 – 27.

32. Малаксиано Н.А. О влиянии уровня занятости портового оборудования на динамику его износа [Текст] / Н.А. Малаксиано // Методи та

засоби управління розвитком транспортних систем: зб. наук. праць ОНМУ, 2012. – № 19. – С. 7 – 19.

33. Малаксіано М.О. Вибір стратегії ремонтів і замін складного обладнання, що функціонує в умовах непостійної зайнятості [Текст] / М.О. Малаксиано // Вісник Хмельницького національного університету, 2013. – Вип. 1. – С. 215 – 221.

34. Малаксиано Н.А. Об оптимальных сроках ремонтов сложного портового оборудования [Текст] / Н.А. Малаксиано // Вісник Дніпропетровського університету. Серія: Економіка, 2012. – Вип. 6(3). – С. 186–195.

35. Малаксиано Н.А. О планировании оптимальных сроков ремонтов и замен сложного портового оборудования при неполностью определенном прогнозе уровня занятости [Текст] / Н.А. Малаксиано // Економічна кібернетика, 2012. – № 4–6 (76–78). – С. 49–56. *База(и): Index Copernicus*

36. Малаксиано Н.А. О моделировании физического износа портового оборудования в условиях непостоянной занятости [Текст] / Н.А. Малаксиано // Економіка та управління підприємствами машинобудівної галузі: проблеми теорії та практики: зб. наук. праць. НАУ ім. М.Є. Жуковського, 2011. – №4 (16). – С. 74 – 87. *База(и): Index Copernicus*

37. Лапкина И.А. Об определении оптимальных сроков начала инновационных проектов создания объектов транспортной инфраструктуры [Текст] / И.А. Лапкина, Н.А. Малаксиано // Матеріали XVI Міжнародної науково-практичної конференції «Управління проектами: стан та перспективи». – Миколаїв, НУК, 2020. – С. 68-71. *Автором запропоновано метод визначення оптимальних термінів початку інноваційних проектів створення об'єктів транспортної інфраструктури.*

38. Малаксіано М.О. Про оптимізацію термінів оновлення морської транспортної інфраструктури [Текст] / Малаксіано М.О. // Матеріали міжнародної наукової конференції «Проблеми та перспективи реалізації та

впровадження міждисциплінарних наукових досягнень», Київ, 12 червня 2020. – С. 61–63.

39. Malaksiano M. Non-specialized vessel acquisition and operation projects, considering their suitability for oversized cargo transportation [Text] / M. Malaksiano // Tendenze attuali della moderna ricerca scientifica: der Sammlung wissenschaftlicher Arbeiten «ΛΌΓΟΣ» zu den Materialien der internationalen wissenschaftlich-praktischen Konferenz (B. 3), 5. Juni, 2020. Stuttgart, Deutschland: Europäische Wissenschaftsplattform. – P. 79–83.

40. Малаксиано Н.А. Об использовании неспециализированных судов для перевозок негабаритных грузов на замедленных скоростях [Текст] / Н.А. Малаксиано // Стратегічні напрямки розвитку науки: фактори впливу та взаємодії: матеріали міжнародної наукової конференції (Т. 2), 22 травня, 2020. – Суми, Україна: МЦНД. – С. 42–45.

41. Malaksiano M. Substantiation of non-specialized vessel choice for oversized cargo shipments [Text] / M. Malaksiano // Public communication in science: philosophical, cultural, political, economic and IT context: Collection of scientific papers «ΛΌΓΟΣ» Proceedings of the International Scientific and Practical Conference (Vol. 2), May 15, 2020. – Houston, USA: European Scientific Platform. – P. 46–49.

42. Малаксиано Н.А. Оптимизация сроков замены старого оборудования на оборудование нового типа на основе многокритериального подхода [Текст] / Н.А. Малаксиано // Научные исследования: парадигма инновационного развития: сборник тезисов научных трудов III Международной научной конференции (Братислава–Вена, «26» мая 2020 года) / ГО «Международный научный центр развития науки и технологий», 2020. – С. 68–71.

43. Лапкина И.А. Обоснование сроков замены старого оборудования на оборудование нового типа с учетом фактора неопределенности [Текст] / И.А. Лапкина, Н.А. Малаксиано // Тезисы XXXIV Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы современной науки».

Санкт–Петербург–Астана–Киев–Вена, 28 сентября, 2018. – С. 38–42. *Автором запропоновано метод обґрунтування тривалості проектів придбання та використання обладнання.*

44. Малаксиано Н.А. Определение сроков замены старого оборудования на оборудование нового типа [Текст] / Малаксиано Н.А. // Тезисы XXXIII Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы современной науки». Москва–Астана–Харьков–Вена, 30 августа, 2018. – С. 39–43.

45. Малаксиано Н.А. О повышении устойчивости показателей работы оборудования [Текст] / Малаксиано Н.А. // Тезисы XXXII Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы современной науки». Санкт–Петербург–Астана–Киев–Вена, 31 июля, 2018. – С.25–28.

46. Лапкина И.А. Использование методов имитационного моделирования для оценки пропускной способности морского терминала [Текст] / И.А. Лапкина, Н.А. Малаксиано // Транспорт і логістика: проблеми та рішення: Збірник наукових праць за матеріалами VIII-ї Міжнародної науково-практичної конференції. Сєвєродонецьк − Одеса − Вільнюс − Київ, 23-25 травня 2018. Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля, Одеський національний морський університет – Одеса : КУПРІЄНКО СВ, 2018. – С. 34–35. *Автором запропоновано метод оцінки пропускної здатності морського терміналу.*

47. Лапкіна І.О. Про забезпечення стійкості показників ефективності роботи обладнання в умовах мінливого завантаження [Текст] / І.О. Лапкіна, М.О. Малаксіано // Збірник статей науково-інформаційного центру «Знання» за матеріалами XXXIV міжнародної науково-практичної конференції: «Розвиток науки в XXI столітті» 1 частина, г. Харків: збірник зі статтями (рівень стандарту, академічний рівень). – Харків: науково-інформаційний центр «Знання», 2018. – С. 46–49. *Автором розроблено математичну модель роботи обладнання в умовах мінливого завантаження.*

48. Horchynskyi I.O. The analysis of required capacity for the ukrainian grain cargo terminals [Text] / Horchynskyi I. O., Malaksiano M. O. // International Scientific Conference Anti-Crisis Management: State, Region, Enterprise: Conference Proceedings, Part III, November 17th, 2017. Le Mans, France: Baltija Publishing, 2017. – P. 136–137. *Автором виконано аналіз сучасного стану організації перевантажування зерна в українських портах.*

49. Malaksiano N.A. Selection of efficientcy based speed of ship's operation [Text] / N.A. Malaksiano, T.V. Cuzmina // Materialy XIII Miedzynarodowej naukowi-praktycznej konferencji, «Wykształcenie i nauka bez granic» 07–15 grudnia. Vol. 12. Techniczne nauki. Przemyśl. Nauka i studia, 2017. – P. 50–52. *Автором виконано аналіз шляхів підвищення конкурентоспроможності судноплавних компаній.*

50. Malaksiano M.O. The analysis of stability for the projects of purchase of the bulk-carrier vessels for grain cargo transportations [Text] / M.O. Malaksiano, K.O. Nizamova // Materials of the XIII International scientific and practical conferencee. Conduct of modern science -2017. November 30 – December 7., Vol. 7. Science and Education Ltd, Sheffield. Great Britain, 2017. – P. 16–18. *Автором виконано аналіз шляхів підвищення ефективності роботи флоту судноплавних компаній.*

51. Лапкина И.А. Моделирование и оптимизация системы доставки скоропортящихся грузов [Текст] / И.А. Лапкина, Н.А. Малаксиано // Тези доповідей II Міжнародної наукової конференції «Соціальні трансформації: сім'я, шлюб, молодь, транспорт та інноваційний менеджмент у країнах нового шовкового шляху». – Одеса, 24-26 квітня, 2017. – С. 46–48. *Автором запропоновано метод обґрунтування оптимальних режимів функціювання системи доставки швидкопсувних вантажів.*

52. Малаксіано М.О. Дослідження стійкості показників ефективності проекту придбання судна [Текст] / М.О. Малаксіано, Д.О. Ткаченко // Тези доповідей IV Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів та молодих вчених «Проблеми та перспективи розвитку транспорту». – Одеса, 17

квітня, 2015. – С. 74–75. *Автором запропоновано метод оцінки стійкості показників ефективності проекту.*

53. Малаксіано М.О. Аналіз стійкості проекту придбання судна для перевезень експортних вантажів [Текст] / М.О. Малаксіано, Д.О. Ткаченко // Тези доповідей 68 студентської науково-технічної конференції ОНМУ. – Одеса, 14–17 квітня, 2015. – С. 158–159. *Автором запропоновано модель змінення показників ефективності проекту.*

54. Малаксиано Н.А. О повышении устойчивости экономических показателей при планировании сроков ремонтов и замен оборудования, используемого в условиях неполностью прогнозируемого уровня его занятости [Текст] / Малаксиано Н.А. // Інформаційні технології та моделювання в економіці: збірник наукових праць VI Міжнародної науково-практичної конференції. – Черкаси, 20–22 травня, 2015. – Черкаси: видавець Третьяков О.М., 2015. – С. 139–142.

55. Малаксиано Н.А. О долгосрочном планировании сроков ремонтов и замен сложного оборудования, используемого в условиях неполностью прогнозируемого уровня загрузки [Текст] / Малаксиано Н.А. // Конкурентоспроможність як основа розвитку економіки в сучасних умовах: збірник тез наукових робіт учасників Міжнародної науково-практичної конференції. – Одеса, 19–20 вересня, 2014. ГО «Центр економічних досліджень та розвитку». – О.: ЦЕДР, 2014. – С. 67–68.

56. Малаксиано Н.А. Оценка устойчивости экономических показателей использования сложного портового оборудования [Текст] / Малаксиано Н.А. // Проблеми економіки та менеждменту: оцінка та перспективи вирішення: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції. Львів, 26–27 вересня 2014. ГО «Львівська еконмічна фундація». – Львів: ЛЕФ, 2014. – Ч.2. – С. 27–30.

57. Малаксиано Н.А. Построение долгосрочных экономически обоснованных планов ремонтов и замен сложного портового оборудования [Текст] / Малаксиано Н.А. // Теоретичні та практичні аспекти розвитку

національної економіки в умовах глобальної нестабільності: збірник тез Міжнародної науково-практичної конференції для студентів, аспірантів та молодих учених, 19-20 вересня, 2014. – К.: «Нова економіка», 2014. – С. 83–85.

58. Малаксиано Н.А. Экономически обоснованное планирование сроков ремонтов и замен оборудования с использованием многокритериальных оценок [Текст] / Малаксиано Н.А. // Економічний розвиток держави та регіонів в умовах трансформаційних змін: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції, 26–27 вересня,2014. – Дніпропетровськ: НО «Перспектива», 2014. – С. 103–104.

59. Малаксиано Н.А. Об устойчивости экономических показателей использования сложного оборудования [Текст] / Малаксиано Н.А. // Ефективне управління економікою: процеси, явища, ризики. Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції, 13–14 червня, 2014. – Черкаси: Видавничій дім «Гельветика», 2014. – С. 10–12.

60. Малаксиано Н.А. О повышении устойчивости экономических показателей при планировании сроков ремонтов и замен оборудования [Текст] / Малаксиано Н.А. // Сучасні тенденції в економіці та управлінні: новий погляд: збірник матеріалів V Міжнародної науково-практичної конференції, 13–14 червня, 2014. Східноукраїнський інститут економіки та управління. – Донецьк: ГО «СІЕУ», 2014. – Ч.2. – С. 106–108.

61. Малаксиано Н.А. Многокритериальная оптимизация стратегий ремонтов и замен оборудования, функционирующего в условиях неполностью определенного уровня загрузки [Текст] / Малаксиано Н.А. // Материалы X международной научно-практической конференции «Экономическое прогнозирование: модели и методы», 5-7 июня, 2014. – Воронеж: Издательско-полиграфический центр «Научная книга», 2014. – С. 266–269.

62. Малаксиано Н.А. Использование многокритериальных оценок для планирования ремонтов и замен оборудования при неполностью определенном прогнозе уровня загрузки [Текст] / Малаксиано Н.А. //

Інформаційні управляючі системи та технології (ІУСТ-Одеса-2013): Матеріали міжнародної науково-практичної конференції. – Одеса: «ВидавІнформ» ОНМА, 2013. – С. 97–99.

63. Малаксиано Н.А. Планирование ремонтов и замен портового оборудования при неполностью определенном прогнозе уровня загрузки [Текст] / Малаксиано Н.А. // Тези доповідей п'ятої Міжнародної наково-практичної конференції «Сучасні порти – проблеми та рішення», Іллічівськ, 02–09 червня, 2013. – С. 65–67.

64. Малаксиано Н.А. О планировании сроков ремонтов и замен сложного портового оборудования при неполностью определенном уровне загрузки [Текст] / Малаксиано Н.А. // Тези доповідей V Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні проблеми моделювання соціально-економічних систем», Харків, 11 – 12 квітня, 2013. – С. 258–261.

65. Малаксиано Н.А. Об уменьшении уровня неопределенности при планировании ремонтов и замен оборудования, функционирующего в условиях неполностью определенной загрузки [Текст] / Малаксиано Н.А. // Materiály IX mezinárodní vědecko - praktická konference «Věda a technologie: krok do budoucnosti – 2013». 27 února - 05 březen 2013 roku- Díl 5. Ekonomické vědy: Praha. Publishing House «Education and Science» s.r.o. – P. 61–63.

66. Малаксиано Н.А. Определение оптимальных сроков ремонтов и замен сложного портового оборудования при неполностью определенном прогнозе уровня загрузки [Текст] / Малаксиано Н.А. // Материали за 9-а международна научна практична конференция «Бъдещите изследвания», 17–25 февруари, 2013. – Том 5. Икономики. – София. «Бял ГРАД-БГ» ООД, 2013. – С. 35–37.

67. Малаксиано Н.А. Анализ устойчивости экономических показателей использования сложного портового оборудования [Текст] / Малаксиано Н.А. // Материали за 9-а международна научна практична конференция «Настощи изследвания и развитие», 17–25 януари 2013. – София, Болгария. «Бял ГРАД-БГ» ООД, 2013. – С. 72–74.

68. Малаксиано Н.А. Планирование оптимальных сроков ремонтов и замен сложного портового оборудования при неполностью определенном прогнозе уровня занятости [Текст] / Малаксиано Н.А. // Анализ, моделирование и прогнозирование экономических процессов: материалы IV Международной научно-практической конференции, 15 декабря 2012 – 15 февраля 2013. – Воронеж: Изд-во ЦНТИ, 2012. – С. 168–171.

69. Малаксиано Н.А. Об оптимальных сроках ремонтов портового оборудования [Текст] / Малаксиано Н.А. // Тези доповідей. XVII Всеукраїнська науково-методична конференція „Проблеми економічної кібернетики“, Одеса. –12–14 вересня, 2012. – С. 277–278.

70. Малаксиано Н.А. Об оценке влияния уровня занятости портового оборудования на динамику его физического износа [Текст] / Малаксиано Н.А. // Современные порты – проблемы и решения: тезисы докладов четвертой международной научно-практической конференции, 26 апреля – 3 мая 2012. – Одесса: ОНМУ, 2012. – С. 121–122.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ 30
ВСТУП 31
РОЗДІЛ 1. ДОСЛІДЖЕННЯ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ТА МОДЕЛЕЙ УПРАВЛІННЯ ПРОЕКТАМИ ІННОВАЦІЙНОГО РОЗВИТКУ ІНФРАСТРУКТУРИ МОРСЬКОГО ТРАНСПОРТУ 38
1.1. Аналіз існуючих підходів, методів та моделей управління інноваційними проектами та показники впровадження інновацій в Україні 38
1.2. Дослідження сучасних підходів до управління проектами розвитку інфраструктури морського транспорту та перспективи їх впровадження в Україні 57
1.3. Висновки до першого розділу 66
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА КОНЦЕПТУАЛЬНОЇ МОДЕЛІ УПРАВЛІННЯ ІННОВАЦІЙНИМ РОЗВИТКОМ ІНФРАСТРУКТУРИ МОРСЬКОГО ТРАНСПОРТУ 68
2.1. Обґрунтування необхідності пошуку нових підходів до організації управління інноваційними проектами 68
2.2. Розвиток концепції «інкубатора проектів» 73
2.3. Організація управління всередині інкубатора проектів 75
2.4. Розвиток концепції «управління можливостями» 81
2.5. Розвиток концепції «пісочниці» 83
2.6. Архітектура організації інкубаторів проектів 86
2.7. Дослідження залежності показників проекту від порядку виконання робіт 92
2.8. Висновки до другого розділу 110

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ ТЕРМІНІВ РЕАЛІЗАЦІЇ ПРОЕКТІВ ІННОВАЦІЙНОГО РОЗВИТКУ ТРАНСПОРТНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ 111

3.1. Обґрунтування термінів реалізації проектів створення об'єктів інноваційної транспортної інфраструктури 111

3.2. Оцінка стійкості показників ефективності проектів інноваційного розвитку транспортної інфраструктури..... 117

3.3. Визначення термінів заміни обладнання з урахуванням зносу і змін його ринкової вартості..... 137

3.4. Оцінка коливань показників ефективності проектів інноваційного розвитку транспортної інфраструктури, що функціонує в умовах мінливого зовнішнього оточення..... 147

3.5. Висновки до третього розділу 155

РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА МЕТОДІВ УПРАВЛІННЯ ПРОЕКТАМИ РОЗВИТКУ ТРАНСПОРТНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ В УМОВАХ МІНЛИВОГО ЗОВНІШНЬОГО ОТОЧЕННЯ 157

4.1. Вплив рівня зайнятості об’єктів морської транспортної інфраструктури на динаміку показників проектів його будівництва та використання 157

4.2. Розробка методу визначення оптимальних термінів ремонтів складного портового обладнання в межах життєвих циклів проектів їх придбання та використання 165

4.3. Оцінка стійкості проектів придбання та використання складного портового обладнання 174

4.4. Планування оптимальних термінів ремонтів та завершення проектів використання складного портового обладнання, що функціонує в умовах непостійної зайнятості..... 180

4.5. Розробка методу вибору стратегії ремонтів і завершення проекту використання складного обладнання за умов частково визначеного прогнозу рівня його завантаження 189

4.6. Використання багатокритеріальних оцінок для зменшення ризиків при плануванні ремонтів і замін складного портового обладнання, що функціонує в умовах неповністю визначеного вантажопотоку 199

4.7. Оцінка коливань показників ефективності проектів інноваційного розвитку транспортної інфраструктури, що функціонує в умовах мінливого завантаження 210

4.8. Висновки до четвертого розділу 225

РОЗДІЛ 5. РОЗРОБКА МЕТОДІВ УПРАВЛІННЯ ПРОЕКТАМИ ІННОВАЦІЙНОГО РОЗВИТКУ ТРАНСПОРТНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ З УРАХУВАННЯМ ОСОБЛИВОСТЕЙ ОПЕРАЦІЙНОЇ ФАЗИ 228

5.1. Багатокритеріальний підхід до обґрунтування проектів придбання і використання суден 228

5.2. Розробка методу обґрунтування вибору судна з урахуванням змін кон'юнктури фрахтового ринку і цін на пальне 240

5.3. Оцінка ефективності проектів придбання та використання неспеціалізованих суден з урахуванням змін структури вантажопотоку .. 247

5.4. Висновки до п’ятого розділу 272

РОЗДІЛ 6. МЕТОДИ РОЗРОБКИ СИСТЕМ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ЩОДО ПРОЕКТІВ РОЗВИТКУ ІНФРАСТРУКТУРИ МОРСЬКОГО ТРАНСПОРТУ 274

6.1. Розробка систем підтримки прийняття рішень щодо проектів розвитку портової інфраструктури 274

6.2. Розробка систем підтримки прийняття рішень щодо проектів розвитку організації процесу перевезень 287

6.3. Розробка методу обґрунтування параметрів проектів розвитку морського вантажного фронту сукупності взаємозамінних причалів..... 302

6.4. Створення системи підтримки прийняття рішень щодо проектів модернізації парку портового обладнання, яке функціонує в умовах непостійного завантаження..... 309

6.5. Висновки до шостого розділу 318

ВИСНОВКИ..... 319

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 322

ДОДАТКИ..... 368

Додаток А. Реалізація на мові Java алгоритмів знаходження паретової межі для проблеми обґрунтування послідовності виконання робіт, що проводяться в рамках дослідницького проекту 368

Додаток Б. Реалізація алгоритмів розрахунку показників ефективності проектів інноваційного розвитку транспортної інфраструктури в системі комп'ютерної математики MAPLE 376

Додаток В. Список публікацій здобувача за темою дисертації 383

Додаток Г. Акти впровадження результатів дисертаційного дослідження 397

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

CF – грошовий потік;

EAC – еквівалент щорічних витрат;

EP – дослідний проект;

IRR – внутрішня норма прибутковості;

IT – інформаційні технології;

NPD – розробка нового продукту;

NPV – сучасна приведена вартість;

PI – індекс прибутковості;

PSP – задача планування розкладу проекту;

PV – сучасна вартість;

R&D, НДДКР – науково-дослідні та дослідно-конструкторські розробки;

RCPSP – задача планування розкладу проекту з обмеженими ресурсами;

RoRo термінал – термінал для перевантаження вантажів на колісній базі;

TCE – тайм-чартерний еквівалент;

ВПК – виробничий перевантажувальний комплекс;

ДКР – дослідно-конструкторські розробки;

МВФ – морський вантажний фронт;

НДР – науково-дослідні розробки;

СППР – система підтримки прийняття рішень;

УП – управління проектами.

ВСТУП

Для більшості компаній проблема впровадження Agile методів управління полягає в тому, що структура менеджменту таких компаній відповідає класичному підходу до управління проектами. Значна частина проектів, що реалізуються цими компаніями, вже на початковій стадії вимагає розробки детального плану і жорсткої вертикальної координації на стадії реалізації. Однак такий підхід не дає можливості ефективно управляти інноваціями. Особливо на початковій стадії реалізації інноваційні проекти можуть мати слабо передбачувані результати і неприйнятно високий рівень ризику, внаслідок чого виникають проблеми планування і складності із залученням інвесторів. Отже, на різних стадіях виконання робіт можуть бути ефективними істотно різні методи управління.

Транспортна інфраструктура має важливе значення для розвитку регіонів та багатьох галузей промисловості України. Глобалізація ринку призводить до значного росту обсягів міжнародних перевезень, спостерігається зростання конкуренції як серед виробників промислової продукції, так і серед перевізників, перевантажувальних комплексів й інших учасників. Разом з тим підвищуються вимоги щодо ефективності, стійкості та безпечності функціонування транспортної галузі. Незважаючи на значний розвиток класичних методів управління проектами (УП) і методів формалізації і вирішення задач в групах процесів за областями знань УП, коло існуючих проблем потребує їх збагачення та суттєвого розширення. Тому в багатьох випадках при організації системи управління проектами розвитку сучасних складних об’єктів, у тому числі морської транспортної інфраструктури, виникає необхідність в розробці нових концепцій та методів управління.

В даний час транспортна інфраструктура українських морських портів застаріла і вимагає термінових заходів щодо її модернізації. Кількісний та якісний склад флоту українських судноплавних компаній також є вкрай незадовільним. Без кардинальної зміни системи управління розвитком

транспортної інфраструктури України на основі використання науково-обґрунтованої методології проектно-орієнтованого управління досягти проривних результатів в цьому напрямку не представляється можливим. Теоретичні засади інноваційного розвитку та питання управління інноваційними процесами і, в тому числі, процесами розвитку інфраструктури морських портів і флоту висвітлено у роботах С.Д. Бушуєва, Н.С. Бушуєвої, І.А. Бабаєва, В.М. Буркова, В.І. Воропаєва, С.К. Чернова, І.В. Кононенка, І.О. Лапкіної, А.В. Шахова, О.Г. Шибаєва, Х. Танаки, Л. Фуглсанга, інших вчених. Однак ряд проблем все ще залишається недослідженим. Класичні аналітичні методи виявляються недостатньо ефективними при постановці і вирішенні задач обґрунтування параметрів проектів інноваційного розвитку сучасної складної інфраструктури морського транспорту, отже постає потреба в розробці нових кількісних методів та моделей. Великий практичній та теоретичний інтерес представляють дослідження, що спрямовані на розвиток методів управління, які б дозволяли реалізувати в межах системи управління проектно-орієнтованих компаній переваг як класичних, так і Agile методів УП.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Матеріали дисертаційної роботи використані у рамках виконання наукових досліджень, що проводилися в Одеському національному морському університеті за темами: «Проектно-орієнтоване управління підприємствами морського транспорту» (державний реєстраційний номер 0112U004304), «Ресурсне забезпечення проектів на морському транспорті» (державний реєстраційний номер 0115U001589), «Управління проектами створення та функціонування логістичних систем» (державний реєстраційний номер 0119U002262).

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є підвищення ефективності функціювання та розвитку інфраструктури морського транспорту шляхом створення методів та моделей, що формують нову методологію інноваційно-орієнтованого управління проектами.

Для досягнення мети в дисертаційній роботі поставлено та вирішено наступні задачі:

– проведення аналізу сучасних теорій, методів і моделей, а також практики інноваційно-орієнтованого управління проектами розвитку транспортної інфраструктури для визначення кола актуальних, але невирішених питань;

– побудова концептуальної моделі управління інноваційною діяльністю, що дозволяє реалізувати переваги як класичних методів управління проектами, так і Agile методів;

– розробка методів управління послідовністю робіт, що виконуються в рамках інноваційних проектів;

– розробка методів багатокритеріальної оцінки, що враховують як очікувані переваги, так і ризики проектів інноваційного розвитку транспортної інфраструктури;

– розробка кількісних методів обґрунтування термінів впровадження проектів інноваційного розвитку транспортної інфраструктури;

– побудова методів та моделей управління проектами інноваційного розвитку транспортної інфраструктури в умовах нестійких вантажопотоків;

– побудова концептуальної моделі розробки та використання систем підтримки прийняття рішень при реалізації інноваційних проектів розвитку транспортної інфраструктури;

– експериментальне дослідження запропонованих моделей та методів управління.

Об'єктом дослідження є процеси інноваційно-орієнтованого управління проектами розвитку інфраструктури морського транспорту.

Предметом дослідження є методології, методи та моделі управління проектами інноваційного розвитку інфраструктури морського транспорту.

Методи дослідження. При дослідженні використано: теорію систем і системного аналізу; теорію управління проектами і програмами; засоби математичного моделювання; методи багатокритеріального оцінювання; теорію випадкових процесів.

Наукова новизна отриманих результатів дисертаційного дослідження. Наукова новизна отриманих результатів полягає у розробці

нової методології, концепцій, методів і моделей управління інноваційними проектами, які дозволяють підвищити ефективність інноваційної діяльності у розвитку інфраструктури морського транспорту.

Вперше запропоновано:

– концептуальну модель управління інноваційними проектами, що дозволяє реалізувати переваги як класичних методів управління, так і Agile методів на основі їх синергетичної взаємодії;

– методи та моделі, які базуються на концепції «інкубатора проектів» та «пісочниці», в межах яких реалізується ефективна структура управління та режим доступу до ресурсів проектно-орієнтованої організації;

– метод обґрунтування порядку виконання робіт у складі дослідницького проекту, що проводяться в інкубаторі проектів на основі багатокритеріальної оптимізації;

– методи багатокритеріальної оцінки та мінімізації ризиків при управлінні проектами інноваційного розвитку транспортної інфраструктури, що основані на використанні показника еквівалента щорічних витрат;

– метод та модель управління тривалістю життєвого циклу проектів інноваційного розвитку об’єктів транспортної інфраструктури з проактивним врахуванням фізичного зносу та морального старіння.

Вдосконалено:

– методи управління проектами інноваційного розвитку морської транспортної інфраструктури з урахуванням особливостей операційної фази, які, в порівнянні з існуючими методами, дозволяють більш точно враховувати коливання кон’юнктури ринку. Це дає змогу підвищити рівень ефективності та надійності роботи морського транспорту;

– модель усувного і неусувного зносу технічних засобів, на основі якої базуються методи оптимізації термінів операційної фази проектів створення та використання складних інноваційних технічних систем. Запропонована модель, в порівнянні з існуючими, використовує більш розвинені інструменти кількісного аналізу, що базуються на застосуванні апарату стохастичних диференційних рівнянь та статистичного моделювання;

– методи управління проектами створення систем підтримки прийняття рішень щодо розвитку інфраструктури морського транспорту, які, на відміну від існуючих методів, орієнтовані на створення та використання інтелектуальних алгоритмів управління технологічними процесами. Це дозволяє приймати обґрунтовані рішення на стратегічному рівні управління, зважаючи на специфіку складних процесів, управління якими здійснюється на операційному рівні.

Отримали подальший розвиток:

– концептуальна модель «управління можливостями», в рамках якої реалізується диференційований підхід до управління невизначеністю інноваційних проектів: управління можливостями на початкових етапах дозрівання інноваційного проекту і перехід до управління ризиками на стадії ініціації і реалізації R&D проекту;

– модель «дозрівання інновації», в рамках якої реалізується управління передумовами своєчасної ініціації і успішної реалізації інноваційного проекту;

– термінологічна база методології управління проектами та програмами шляхом понятійного розширення базових та додаткових означень: «управління інноваційною діяльністю», «ризик проекту», «інкубатор проектів», «пісочниця проектів».

Практичне значення отриманих результатів. Розроблені в дисертаційній роботі теоретичні основи, методи і моделі, що формують нову методологію інноваційно-орієнтованого управління проектами розвитку інфраструктури морського транспорту, довели свою ефективність на практиці. Результати досліджень впроваджені у діяльність корпорації Sellhorn Ingenieurgesellschaft GmbH (Німеччина), компанії Project Tender Information Service GmbH (Німеччина), компанії Inveni Portum Solutions GmbH (Німеччина), компанії Сігран (Україна), компанії Укррічфлот (Україна) та інших компаній (додаток Г). Також результати досліджень були впроваджені у навчальний процес Одеського національного морського університету. На основі запропонованих в дисертаційній роботі концепцій, методів і моделей було створено програмне забезпечення системи підтримки прийняття рішень

для проекту розвитку інфраструктури логістичного центру Wrzesnia, Wielkopolska (Poland), 2016 р., та реалізовано програмне забезпечення системи підтримки прийняття рішень проекту розвитку RoRo терміналу порту Emden, 2017 р.

Отримані результати мають науково-практичне значення для розвитку фундаментальних основ теорії проектного управління інноваційною діяльністю. Результати досліджень дозволяють розширити і конкретизувати теоретичні положення щодо організації системи управління проектами інноваційного розвитку інфраструктури морського транспорту, узагальнити та доповнити науково-теоретичні і практичні знання в області проектного менеджменту. Тема дисертаційного дослідження відповідає переліку пріоритетних тематичних напрямів наукових досліджень і науково-технічних розробок – фундаментальні наукові дослідження з найбільш важливих проблем розвитку науково-технічного, соціально-економічного, суспільно-політичного, людського потенціалу для забезпечення конкурентоспроможності України у світі та сталого розвитку суспільства і держави за наступними розділами: найважливіші фундаментальні проблеми фізико-математичних і технічних наук; технології та засоби математичного моделювання, оптимізації та системного аналізу розв'язання надскладних завдань державного значення; інтелектуальні інформаційні та інформаційно-аналітичні технології; інформаційно-аналітичні системи, системи підтримки прийняття рішень; енергоефективні технології на транспорті.

Особистий внесок здобувача. Наукові результати, висновки та положення, винесені на захист, одержані автором самостійно. У роботах, що опубліковані у співавторстві, автору належать розробки, які характеризують новизну результатів дослідження. Особистий внесок здобувача підтверджується науковими публікаціями, в яких викладено досліджені методи та моделі інноваційно-орієнтованого управління проектами розвитку інфраструктури морського транспорту. Конкретний внесок здобувача в ці праці зазначено в списку публікацій за темою дисертації.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати дисертаційного дослідження пройшли апробацію на 34 міжнародних та всеукраїнських науково-практичних конференціях, які проходили з 2012 р. по 2020 р. у містах Одеса (2012–2015, 2017, 2018 р.) [97, 99, 118, 122, 130, 133, 147], Київ (2014, 2018, 2020 р.) [97, 105, 126, 143, 151], Черкаси (2014, 2015 р.) [127, 135], Харків (2013, 2018 р.) [110, 125, 137], Вороніж (2012, 2014 р.) [120, 141] та інших.

Публікації результатів дослідження. За результатами дисертаційного дослідження опубліковано 70 друкованих праць, з них 6 монографій, 24 статті в фахових виданнях, з яких 7 входять до SCOPUS (6 в періодичних журналах та 1 в «Proceedings»), 40 тез доповідей на міжнародних та всеукраїнських конференціях та праць, що додатково відображають наукові результати дисертації.

Обсяг і структура дисертації. Робота складається зі вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Повний обсяг дисертації складає 406 сторінок, обсяг основного матеріалу – 282 сторінки. Матеріал дисертації містить 123 рисунка та 49 таблиць. Загальний список використаних джерел складає 376 найменувань. Додатки подано на 39 сторінках.

РОЗДІЛ 1
ДОСЛІДЖЕННЯ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ТА МОДЕЛЕЙ УПРАВЛІННЯ ПРОЕКТАМИ ІННОВАЦІЙНОГО РОЗВИТКУ ІНФРАСТРУКТУРИ МОРСЬКОГО ТРАНСПОРТУ

1.1. Аналіз існуючих підходів, методів та моделей управління інноваційними проектами та показники впровадження інновацій в Україні

Одним з основних драйверів глобального прискорення інновацій є розвиток та впровадження систем управління проектами, програмами та портфелями проектів. В даний час для ефективного управління проектами, що реалізуються в умовах мінливого оточення, широко використовуються гнучкі методології.

Вагомий внесок у розвиток теорії управління проектами, і в тому числі інноваційними проектами та їх портфелями, було зроблено завдяки роботам вітчизняних і зарубіжних вчених: С.Д. Бушуєва, Н.С. Бушуєвої, І.А. Бабаєва, А.О. Білощицького, В.М. Буркова, В.О. Вайсмана, Т.А. Воркут, В.І. Воропаєва, В.Д. Гогунського, О.Б. Данченко, Є.А. Дружиніна, Д.И. Кендалла, К.В. Колеснікової, К.В. Кошкіна, І.В. Кононенка, І.О. Лапкіної, О.М. Медведєвої, М.Л. Разу, Ю.П. Рака, В.А. Рача, С.В. Руденка, О.В. Сидорчука, Х. Танаки, Дж.Р. Тернера, С.К. Чернова, І.В. Чумаченка, А.В. Шахова та інших.

Щоб залишатися конкурентоспроможними у дуже мінливому зовнішньому оточенні, компаніям необхідно постійно підвищувати рівень продуктивності своїх науково-дослідницьких робіт. Сучасні тенденції до глобалізації компаній, спільної техніко-економічної сили та конкуренції, впливають на спосіб проведення досліджень та розробок в промисловості. Тому виникає потреба в пошуку шляхів підвищення продуктивності інвестицій в R&D (науково-дослідницькі та дослідницько-конструкторські

розробки). Для того, щоб це підвищення продуктивності стало більш керованим, постає необхідність в розробці методів вимірювання ефективності науково-дослідницьких робіт. Більшість досліджень в цьому напрямку зосереджені на вимірюванні R&D в цілому, але результати цих досліджень не можна назвати завершеними. Це пов’язано з тим, що, по-перше, науково-дослідницька діяльність відрізняється від дослідницької за цілим рядом факторів, чинників, які відіграють важливу роль у вимірі продуктивності. Таким чином, дослідницька діяльність повинна вимірюватися окремо, щоб забезпечити правильне врахування факторів. По-друге, погляд на те, яким буде очікуваний результат від дослідницької діяльності компанії, різниться залежно від компанії, а також із зовнішніми факторами, такими як зміна вимог споживачів та розвиток ринку. Отже, для вимірювання дослідницької діяльності керівники спочатку повинні визначити, який результат очікується від дослідницької діяльності, а потім застосувати систему вимірювання, яка відповідає поточній ситуації [237].

У статті [351] пропонується підхід до вимірювання ефективності R&D, що базується на методах загального управління якістю. В [351] викладено основоположні принципи досягнення загального управління якістю та продемонстровано їх зв’язок з вимогами до ефективного управління науково-дослідницькими роботами.

У роботі [60] проведено аналіз і узагальнення існуючих підходів до класифікації ризиків в проектах та запропоновано єдиний перелік ознак для класифікації ризиків, який може бути застосований в процесі управління ризиками проектів. Робота [63] присвячена вивченню питань управління компетенціями співробітників в проектах стратегічного розвитку, а також розробці концептуальної схеми взаємодії основних компонентів управління компетенціями в проектах. Широке коло питань щодо створення науково-методологічного забезпечення управління складними проектами розглянуто в роботі [64].

У роботах [17, 57, 65, 91] розглядаються особливості оцінки інновацій та, в залежності від життєвого циклу проекту, пропонуються різні показники для оцінки ефективності інновацій на кожному з етапів їх життєвого циклу. Дослідження [41] присвячено вивченню того, як формуються проривні компетенції у програмах інноваційного розвитку організацій. Запропоновано концентричну модель проривних компетенцій для інноваційних програм розвитку. Була досліджена структура компетенцій в рамках системи управління інноваційними проектами та програмами, що дозволило розробити трьохрівневу модель проривних компетенцій в управлінні інноваційними проектами. Виконано аналіз результатів застосування компетентнісного підходу з точки зору технічних, технологічних та організаційних проривів. В роботі [195] пропонуються інноваційні моделі, механізми та інструменти управління стратегічним розвитком територіальних громад в умовах децентралізації. Проблеми, що пов’язані з керуванням високоінтелектуальними проектами та реалізацією механізмів ефективного рішення проблем енергозбереження, досліджені в [207]. В статті [211] пропонуються інструменти форсайт-методологій у програмах розвитку.

Дослідження сучасних підходів до формування лідерства при застосуванні гнучких методологій та аналіз процесів прийняття рішень в управлінні проектами проведені в роботі [40]. Видання [222] містить визнані базові практики, які спрямовані на забезпечення комерційних результатів для проектно-орієнтованих організацій, що функціонують в різних галузях. Роботу [26] присвячено дослідженню механізмів конвергенції методологій розвитку управління проектами та вивченню взаємодії між моделями в точках біфуркації. В роботах [31, 221, 276, 359] систематизовані знання і оцінки компетентності проектних менеджерів в галузі управління інноваційними проектами і програмами. Викладена система знань відповідає японським стандартам, які орієнтовані на впровадження інновацій в розвиток підприємств в умовах конкурентного оточення.

Розробка систем управління проектами, програмами та портфелями проектів залежить від тенденцій у зміненнях навколишнього середовища. Значні змінення в середовищі вимагають подальших досліджень щодо ефективності застосування тих чи інших методологій та компетенцій керівників проектів. У статті [244] вивчаються різні підходи до організації процесів прийняття рішень в управлінні проектами та аномалій, що впливають на ці процеси. Питання побудови систем прийняття рішень, що базуються на використанні сучасного програмного забезпечення, яке дозволяє автоматизувати звітність та управління, досліджені в статті [249]. Для цього в [249] розроблено процедуру оцінки та прогнозування факторів, яка дозволяє формувати ефективні стратегії розвитку високотехнологічних підприємств. Розробка методів вибору портфеля R&D проектів становить значний інтерес як серед практиків, так і серед науковців. Незважаючи на це, практичне впровадження цих методів залишається частково обмеженим через труднощі, що стосуються відповідних проблем в управлінні портфелями R&D проектів. В роботі [272] представлені дослідження, які спрямовані на розширення відомих підходів до управління портфелями R&D проектів за рахунок фіксації екзогенних невизначеностей, моделювання ресурсів та розробки методів вибору оптимальних портфелів проектів, сумісних зі ставленням особи, що приймає рішення до ризиків. У міру збільшення масштабів та складності проектів, управління ними через часові пояси, мовні бар’єри та технологічні платформи вимагає системного підходу, що враховує кожну деталь. В роботі [283] висвітлюються питання глобального управління зацікавленими сторонами, аналіз причини невдачі проектів, питання гнучкого менеджменту, можливі причини збоїв в управлінні проектами, класифікація показників проекту тощо. В роботі [329] аналізуються питання стійкості управління проектами з урахуванням нових гнучких методологій, практик, знань та навичок. В останні роки в управлінні проектами все більшого значення набувають проблеми своєчасного реагування на зміни навколишнього

середовища. Методи гнучкого управління зараз використовуються не тільки в розробці програмного забезпечення, але і в інших галузях.

Останніми роками все більше компаній проводять дослідження з метою максимально ефективного та своєчасного впровадження науково-технічних рішень. Часто це спрямовано на визначення критичних чи ключових технологій або на встановлення найбільш перспективних пріоритетних досліджень. У роботі [345] вивчаються методи прийняття рішень щодо визначення пріоритетів з використанням багатокритеріальних оцінок. Робота [10] присвячена дослідженню методів організації офісів управління будівельними проектами. Запропоновано логічно-структурну послідовність організації офісів управління будівельними проектами та розроблено концептуальну схему організації таких офісів, що надає можливість інтегрувати принципи проектного менеджменту у реальну виробничу діяльність проектно-орієнтованих будівельних компаній. Механізми управління проектами і програмами регіонального і галузевого розвитку вивчені в статті [23].

З метою аналізу і поширення інновацій Єврокомісія, починаючи з 2011 р., публікує щорічний звіт про зміну інноваційних індексів національних економік країн членів Євросоюзу [262]. Сумарний індекс окремих країн розраховується на базі трьох груп чинників. Перша група чинників (Enables) характеризує зовнішню по відношенню до фірми систему підтримки інновацій і складається з наступних груп: людські ресурси (вимірюється трьома індексами); відкрита дослідницька система (вимірюється трьома індексами); фінанси і підтримка (вимірюється двома індексами). Друга група чинників (Firm activities) характеризує інноваційну активність на рівні фірми і складається з трьох підгруп: інвестиції (вимірюється двома індексами); зв'язки і виробництво (вимірюється трьома індексами); інтелектуальна підтримка (вимірюється чотирма індексами). Третя група чинників (Outputs) характеризує результати інноваційної діяльності фірми і складається з двох підгруп: інвестори (вимірюється трьома індексами); економічний ефект

(вимірюється п'ятьма індексами). Запропонована система з 25 індексів, розрахованих за спеціальною методикою [355], дає повний опис інноваційного стану окремої національної економіки. За даними 2019 р. [262, 263] найбільший сумарний інноваційний індекс був у таких країн як Швейцарія, Швеція, Фінляндія, Данія, Нідерланди, а найменший у Румунії, Україні і Чорногорії. Проте Євросоюз в цілому поступається Південній Кореї, Австралії і Японії. В табл. 1.1 та 1.2 наведені значення індексу інновацій та інші показники інноваційної діяльності згідно з даними [262]. Рис. 1.1 – 1.7 побудовані за даними табл. 1.1. На рис. 1.1 представлені значення індексу інновацій в країнах Європи в 2019 р. в порядку зростання. Значний інтерес становить аналіз динаміки цього показника. На рис. 1.2 представлено діаграму змінення значень індексу інновацій в країнах Європи з 2012 по 2019 р. На рис. 1.4. вздовж горизонтальної вісі відкладено значення індексу інновацій для кожної з розглянутих країн в 2019 р., а вздовж вертикальної вісі –приріст значення індексу інновацій для цих країн з 2012 по 2019 р. На перетині жирних пунктирних ліній знаходиться точка, координати якої відповідають середнім значенням відповідних показників по всім розглянутим країнам. Таким чином, ці пунктирні лінії умовно розділяють всі країни на чотири категорії. В першу категорію потрапляють країни з високим рівнем індексу інновацій і для яких в той же час продовжує спостерігатися висока динаміка інноваційного розвитку. К таким країнам, перш за все, відносяться Швейцарія, Норвегія, Фінляндія та Великобританія (рис. 1.4). До другої категорії відносяться країни, які мають високий рівень індексу інновацій, але динаміка зростання цього індексу нижче, ніж в середньому по країнах Європи (Данія, Німеччина, Ісландія, та інші). Як можна бачити з рис. 1.4, Україна разом з Румунією, Словенією, Чорногорією та деякими іншими країнами, нажаль, потрапляє до групи держав, для яких і поточні значення індексу інновацій, і динаміка цього індексу є найгіршими в Європі. Динаміку розвитку інновацій в Україні по роках можна простежити по даним з табл. 1.3 – 1.6.

Таблиця 1.1 – Значення індексу інновацій
в країнах Європи з 2012 по 2019 роки [262]

Країни	Код	Роки							
		2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Австрія	AT	118,99	120,40	118,28	119,32	124,42	124,06	126,42	127,86
Бельгія	BE	119,51	119,86	120,20	119,47	121,79	125,06	130,91	131,98
Болгарія	BG	42,32	44,51	46,14	45,93	47,68	47,96	48,80	49,46
Греція	EL	62,81	64,35	64,75	66,14	70,19	71,66	82,42	83,47
Данія	DK	144,74	146,62	144,36	143,17	141,06	143,39	143,62	146,38
Естонія	EE	92,71	93,28	88,17	89,79	81,05	83,44	105,74	107,74
Ізраїль	IL	119,67	120,27	120,20	120,26	120,48	120,88	120,86	120,89
Ірландія	IR	112,08	109,70	110,33	113,18	121,66	121,09	121,25	121,92
Ісландія	IS	125,76	128,28	129,10	127,00	125,37	127,29	128,34	124,22
Іспанія	ES	78,07	78,03	75,00	73,85	78,63	80,91	86,23	92,63
Італія	IT	78,30	79,67	77,53	80,43	77,32	80,02	86,15	90,14
Кіпр	CY	86,02	88,70	82,15	84,83	79,35	81,84	87,00	96,76
Латвія	LV	45,66	45,45	56,11	60,86	57,40	61,89	66,78	68,61
Литва	LT	59,11	58,94	59,53	65,41	77,63	75,33	81,94	86,77
Люксембург	LU	133,90	134,60	129,23	132,36	133,54	130,24	132,57	137,13
Мальта	MT	66,70	74,33	85,62	85,56	78,97	85,36	90,81	91,45
Нідерланди	NL	128,68	128,94	127,51	129,87	132,15	133,11	136,23	139,08
Німеччина	DE	130,96	130,84	125,81	125,53	125,31	127,08	129,53	130,48
Норвегія	NO	104,49	104,51	105,89	105,89	123,78	124,58	131,37	131,09
Об'єднане Королівство	UK	114,31	113,28	117,74	120,38	128,58	128,58	130,20	131,59
Північна Македонія	MK	33,71	35,56	35,32	37,82	41,07	45,54	44,79	48,48
Польща	PL	51,01	52,86	50,73	52,11	54,15	54,91	60,22	64,07
Португалія	PT	83,78	84,76	83,15	83,59	81,36	83,76	99,63	105,27
Румунія	RO	40,21	39,67	30,46	31,08	30,71	33,14	32,89	34,40
Сербія	RS	53,94	54,27	56,91	57,71	55,47	60,41	62,51	67,14
Словаччина	SK	70,42	71,36	67,24	68,89	71,30	68,21	70,55	72,48
Словенія	SL	102,27	103,10	100,49	101,31	98,77	97,89	94,43	92,42
Туреччина	TR	55,25	55,88	53,63	54,83	53,84	56,05	67,33	67,78
Угорщина	HU	64,77	64,66	65,50	65,70	66,85	68,57	70,74	72,29
Україна	UA	36,84	34,90	33,99	34,82	35,14	35,07	35,97	35,85
Фінляндія	FI	133,26	133,13	130,03	130,98	132,39	134,92	146,65	152,23
Франція	FR	107,64	109,00	111,17	112,30	115,28	116,32	114,70	113,74
Хорватія	HR	54,52	54,86	51,75	52,91	52,95	55,05	61,57	63,98
Чехія	CZ	83,24	83,93	84,05	86,04	84,70	87,19	90,86	91,72
Чорногорія	ME	42,25	41,38	43,38	42,43	42,03	42,64	41,99	47,22
Швейцарія	CW	157,10	156,18	159,80	160,43	166,30	173,56	175,68	179,73
Швеція	SE	146,24	147,15	146,33	145,80	147,25	150,52	150,50	153,12
Середнє значення		88,68	89,38	88,85	91,58	91,24	92,91	96,98	99,23

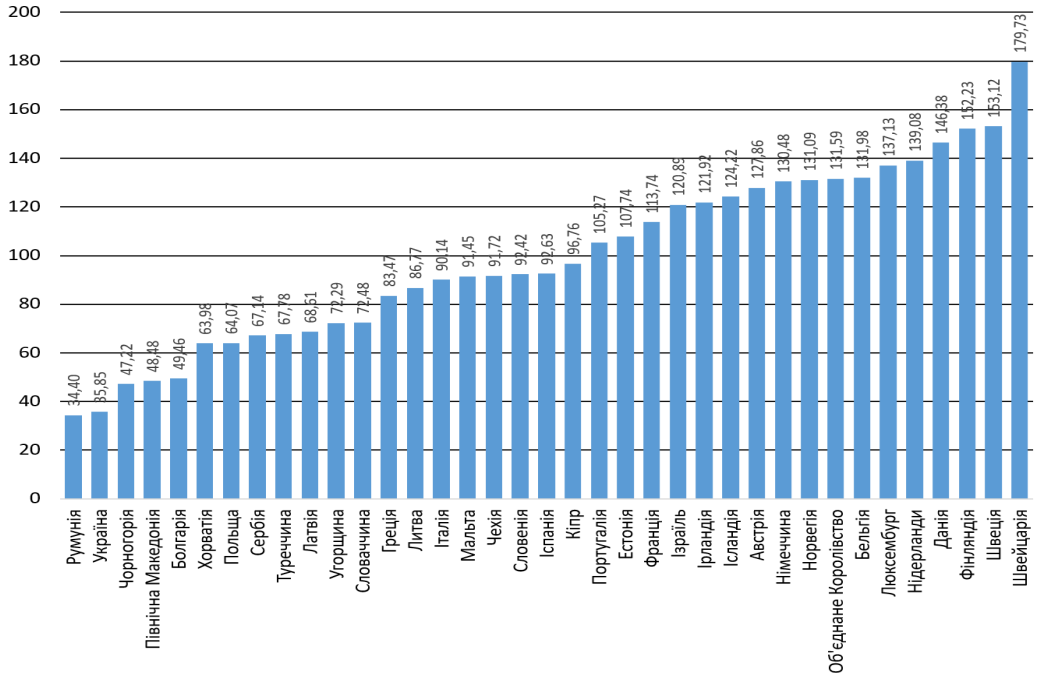


Рисунок 1.1 – Індекс інновацій в країнах Європи в 2019 р.

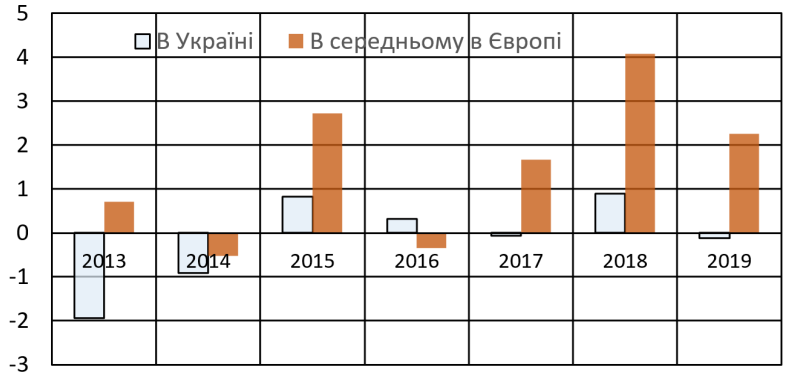


Рисунок 1.2 – Порівняння щорічного змінення значень індексу інновацій в Україні і в середньому по країнах Європи.

По більшості показників, що відображують розвиток інновацій в Україні, нажаль, спостерігається негативна динаміка. Разом з тим, згідно з даними [262], Україна має досить високий рівень сприятливості середовища для розвитку інновацій. Тому це створює передумови для перелому в теперішній негативній динаміці і поступовому зростанні рівня розвитку інновацій в Україні. З огляду на це, виникає гостра потреба в розробці і впровадженні нових методів управління проектами інноваційного розвитку, які б дозволяли враховувати основні специфічні аспекти української економічної і соціальної системи для максимально ефективного впровадження необхідних інновацій.

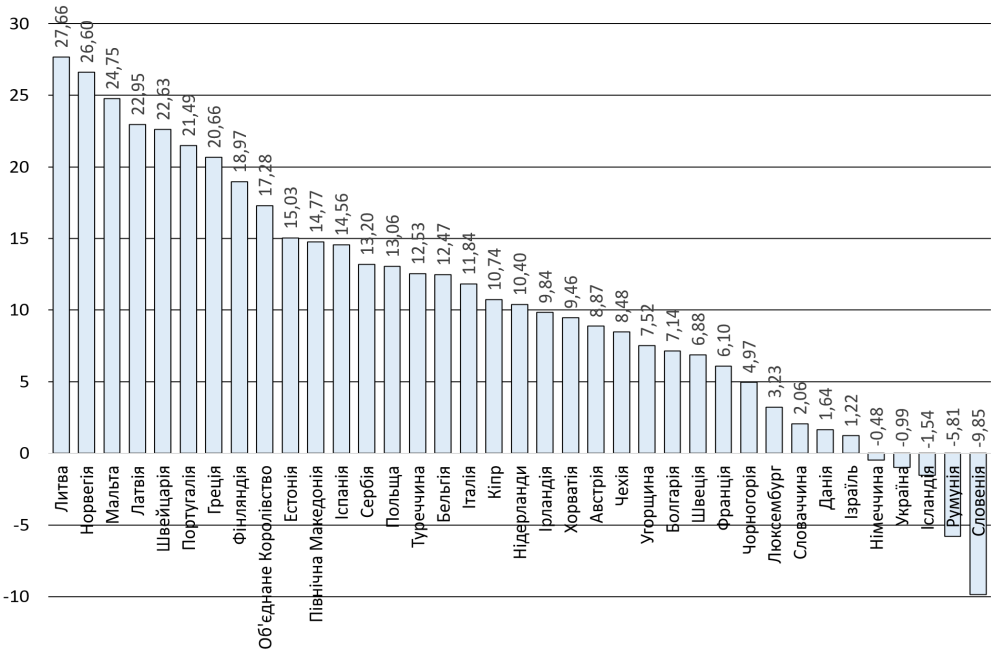


Рисунок 1.3 – Змінення значень індексу інновацій в країнах Європи з 2012 по 2019 р.

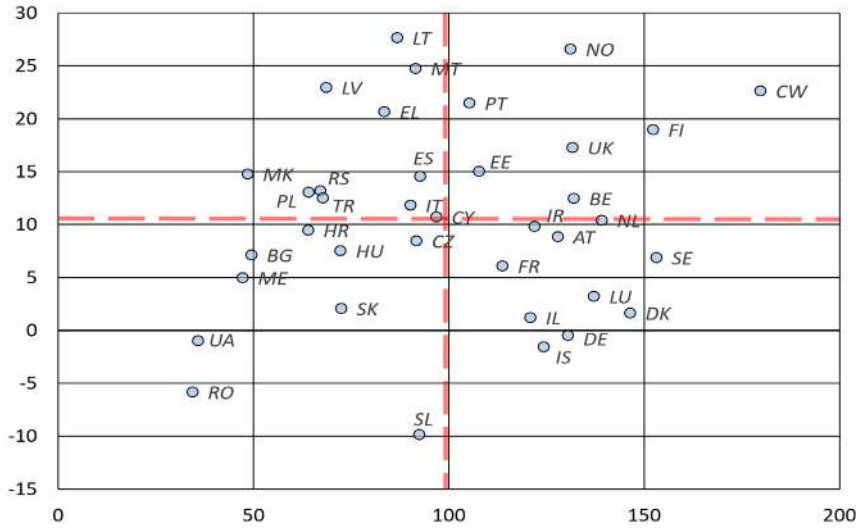


Рисунок 1.4 – Розподіл індексу інновацій в 2019 р. та його різниці з 2012 по 2019 р. відносно їх середніх значень в країнах Європи

Аналізу чинного законодавства України в області правового забезпечення інноваційного розвитку присвячено статтю [160]. Відповідно до Закону України «Про інноваційну діяльність» від 4 липня 2002 р. [176] інноваціями вважаються новостворені (застосовані) і (або) вдосконалені конкурентоздатні технології, продукція або послуги, а також організаційно-технічні рішення виробничого, адміністративного, комерційного або іншого характеру, що істотно поліпшують структуру та якість виробництва і (або) соціальної сфери.

Таблиця 1.2 – Показники інноваційної діяльності в країнах Європи в 2019 р. [262]

		Привабливі науково-дослідні системи	Індекс інновацій	Сприятливе для інновацій середовище	Новатори	Витрати на R&D в бізнес-секторі	Витрати на R&D в державному секторі
Австрія	AT	167,85	127,86	130,65	135,09	176,90	138,49
Бельгія	BE	190,72	131,98	158,14	133,63	155,05	112,83
Болгарія	BG	29,42	49,46	74,59	23,97	40,91	4,70
Греція	EL	77,99	83,47	76,73	130,97	43,34	74,34
Данія	DK	224,56	146,38	329,62	86,59	155,05	162,31
Естонія	EE	121,60	107,74	137,96	95,05	44,95	111,00
Ізраїль	IL	129,09	120,89	122,03	77,06	203,61	74,19
Ірландія	IR	171,08	121,92	149,53	118,67	66,81	19,36
Ісландія	IS	201,65	124,22	329,62	117,12	102,43	98,17
Іспанія	ES	105,21	92,63	197,25	40,92	53,86	65,18
Італія	IT	111,14	90,14	121,18	116,85	66,81	59,68
Кіпр	CY	145,25	96,76	140,13	73,55	13,38	17,53
Латвія	LV	52,51	68,61	138,30	35,70	10,15	54,18
Литва	LT	54,29	86,77	187,53	98,82	23,91	63,35
Люксембург	LU	236,20	137,13	236,20	126,84	52,24	65,18
Мальта	MT	87,58	91,45	233,14	53,20	23,91	8,36
Нідерланди	NL	220,98	139,08	280,54	112,24	114,57	98,17
Німеччина	DE	105,35	130,48	169,76	122,38	172,04	145,82
Норвегія	NO	183,28	131,09	249,34	164,27	84,62	147,65
Об'єднане Королівство	UK	200,28	131,59	162,40	93,96	92,71	54,18
Північна Македонія	MK	92,58	48,48	88,43	66,02	6,10	12,30
Польща	PL	36,65	64,07	211,02	14,31	61,95	39,52
Португалія	PT	135,20	105,27	227,24	156,33	53,05	85,34
Румунія	RO	32,77	34,40	112,94	0,00	21,48	2,09
Сербія	RS	44,44	67,14	120,59	86,19	26,34	68,84
Словаччина	SK	56,38	72,48	87,32	37,25	33,62	35,86
Словенія	SL	100,95	92,42	143,03	61,36	114,57	56,01
Туреччина	TR	41,63	67,78	119,97	134,98	41,72	41,35
Угорщина	HU	66,76	72,29	144,47	30,39	91,10	32,19
Україна	UA	17,27	35,85	169,63	20,18	19,50	2,09
Фінляндія	FI	173,53	152,23	321,58	153,29	142,90	134,82
Франція	FR	140,94	113,74	143,14	113,97	113,76	100,00
Хорватія	HR	50,24	63,98	71,37	85,99	35,24	57,85
Чехія	CZ	83,72	91,72	121,55	86,72	93,52	100,00
Чорногорія	ME	63,64	47,22	136,67	121,03	1,24	21,19
Швейцарія	CW	259,12	179,73	295,25	142,22	186,62	142,15
Швеція	SE	210,95	153,12	310,18	103,43	187,42	142,15

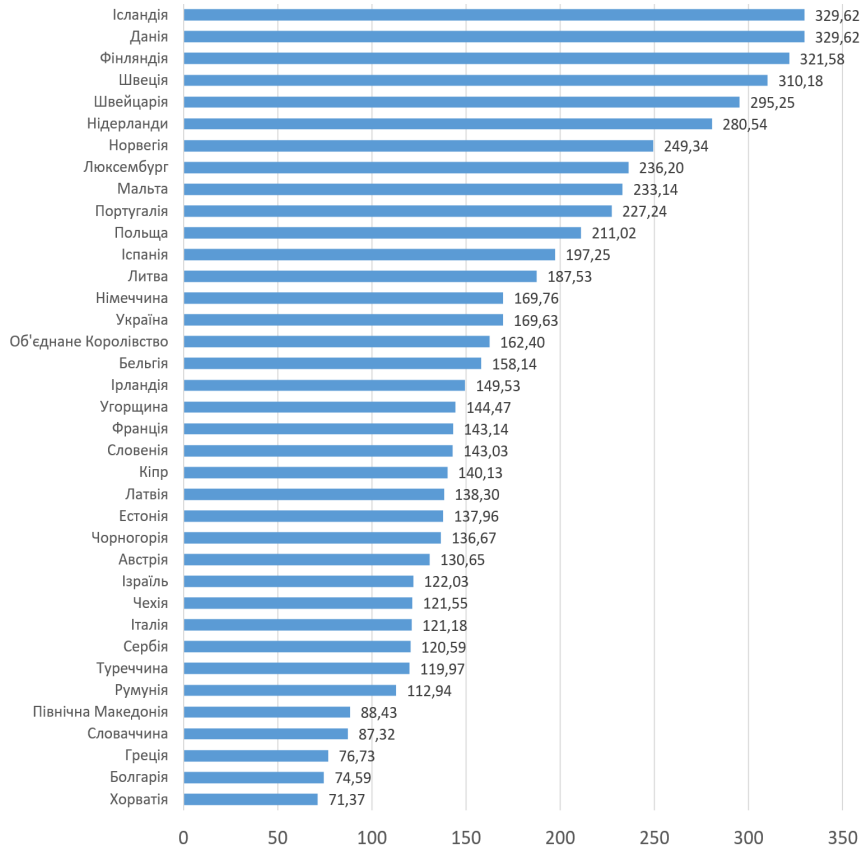


Рисунок 1.5 – Індекс сприятливості середовища для розвитку інновацій в країнах Європи в 2019 р.

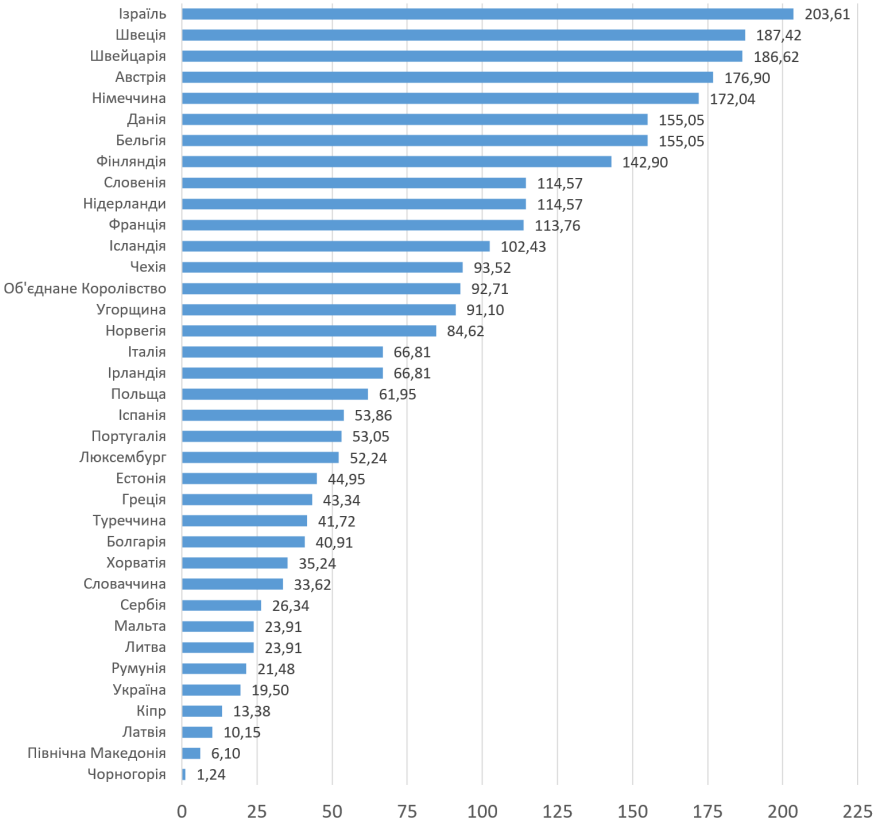


Рисунок 1.6 – Індекс витрат на R&D в бізнес-секторі в 2019 р.

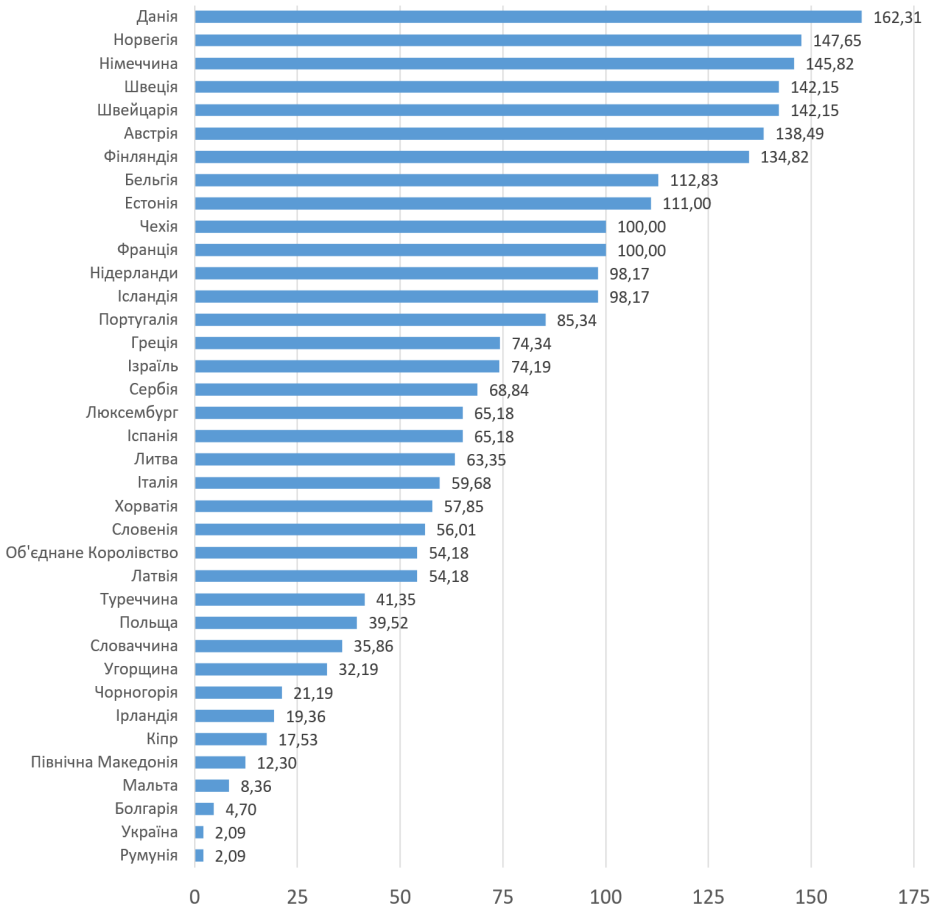


Рисунок 1.7 – Витрати на R&D в державному секторі в 2019 р.

Таблиця 1.3 – Змінення індексу інновацій в Україні по роках [262]

	Привабливі науково-дослідні системи	Індекс інновацій	Сприятливе для інновацій середовище
2012	10,57	36,84	118,18
2013	9,57	34,9	118,18
2014	11,61	33,99	118,18
2015	13,04	34,82	131,04
2016	14,75	35,14	143,91
2017	15,31	35,07	156,77
2018	14,25	35,97	169,63
2019	17,27	35,85	169,63

Об'єктами інноваційної діяльності, згідно зі ст. 4 цього Закону, визнано інноваційні програми і проекти; нові знання та інтелектуальні продукти; виробниче обладнання та процеси; інфраструктура виробництва і підприємництва; організаційно-технічні рішення виробничого, адміністративного, комерційного або іншого характеру, що істотно поліпшують структуру і якість виробництва і (або) соціальної сфери;

сировинні ресурси, засоби їх видобування і переробки; товарна продукція; механізми формування споживчого ринку і збуту товарної продукції.

Таблиця 1.4 – Змінення витрат на інновації в Україні по роках [262]

	Витрати на інновації, що не стосуються R&D	Приватне співфінансування державних видатків на R&D	Державно-приватні спільні видання	Витрати на R&D в бізнес-секторі	Витрати на R&D в державному секторі
2012	103,99	62,81	2,41	30,47	26,10
2013	103,99	62,81	3,31	30,47	26,10
2014	103,99	62,81	3,04	31,27	28,67
2015	103,99	62,81	3,62	26,88	18,18
2016	118,86	61,78	4,20	28,03	9,06
2017	118,86	57,60	6,15	21,40	0,00
2018	96,09	44,64	8,18	18,33	0,55
2019	96,09	0,00	9,35	19,50	2,09

Таблиця 1.5 – Змінення результатів інновацій в Україні по роках [262]

	Інноваційні частки продажів	Інтелектуальні активи	Експорт послуг, що потребують знань	Експорт середніх та високотехнологічних продуктів	Патентні заявки
2012	5,86	19,74	53,85	55,06	38,96
2013	5,86	17,25	59,4	46,54	34,69
2014	5,86	18,92	53,63	36,29	39,3
2015	5,86	16,95	65,32	26,03	37,37
2016	1,4	25,36	67,61	19,44	37,28
2017	1,4	30,03	67,61	18,75	41,05
2018	17	23,46	66,66	21,48	39,01
2019	17	20,9	66,66	21,48	38,46

Таблиця 1.6 – Змінення кількості новаторів в Україні по роках [262]

	Іноземні докторанти	Людські ресурси	Новатори	Міжнародні спільні публікації	Найбільш цитовані видання	Кількість докторантів
2012	37,39	66,02	16,67	0,00	2,24	59,92
2013	37,39	66,02	16,67	0,86	0,00	59,92
2014	39,72	66,02	14,82	1,46	2,51	59,92
2015	42,05	66,02	14,82	2,41	3,70	59,92
2016	49,08	67,62	14,82	3,36	3,22	61,37
2017	54,85	59,63	14,82	4,56	1,03	54,12
2018	42,20	60,09	20,18	6,19	4,35	54,54
2019	44,60	53,40	20,18	8,04	8,13	48,47

Також законом визначено повноваження Кабінету Міністрів України, інших органів державної виконавчої влади та місцевого самоврядування у сфері інноваційної діяльності, правовий режим інноваційних проектів, продуктів і продукції, інноваційних підприємств, порядок державної реєстрації інноваційних проектів, а також види фінансової підтримки та джерела фінансування інноваційної діяльності.

Законом України «Про пріоритетні напрями інноваційної діяльності в Україні» від 8 вересня 2011 р. [177] визначено забезпечення інноваційної моделі розвитку економіки шляхом концентрації ресурсів держави на пріоритетних напрямах науково-технічного оновлення виробництва, підвищення конкурентоспроможності вітчизняної продукції на внутрішньому і зовнішньому ринках. Було уточнено, зокрема, визначення поняття «пріоритетні напрями інноваційної діяльності в Україні» – науково і економічно обґрунтовані та визначені напрями провадження інноваційної діяльності, що спрямовані на забезпечення економічної безпеки держави, створення високотехнологічної конкурентоспроможної екологічно чистої продукції, надання високоякісних послуг та збільшення експортного потенціалу держави з ефективним використанням вітчизняних та світових науково-технічних досягнень [160].

За Законом «Про пріоритетні напрями інноваційної діяльності в Україні» підготовка пропозицій щодо стратегічних пріоритетних напрямів та їх прогнозно-аналітичне обґрунтування здійснюються в рамках державних цільових програм прогнозування науково-технічного та інноваційного розвитку України, що розробляються згідно із законами України «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки» та «Про державні цільові програми». Підготовка зазначених пропозицій здійснюється із залученням Національної академії наук України, національних галузевих академій наук України, вищих навчальних закладів і науково-дослідних інститутів.

Кабінет Міністрів України постановою від 28 грудня 2016 р. № 1056 затвердив Середньострокові пріоритетні напрями інноваційної діяльності

загальнодержавного рівня на 2017–2021 роки [194]. До таких напрямів віднесено: освоєння нових технологій транспортування енергії, впровадження енергоефективних, ресурсозберігаючих технологій, освоєння альтернативних джерел енергії; освоєння нових технологій високотехнологічного розвитку транспортної системи, ракетно-космічної галузі, авіа- і суднобудування, озброєння та військової техніки; освоєння нових технологій виробництва матеріалів, їх оброблення і з'єднання, створення індустрії наноматеріалів та нанотехнологій; технологічне оновлення та розвиток агропромислового комплексу; впровадження нових технологій та обладнання для якісного медичного обслуговування, лікування, фармацевтики; широке застосування технологій більш чистого виробництва та охорони навколишнього природного середовища; розвиток сучасних інформаційних, комунікаційних технологій, робототехніки [194].

Парламентом України проводилися парламентські слухання щодо питань розвитку інновацій: «Національна інноваційна система України: проблеми формування та реалізації» (20 червня 2007 р.), «Стратегія інноваційного розвитку України на 2010-2020 роки в умовах глобалізаційних викликів» (17 червня 2009 р.), «Національна інноваційна система: стан та законодавче забезпечення розвитку» (21 березня 2018 р.) [160].

Моделюванню структур управління програмами проектів в організаційно-технічних системах присвячено роботу [80]. Для цього були застосовані однорідні ланцюги Маркова з дискретними часом і станами, що дозволили моделювати типові структури управління програмами проектів, та будо показано, що деякі твердження, які мають місце для окремих проектів, також можуть бути перенесені і на програми.

Робота [33] присвячена розробці підходів до формування простору в програмах інноваційного розвитку. Запропоновано модель формування простору, що базується на оптимізації взаємодії між стейкхолдерами в області розвитку знань, які пов'язані з програмою розвитку організації.

В роботі [29] розглянуто коло питань, що пов’язані зі створенням ефективних методологій проактивного управління програмами організаційного розвитку. Запропоновані та проаналізовані моделі, методи та механізми управління програмами організаційного розвитку.

В [8] представлено аналіз різних аспектів управління проектами та програмами проектно-орієнтованої компанії. Розглянуто організаційні та практичні концепції і методи, основні елементи планування та управління проектами. Досліджено питання реалізації концепції управління портфелями проектів і організації управління проектами в компаніях шляхом створення проектних офісів.

Роботи [12, 170, 52] присвячені розробці математичних методів управління проектами. В [12] запропоновано єдиний формалізований погляд на управління проектами, його систематичний структурований опис, даються змістовні і формалізовані постановки задач управління проектами та розглядаються моделі, методи і підходи до вирішення основних класів задач УП. В [170] розроблено математичні основи управління проектами наукомістких виробництв.

В роботі [14] запропоновано інструменти управління проектами з позицій їх представлення як сукупності об'єктів і суб'єктів, що рухаються в проектно-векторному просторі.

Проблеми формування цінності в проектах, портфелях та програмах проектів досліджені в [27]. Розроблено комплекс моделей та структуру програмного забезпечення, що спрямовані на підтримку процесу формування цінності проектів та програм на їх життєвому шляху

В [32] запропоновано багаторівневу модель управління проектами на основі генетичного підходу та розроблено механізми конвергенції методологій та досліджені відповідні задачі оптимізації. Робота [25] присвячена аналізу креативних технологій управління проектами та програмами. В якості основного інструменту управління розвитком застосовуються проекти і програми збалансованого розвитку, які побудовані в

рамках матричних і генетичних технологій. На основі представлених моделей та креативних технологій формування програм збалансованого розвитку запропоновано методи управління креативним і когнітивним потенціалом команд менеджерів, а також методи розробки стратегій проектів і програм розвитку для забезпечення досягнення поставленої мети в умовах мінливого оточення і високого рівня невизначеності.

В [240] розглянуто ключові компетенції організацій як основні компоненти управлінської спроможності комплексної програми, яку реалізує компанія, а також досліджено загальні алгоритми розвитку потенціалу управління проектами. Модель управління інноваційними проектами в умовах невизначеності з використанням нейронних мереж запропоновано в [239]. Визначено принципи та методи формування інноваційних проектів та досліджено властивості відповідних нейронних мереж.

В [115] розглянуті проблеми реалізації функцій і підсистем управління проектами, нові напрямки розвитку, міжнародні і корпоративні стандарти в галузі управління проектами, питання розвитку організаційної зрілості проектного менеджменту та широке коло інших питань з області управління проектами, програмами та портфелями проектів.

В роботі [187] висвітлено технології і організаційні аспекти діяльності з управління проектами в рамках реалізації стратегії розвитку соціально-економічних систем, а також проаналізовані практичні аспекти реалізації проектів стратегічного розвитку регіонів на основі системної інтеграції новітніх знань. На підставі аналізу літературних джерел, що стосуються питань компетентності, професіонального рівня та кваліфікації, в [185] на основі методу ранжирування розроблено підхід щодо визначення компетентностей проектних менеджерів.

В роботі [42] запропоновано модель конвергенції параметрів систем. В рамках цієї моделі виділяються три рівня створення нових підходів до управління проектами на основі методів аналогій та визначається етап конвергенції параметрів систем як попередній до етапу інтеграції та

гармонізації. Визначена модель дозволяє розвивати інноваційні методи та моделі при прийнятті проектних рішень з огляду на постійні змінення внутрішнього стану та зовнішнього оточення. Стаття [36] присвячена розробці моделей управління програмами організаційного розвитку за умов невизначеності параметрів проектів і стохастичної динаміки зовнішнього оточення. Запропоновано модель поетапного зниження невизначеності в рамках системи управління проектами організаційного розвитку та дано математичний опис задачі управління невизначеністю в проактивній моделі організаційного розвитку. В роботі [43] запропоновано методи створення інноваційного розвитку проектно-керованих організацій. Формуванню структур організаційного управління проектами та розробці принципових структур організаційного управління проектами з використанням основ теорії автоматичного управління присвячено роботу [44].

Нові підходи до графічного представлення системної моделі проектів розвитку суб'єктів господарювання запропоновані в роботі [186] та обґрунтована доцільність застосування компетентнісного підходу до управління проектами, що базується на використанні проектного потенціалу як основного індикатору технологічної зрілості суб’єкта господарювання. Проблеми створення і розвитку конкурентоспроможних проектно-орієнтованих наукомістких підприємств досліджені в монографії [24]. В роботі [197] представлено метод самосинхронізації, який базується на представленні проекту як динамічної системи. Проблеми управління програмами інноваційного розвитку в сфері суднобудування досліджені в роботі [200], а також запропонована концепція простору управління метапрограмами як платформа інтеграції знань та координації між стейкхолдерами. В роботі [206] виконано аналіз основних проблем оцінки та мінімізації ризиків, що пов’язані з реалізацією проектів реструктуризації наукомістких підприємств, визначені основні напрямки ризикменеджменту та запропонована концепція оцінки ризиків для проектів, реалізація яких пов’язана з великим ступенем невизначеності.

В статті [212] запропоновано принципи формування холістичної цінності інноваційних проектів і програм з застосуванням методології P2M.

В роботі [343] вивчено проблему вибору проекту та його формалізації в умовах неповноти інформації. В цій роботі запропоновано концептуальну модель “карта проекту – критерії – обмеження”, яка виступає основою для формалізації процесів прийняття рішень щодо відбору проекту з врахуванням різних умов надання інформації. Згідно з цією моделлю, структура «проектної карти» представлена у вигляді наборів обмежень і критеріїв щодо обираємих проектів. Також розглянуто методи відбору проектів за одним або кількома критеріями.

У статті [52] розглядаються математичні моделі управління проектною діяльністю на всіх стадіях за участю інвестора проекту. Запропоновані моделі забезпечують реалізацію відповідних компетенцій і досягнення поставлених цілей при різних умовах здійснення проекту. В роботі [53] запропоновано підхід до управління проектною діяльністю, що враховує позиції різних зацікавлених сторін, тобто стейкхолдерів. Розглянуто ієрархічну структуру моделей для різних стейкхолдерів з урахуванням їх інтересів, завдань, функцій і рівнів управління, на яких вони оперують, визначені елементи моделей і описані можливі кроки процесу їх розробки.

У [181] викладено теоретичні засади управління проектами і розглянуто практичний інструментарій проектного управління. Крім традиційних питань теорії та практики управління проектами представлено нові концепції і рішення в цій області. Сучасні методи управління портфелями проектів і організації роботи офісу управління проектами проаналізовані в [75]. В тому числі розглянуті питання створення умов для успішного впровадження офісу управління проектами, широке коло проблем, що пов’язані зі стратегічним плануванням і вибором належного складу портфеля проектів та практичні аспекти впровадження офісу управління проектами в організації. Робота [68] присвячена розробці підходів щодо розробки теоретичних засад проектування систем автоматизації відбору інформації в проектах, програмах та портфелях

в проектно-орієнтованому управлінні. Намічено пріоритетні напрямки розвитку теорії та запропоновано формалізовану модель застосування інформаційних технологій для відбору проектів, програм та портфелів проектів. В роботі [201] зібрані практичні рекомендації щодо здійснення стратегічних змін і досягнення бізнес-цілей згідно з найвищими стандартами якості. У фокусі уваги знаходиться проектно-орієнтований підхід до управління як основа гнучкої організаційної структури, що побудована на базі принципів командної роботи. Викладені концепції і рекомендації підкріплені кейсами компаній з широкого спектру індустрій.

1.2. Дослідження сучасних підходів до управління проектами розвитку інфраструктури морського транспорту та перспективи їх впровадження в Україні

Ефективне функціювання транспортної інфраструктури має велике значення для розвитку як економіки, так і соціальної сфери держави. Тому дуже актуальним стають питання розвитку теоретичних і практичних методів та моделей управління проектами інноваційного розвитку транспортних систем і, в тому числі, об’єктів інфраструктури морського транспорту.

Значні результати в області теорії управління розвитком інфраструктури морського транспорту були отримані в роботах В.З. Ананьїної, Є.М. Воєвудського, В.П. Капітанова, І.О. Лапкіної, О.І. Лапкіна, М.Я. Постана, А.Н. Раховецького, С.І. Рилова, В.І. Чимшира, А.В. Шахова, О.Г. Шибаєва, Л.В. Ширяєвої та інших.

В роботі [67] запропоновано використання інтелектуальних систем для визначення параметрів продуктів масштабних інфраструктурних проектів та досліджені проблеми реалізації цих проектів. Питання розробки гібридних методологій та проблеми їх застосування для оптимізації процесів прийняття рішень в управлінні інфраструктурними проектами досліджені в [77] та

запропоновано модель гібридизації методології управління інфраструктурними проектами.

Через те, що в даний час спостерігається істотне скорочення тривалостей життєвих циклів інфраструктурних програм, та в зв’язку з тим, що більшість з цих програм містять проекти різних напрямків діяльності і базуються на різних методологіях управління, включаючи як «водоспадні» методології, що передбачають жорсткий життєвий цикл, так і Agile методології, постає необхідність в використанні інструментів конвергенції для формування «гібридних» методологій. Розробці гібридних методологій управління інфраструктурними проектами, програмами і портфелями проектів присвячена робота [37].

Питання обґрунтування поповнення ресурсів морських портів для оптимізації режимів їх роботи та підвищення ефективності обслуговування морських суден в портах досліджені в роботах [5, 6]. Широке коло питань щодо підготовки та обґрунтування рішень по управлінню перевезеннями і організації роботи флотів морських судноплавних компаній досліджено в [184, 216, 219]. Проблеми організації і управління роботою флоту в формі послідовних рейсів вивчені в [94]. Дослідженню розподілу ступеня впливу комерційних ризиків при тайм-чартерній оренді суден присвячено статтю [217]. В роботах [48, 49] запропоновані методи побудови стохастичних моделей роботи портів та управління діяльністю логістичних систем.

Робота [51] присвячена розробці наукових засад проектування систем управління процесами в ланцюгах постачань. Проаналізовані основні проблеми проектування транспортних систем, розв'язання яких потребує комплексного підходу. Досліджено напрями підвищення ефективності роботи транспортних вузлів, які функціонують в системах ланцюгів постачань. Розвиненню ймовірнісних методів і моделей управління відтворенням парків обладнання присвячено монографію [220]. В роботі [38] розглянуто метод зміни парадигм управління інфраструктурними проектами і програмами, а також запропоновано модель життєвого циклу інфраструктурного проекту,

яка дозволяє формувати стратегії проактивного управління інфраструктурними проектами з урахуванням точок біфуркації. Питання стратегічного аудиту інфраструктурних проектів і програм, а також питання розвитку потенціалу управління проектами вивчені в роботах [82, 240, 242].

В роботі [269] запропоновано модель, яка заснована на використанні методів теорії масового обслуговування, що дозволяє будувати траєкторії розвитку віртуальних або реальних проектних систем. Вивченню проектно-орієнтованого управління функціонуванням ремонтопридатних технічних систем, а також створенню моделей оптимізації змісту проектів за критеріями: прибуток, час, вартість, якість, ризики – присвячені роботи [83, 215]. Питання профілювання стратегій розвитку в управлінні інфраструктурними проектами вивчені в [34, 78, 209]. У роботі [249] запропоновано підходи до створення систем підтримки прийняття рішень щодо формування стратегій розвитку високотехнологічних підприємств. У статті [224] досліджено вплив фактору невизначеності на оптимальні терміни служби складного обладнання, а також вивчені питання обґрунтування оптимального проекту придбання та використання обладнання, що схильне до морального та фізичного зносу.

Розробці методичних підходів до ініціалізації проектів транспортних підприємств присвячено статтю [18]. В роботі [76] розглянуто питання інтеграції в проектах мультимодальних логістичних комплексів на базі синтезу логістичного та проектного підходів. В роботі проаналізовано ризики, що пов’язані з розривами інтеграційних зв'язків в проектах та обґрунтовано доцільність виділення окремої групи інтеграційних ризиків, які впливають на системну цілісність проектів створення мультимодальних логістичних комплексів.

Вибір пріоритетів розвитку морської транспортної інфраструктури має носити комплексний характер і бути пов’язаним з технічним, технологічним та структурним розвитком. Морські порти містять рухомі та нерухомі об’єкти інфраструктури, які забезпечують їх роботу. До таких об’єктів можна віднести акваторію, гідротехнічні споруди, доки, судна портофлоту, засоби

навігаційного обладнання, об’єкти навігаційно-гідрографічного забезпечення морських шляхів, системи управління рухом суден, інформаційні системи, перевантажувальне обладнання, залізничні та автомобільні під’їзні шляхи, лінії зв’язку, засоби теплопостачання, газопостачання, водопостачання, електропостачання, та інші засоби, обладнання, інженерні комунікації, які розташовані в межах території та акваторії морського порту і призначені для безпеки мореплавства, надання послуг та здійснення державного нагляду в морських портах [54]. Згідно з документами ЄС (Європейського Союзу), під міжнародними транспортними коридорами мається на увазі цілий комплекс засобів, що включає в себе наземні та водні транспортні магістралі та відповідну інфраструктуру, до якої відносяться під'їзні шляхи, споруди та обладнання, сервісні пункти, вантажні й пасажирські термінали та устаткування для управління рухом. Цей комплекс засобів має відповідати вимогам, що регламентуються законодавчими і нормативними актам ЄС [54]. Інтеграція України в міжнародні транспортні коридори прискорює її включення до Європейської економічної системи, сприяє залученню інвестицій у розвиток вітчизняної транспортної системи, збільшує валютні надходження від транзитних перевезень та стимулює збільшення обсягів продукції, що йде на експорт. Створення транспортних коридорів та їх включення до міжнародної транспортної системи визнано одним з пріоритетних загальнодержавних напрямків розвитку транспортного комплексу України.

В Україні налічується 13 морських портів: Одеса, Чорноморськ, Южний, Миколаїв, Маріуполь, Ольвія, Херсон, Скадовськ, Бердянськ, Рені, Ізмаїл, Усть-Дунайськ, Білгород-Дністровський. Сумарна пропускна спроможність всіх портів становить 240 млн. тон на рік [1, 198]. На разі в портовій галузи працює понад 1300 суб’єктів господарювання та задіяно більш ніж 47 тис. робітників. Загальні надходження від діяльності морських портів складає біля 2% ВВП України [198]. Морські порти забезпечують понад 40% обсягу міжнародної торгівлі України. Через морські порти експортується більша

частина продукції вітчизняного агропромислового і гірничо-металургійного комплексів та імпортується вугілля, залізорудна сировина та вантажі в контейнерах. До факторів, які можуть виступати в якості основних драйверів розвитку портової галузі України, більшість експертів [198] відносять:

– те, що морські порти вигідно розташовані на перетині транспортних коридорів транзитних вантажопотоків у напрямку Європи, Азії та Близького Сходу;

– близькість морських портів до центрів споживання і виробництва продукції та формування масових вантажів;

– наявність достатніх потужностей з обробки та зберігання як експортних, імпортних, так і транзитних та каботажних вантажів широкої номенклатури;

– наявність можливостей розвинення необхідної інфраструктури морських портів для спряження з іншими видами транспорту – трубопровідним, залізничним, автомобільним та річковим;

– можливість трансшипменту для транспортування вантажів по річці Дунай з/до країн Європейського Союзу;

– високий потенціал морських портів із обробки вантажів чорних металів, вугілля, залізорудного концентрату та зернових вантажів, що наразі є основними статтями зовнішньої торгівлі України;

– наявність нормативно-правової бази щодо можливості залучення приватних інвестицій для розвитку портової галузі в Україні та здійснення державного інвестування в проекти щодо забезпечення сприятливих умов розвитку суб’єктів господарювання на території морських портів;

– наявність кваліфікованих спеціалістів та робітників портової галузі.

Останніми роками спостерігається збільшення обсягів перевалки вантажів через морські порти України. Так, за 2019 р. в українських портах було перевантажено понад 160 млн. т. вантажів [1]. Також спостерігається зростання обсягів річних перевезень. За думкою експертів, таких результатів вдалося досягти завдяки зкоординованій роботі вантажовласників,

судноплавних компаній, стивідорних компаній, агентів та Адміністрації морських портів України. Найбільш динамічне зростання – понад 30% спостерігається для перевалки зернових вантажів та руди. Також є позитивна динаміка в контейнерних перевезеннях. За 2019 перевантажено понад 1 млн. TEU, тоді як 2018 році було оброблено менш ніж 850 тис TEU [1].

В 2019 р. через морські порти було перевантажено приблизно 121 млн. т. експортних вантажів, 26 млн. т. імпортних вантажів та близько 13 млн. т. – транзитних вантажів та вантажів внутрішнього сполучення. За попередній, 2018 р., обсяги перевалки складали 99 млн. т. вантажів в експортному напрямку, 24 млн. т – в імпортному та приблизно 12 млн. т. припадало на транзитні вантажі та вантажі внутрішнього сполучення. Тобто спостерігається позитивна динаміка по всіх напрямках перевезень. Також можна відмітити, що в даний час приблизно 75 % від всіх вантажів, що проходять через морські порти України, складають експортні вантажі. Значна частина вантажопотоку припадає на чотири порти – Южний, Одеський, Миколаївський та Чорноморський і становить 87 % від загального обсягу. Ключовою перевагою цих портів є наявність глибоководних підходів та необхідної інфраструктури для обслуговування великих суден. Решта українських портів не має необхідної інфраструктури для обробки великотоннажних суден. Дані щодо обсягів вантажів, які були перевалені через вітчизняні порти за останні роки, наведені в табл. 1.7 [1] та на рис. 1.8 і 1.9.

Відповідно до звітів МВФ [198, 373] прогнозується, що сумарні обсяги обробки вантажів в морських портах України становитимуть: 165 млн. т, в тому числі 710 тис. TEU, в 2022 р.; 209 млн. т, в тому числі 899 тис. TEU, в 2030 р. і 265 млн. т, в тому числі 1139 тис. TEU, в 2038р. Оцінці економічного потенціалу українських морських портів, зважаючи на перспективи реалізації їх інноваційних можливостей, присвячено статтю [54]. Адміністрація морських портів України ініціювала процес узгодження Стратегії розвитку морських портів України на період до 2038 року [178]. Метою даної стратегії [198] є визначення концептуальних засад формування державної політики

планування та розвитку портової галузі України, спрямованих на збільшення вантажообігу в морських портах, забезпечення потреб зовнішньої торгівлі країни, підвищення ефективності використання наявних потужностей в морських портах та збалансований розвиток нових із достатньою пропускною спроможністю наземної інфраструктури, покращення сервісу в морських портах та забезпечення оптимальної логістики вантажів.

Рисунок 1.8 – Розподіл загального вантажопотоку по українських морських портах в 2019 р.

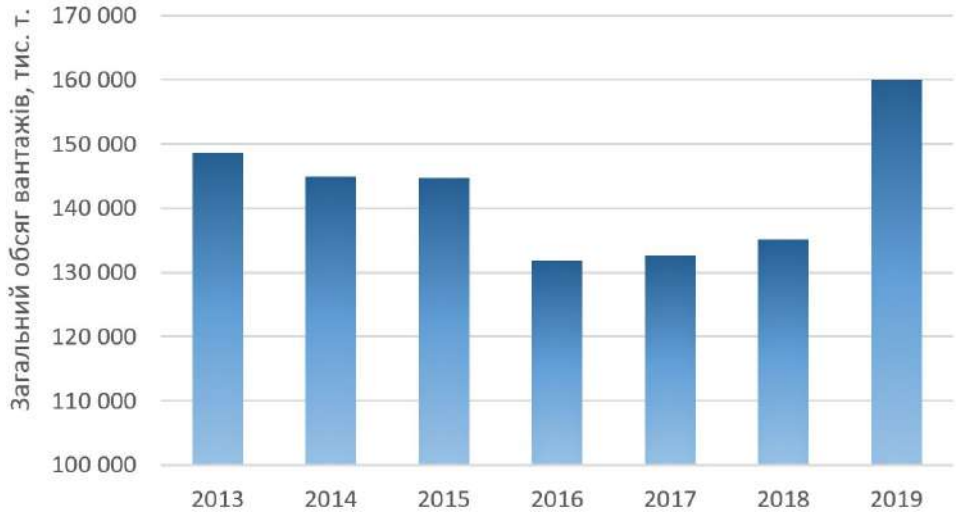


Рисунок 1.9 – Динаміка загального обсягу вантажів, оброблених в українських морських портах

Таблиця 1.7 – Змінення обсягів обробки вантажів в Українських портах по роках, тис. т. [1]

	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	Січень-серпень 2020
Бердянський морський порт	2163,50	3197,10	4450,80	3800,70	2397,80	1812,60	2074,20	1544,60
Білгород-Дністровський морський порт	667,36	614,72	715,70	462,93	352,41	235,45	117,26	55,52
Ізмаїльський морський порт	2762,65	3092,98	4825,20	5682,62	5097,87	4683,29	4283,30	2159,68
Морський порт Чорноморськ	16458,53	17613,18	17298,39	15942,00	17225,20	21535,49	26153,00	15419,45
Маріупольський морський порт	15499,01	13003,20	8984,04	7603,50	6514,47	5887,86	6483,75	4654,37
Миколаївський морський порт	20304,00	20802,83	22232,61	22424,31	23534,80	29204,82	33432,93	19303,15
Одеський морський порт	23170,60	24579,15	25585,85	25250,85	24136,58	21698,39	25343,62	15624,18
Ренійський морський порт	2789,06	1464,76	906,93	972,37	1124,90	1332,65	1275,27	589,74
Скадовський морський порт	276,25	58,38	37,90	32,90	20,90	8,40	4,70	3,80
Спеціалізований морський порт Ольвія	5567,27	6975,07	6911,11	6538,53	6880,46	2944,10	3097,20	2662,19
Морський порт "Усть-Дунайськ"	39,10	61,55	22,50	25,40	54,20	51,10	70,80	14,50
Херсонський морський порт	4133,16	3900,95	4133,89	3712,23	3341,02	3074,68	3802,68	1885,24
Морський порт "Южний"	43441,40	47431,70	48582,07	39297,57	41897,83	42702,24	53862,51	42044,62
ВСЬОГО ВАНТАЖІВ	148605,62	144866,10	144646,16	131745,91	132578,44	135171,07	160001,22	105961,04

Для досягнення цієї мети були визначені стратегічні цілі за такими пріоритетними напрямами [198]: збалансований розвиток та ефективне використання портових потужностей на інноваційній основі; забезпечення конкурентоздатної логістики та покращення сервісу в морських портах; оптимізація системи управління галузі морських портів.

Наразі Міністерство інфраструктури України ініціює пошук інвесторів і старт робіт над рядом великих інвестиційних проектів щодо розвитку інфраструктури морського транспорту [72]. Так, в Одеському порту розглядаються можливості реалізації проектів розвитку території судноверфі «Україна», проекту розвитку перевантажувальних потужностей на території нафторайону та проекту розвитку пасажирського комплексу на загальну суму понад 1,52 млрд. грн.; в Бердянському порту – проекту будівництва перевантажувального комплексу на причалах № 9, 10 та проекту будівництва спеціалізованого перевантажувального комплексу на причалі № 11 загальною вартістю понад 420 млн. грн.; в порту Ольвія – проекту будівництва зернового комплексу на запроектованому причалі № 0, проекту будівництва перевантажувального комплексу в тилу допоміжного причалу та проекту будівництва перевантажувального комплексу на запроектованому причалі № 7 загальною вартістю понад 1,6 млрд. грн. та ряд інших проектів [72]. Загалом Міністерство інфраструктури України розглядає можливість в найближчій перспективі залучити інвесторів для реалізації 27 великих інвестиційних проектів в формі державно-приватного партнерства, загальна вартість яких становитиме понад 4,8 млрд. грн [72].

Проведений аналіз показує, що інфраструктура морського транспорту має ключове значення як для економічного, так і соціального розвитку України. Тому великий практичний інтерес становить розвиток теоретичних та практичних методів управління проектами інноваційного розвитку інфраструктури морського транспорту. Незважаючи на те, що в теорії управління розвитком інфраструктурних об’єктів, і в тому числі об’єктів транспортної інфраструктури морського транспорту, за останні роки були

отримані значні результати, ряд практично важливих проблем ще залишається дослідженими недостатньо.

1.3. Висновки до першого розділу

1. В даному розділі досліджено існуючі моделі, методи та інструменти управління інноваційними проектами та проектами розвитку інфраструктури морського транспорту.

2. Виконано систематизований огляд сучасного стану досліджень та аналіз підходів та методів з теорії управління проектами, теорії управління інноваційними проектами, а також управління проектами розвитку транспортної інфраструктури.

3. Вагомий внесок у розвиток теорії управління проектами, і в тому числі інноваційними проектами та їх портфелями, було зроблено завдяки роботам вітчизняних і зарубіжних вчених: С.Д. Бушуєва, Н.С. Бушуєвої, І.А. Бабаєва, А.О. Білощицького, В.М. Буркова, В.О. Вайсмана, Т.А. Воркут, В.І. Воропаєва, В.Д. Гогунського, О.Б. Данченко, Є.А. Дружиніна, Д.И. Кендалла, К.В. Колеснікової, К.В. Кошкіна, І.В. Кононенка, І.О. Лапкіної, О.М. Медведєвої, М.Л. Разу, Ю.П. Рака, В.А. Рача, С.В. Руденка, О.В. Сидорчука, Х. Танаки, С.К. Чернова, І.В. Чумаченка, А.В. Шахова та інших.

4. Значні результати в області теорії управління розвитком інфраструктури морського транспорту було отримано в роботах В.З. Ананьїної, Є.М. Воєвудського, В.П. Капітанова, І.О. Лапкіної, О.І. Лапкіна, М.Я. Постана, А.Н. Раховецького, С.І. Рилова, В.І. Чимшира, А.В. Шахова, О.Г. Шибаєва, Л.В. Ширяєвої та інших.

5. Наукові праці зазначених авторів є важливими для теорії управління проектами та портфелями, і в тому числі проектами розвитку інфраструктури морського транспорту і флоту. Однак, управління проектами

інноваційного розвитку сучасної морської інфраструктури вимагає нових підходів, які були б здатні відповідати потребам часу.

6. Існує потреба в удосконаленні існуючих та розвитку нових підходів, моделей та методів, які формують методологію інноваційно-орієнтованого управління проектами розвитку інфраструктури морського транспорту.

РОЗДІЛ 2
РОЗРОБКА КОНЦЕПТУАЛЬНОЇ МОДЕЛІ УПРАВЛІННЯ ІННОВАЦІЙНИМ РОЗВИТКОМ ІНФРАСТРУКТУРИ МОРСЬКОГО ТРАНСПОРТУ

2.1. Обґрунтування необхідності пошуку нових підходів до організації управління інноваційними проектами

Впровадження інноваційних технологій є головним драйвером розвитку підприємств в сучасних умовах високої конкуренції та мобільності капіталу і ресурсів. Однак ефективний і сталий розвиток підприємств, націлених на активний пошук, розвиток і впровадження інновацій, неможливий без розвитку відповідної внутрішньої організаційної структури цих підприємств. В даний час система управління багатьох компаній недостатньо пристосована для ефективного впровадження інновацій. Наявність необхідних ресурсів, особистий досвід, здатність сприймати нові ідеї, вмотивованість, морально-ділові та лідерські якості керівництва і колективу фахівців мають велике значення для успішної реалізації інноваційних проектів, але в багатьох випадках цього недостатньо [22, 30, 34, 39, 42]. Проблеми, що пов'язані з ефективним і стійким розвитком інноваційно-орієнтованих компаній, значною мірою є наслідком об’єктивних причин, серед яких суттєве місце посідає обрана організаційна структура підприємства.

В даний час все більшого поширення набувають методи і практики управління проектами, які прийнято називати Agile [329, 353] методами. Такі методи отримали розвиток і широке використання на практиці, оскільки вони є найбільш ефективними для організації системи управління інноваційними проектами. Класичний підхід до управління проектами і програмами орієнтований на те, що основні цілі, необхідні ресурси і процеси, які планується здійснити в рамках проекту, можуть бути ідентифіковані та досить точно оцінені на початкових стадіях життєвого циклу проєкту. Тому представляється можливим досить докладно структурувати фази життєвого

циклу проекту, що реалізовується, підібрати оптимальну структуру управління, в рамках якої точно визначити цілі, ролі і обов'язки, а також досить точно оцінити необхідні ресурси і часові межі всіх етапів реалізації проекту, вказати проміжні і головні результати, можливі ризики і т.д. [10, 44, 45]. При такому підході до управління проектами і програмами, як правило, реалізується вертикальний стиль управління. Класичний підхід до управління проектами і програмами має значну кількість незаперечних переваг. В рамках такого підходу можна ефективно реалізовувати управління проектами і програмами великих масштабів. Однак такий підхід заснований на жорстких методах управління і тому не є найбільш підходящим для реалізації інноваційних проектів.

Використання Agile методів, навпаки, більшою мірою реалізує горизонтальний стиль управління. Такі методи, як правило, розвиваються інкрементно або ітеративно. Agile методи дозволяють управляти проектами, для яких немає можливості точно сформулювати мету і вказати точні шляхи її досягнення на початкових етапах реалізації [328, 353]. При цьому капіталовкладення на досягнення мети проекту та навіть сама мета проекту можуть уточнюватися і змінюватися після кожної ітерації. На відміну від класичного підходу до управління проектами, при використанні Agile методів внесення великої кількості змін по ходу виконання проекту не пов'язане зі значними труднощами і в більшості випадків навіть вітається.

У ряді випадків впровадження Agile методів управління може бути ускладнено внаслідок ряду об'єктивних внутрішніх і зовнішніх причин. Наприклад, великі будівельні проекти, як правило, вимагають точної узгодженості дуже великої кількості процесів, що протікають одночасно, і чіткого розподілу повноважень і відповідальності. Тому такі проекти вимагають розробки чіткого детально опрацьованого плану на початкових стадіях і жорсткої вертикальної координації надалі. Крім того, наявність чітких планів з детальним зазначенням необхідних ресурсів і проміжних результатів, за якими можна було б контролювати хід виконання проекту,

може бути вимогою інвесторів або стейкхолдерів [206]. Але, незважаючи на ряд недоліків і обмежень, використання Agile методів при реалізації інноваційних проектів і програм має ряд істотних переваг в порівнянні з класичними методами.

Можна вказати багато проектів, для реалізації яких доцільно використовувати виключно Agile методи. З іншого боку, існують проекти, які можуть бути максимально ефективно реалізовані тільки з використанням класичних вертикальних методів управління. Але також можна навести ряд прикладів, в яких ані чисто класичний підхід, ані підхід, що базується виключно на Agile методах, не є ідеальними способами реалізації функцій управління [82, 208, 209]. У таких випадках очевидно, що успішна реалізація проекту потребує тих можливостей, які забезпечуються обома підходами до управління проектами. Можна припустити, що оптимальний вихід може полягати в тому, щоб в одному офісі управління проектом реалізувався комбінований підхід до управління, який би поєднував частину методів і практик, що відносяться до класичного підходу, з методами і практиками, які належать до Agile підходу. Можливо, в деяких окремих випадках таке поєднання підходів може виявитися ефективним. Але ми поділяємо думку авторів [258, 259, 290], які схиляються до тієї точки зору, що поєднання класичних методів управління з Agile методами в одному офісі управління проектами є складно реалізованим і неоднозначним рішенням. У ряді випадків таке комбінування методів управління може бути джерелом неефективності і нестійкості управління. По ряду ключових аспектів класичний підхід і Agile підхід суперечать один одному. Так, на думку творців SCRUM методології [258, 259], використання методів SCRUM не в повному обсязі або будь-яке комбінування SCRUM з іншими методами управління проектами не просто здатне спричинити погіршення ефективності управління проектом, а й різко негативно позначитися на результатах [258, 290]. Важливо і складно організувати управління проектами на початкових стадіях їх реалізації, тому що ці стадії характеризуються особливо високим рівнем невизначеності [81].

В міру реалізації інноваційного проекту рівень невизначеності зменшується і, в зв'язку з цим, може виявитися доцільною зміна методів управління цим проектом. Таким чином, на різних стадіях виконання робіт можуть бути ефективними істотно різні методи управління [35].

В роботі [329] аналізуються питання стійкості управління проектами з урахуванням сучасних методів, практик, знань і майбутніх тенденцій в сфері управління проектами. У статтях [241, 243] дається опис творчого потенціалу, проблем його формування, розвитку і ефективного використання при розробці та реалізації стратегії інноваційного розвитку підприємств України, а також пропонуються і досліджуються механізми оцінки компетенцій керівників проектів для їх розвитку на основі глобальних тенденцій і гнучкої методології Agile.

Розробці алгоритмів відбору кандидатів в IT-проекти, а також побудові систем прийняття рішень з використанням сучасного програмного забезпечення, що підтримує автоматизацію звітності та управління, присвячені роботи [249, 360]. Моделям і методам управління проектами в сфері логістики та організації транспортних систем в умовах коливань попиту, а також питанням управління розподілом трафіку в інфокомунікаційних мережах систем критичної інфраструктури присвячені роботи [287, 288, 294, 354]. Питання, що пов'язані з проектами оптимізації міської транспортної інфраструктури з урахуванням людського фактору, розглянуті в [254].

У роботах [285, 286] запропоновано методи оптимізації портфеля проектів протягом планового періоду з урахуванням післядії. Питанням розробки методів формування архітектури інноваційних програм і використання інноваційних ризик-орієнтованих механізмів управління проектами в транспортних системах присвячені роботи [213, 338, 339, 346]. У статті [337] запропонована модель життєвого циклу вигід проекту з використанням методів масового обслуговування.

Робота [357] присвячена розробці концепції та методу побудови конкретизованих методологій управління проектами. Розвитку методів

управління інноваційними інформаційними системами в сфері охорони здоров'я, а також управління проектами розвитку сховищ даних присвячені роботи [361, 362]. Розробці методів і моделей управління проектами з використанням апарату багатокритеріальної оптимізації присвячені роботи [98, 295, 305].

Питання розробки та дослідження моделей формування дорожніх карт розвитку підприємств вивчені в роботі [333]. Дослідженню доцільності синтезу логістичного та проектного підходів до аналізу ризиків проектів мультимодальних логістичних центрів присвячено статтю [76].

Питанням формування підходу до визначення успішності проектів, пов'язаних з розробкою нового продукту (NPD-проектів), на різних стадіях їх життєвого циклу, а також вивченню динамічних показників доцільності і успішності проектів присвячені роботи [7, 9, 202].

Для більшості компаній проблема впровадження Agile методів управління полягає в тому, що в силу ряду об'єктивних причин організація системи управління проектами реалізується в рамках класичних методів управління, і загальна структура управління такими компаніями відповідає класичному способу управління проектами. Однак такий підхід до управління не дає можливості реалізовувати ефективне управління інноваційними проектами. Особливо на початкових стадіях реалізації інноваційні проекти можуть давати результати, які погано піддаються прогнозуванню і мають неприйнятно високий рівень ризику, внаслідок чого виникають проблеми планування і складності, пов'язані із залученням інвесторів [36, 43].

Великий практичний інтерес представляє рішення проблеми побудови такої архітектури системи управління інноваційно орієнтованої організації, в рамках якої можна було б реалізувати переваги як класичних методів управління проектами, так і Agile методів. Метою даного розділу є розробка моделі організації структури управління компанії, в рамках якої можна було б реалізувати паралельне функціонування декількох підрозділів, які

використовували б загальні ресурси, але при цьому могли б базуватися на концептуально різних підходах до побудови системи управління.

Для реалізації такої структури управління в дисертаційній роботі запропоновано розвиток наступних чотирьох концепцій:

концепції «інкубатора проектів», в рамках якої реалізується структура управління проектно-орієнтованої компанії;

концепції «дозрівання інновації», в рамках якої реалізується управління передумовами своєчасної ініціації і успішної реалізації інноваційного проекту;

концепції «пісочниці» – концепції управління доступом до ресурсів проектно-орієнтованої організації;

концепції «управління можливостями», в рамках якої реалізується диференційований підхід до управління невизначеністю інноваційних проектів: управління можливостями на початкових етапах дозрівання інноваційного проекту і перехід до управління ризиками на стадії ініціації і реалізації R&D проекту.

2.2. Розвиток концепції «інкубатора проектів»

Для впровадження інноваційних технологій в компаніях, в яких з ряду об'єктивних причин управління проектами засноване на використанні класичних методів управління, в роботі запропоновано внести зміну в структуру управління цих компаній. А саме, пропонується виділити в структурі управління таких компаній додатковий підрозділ, одним з головних завдань якого є створення необхідної інфраструктури для пошуку, ідентифікації та «дозрівання» інноваційних продуктів, послуг або технологій до такого стану, коли вони могли б бути реалізовані в рамках відповідного R&D проекту. Далі цей підрозділ будемо називати «інкубатором проектів» [310]. Крім того, запропонований підрозділ може займатися технологічним бенчмаркінгом, тестуванням нових технологій і узгодженнями в командах фахівців для роботи з новими технологічними стандартами. Концептуальна

модель управління R&D проектами з використанням інкубатора проектів представлена на рис. 2.1. Відповідно до цієї моделі ініціація більшості звичайних проектів відбувається за стандартною схемою:

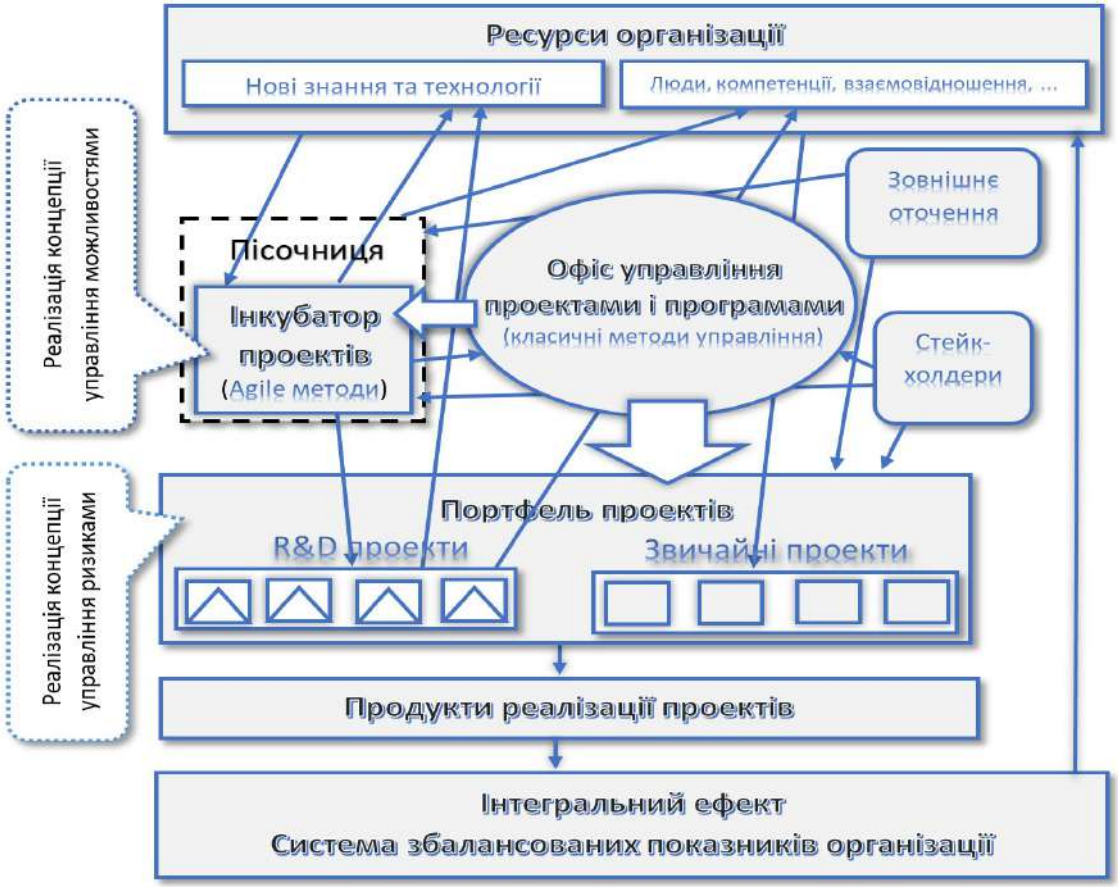


Рисунок 2.1 – Концептуальна модель системи управління проектами в компанії з використанням «інкубатора проектів»

офіс управління проектами і програмами, взаємодіючи з потенційними стейкхолдерами майбутнього проекту, аналізує поточний стан і можливі майбутні зміни навколишнього середовища, оцінює потенційні вигоди і ризики, які пов'язані з реалізацією даного проекту, і на підставі цієї оцінки приймає рішення про виділення власних ресурсів, ресурсів інвесторів і залучення коштів для старту і реалізації проекту.

У тих випадках, коли розглядається питання виробництва інноваційного продукту, послуги або впровадження нових технологій, неможливо дати достатньо точні оцінки результатів. Тому такі проекти неможливо точно планувати, а ризики, що пов'язані з реалізацією таких проектів, занадто великі. Отже, перш ніж починати роботи над такими проектами, доцільно створення

дослідницької команди, головним завданням якої був би аналіз і опрацювання потенційних можливостей інноваційних продуктів або технологій і їх «дозрівання» до такої міри, коли невизначеність буде зменшена так, щоб можна було ініціювати відповідний R&D проект, який реалізує ці інновації, або мати достатні підстави для того, щоб відкласти або навіть відмовитися від реалізації цих інновацій. Інкубатор проектів є тим підрозділом в системі управління, в рамках якого відбувається управління і координація робіт, які виконуються такими дослідницькими командами, та їх інтеграція в загальну систему управління. Команди, що працюють в інкубаторі проектів, можуть складатися як із співробітників компанії, в якій планується створювати даний проект, так і з залучених фахівців.

2.3. Організація управління всередині інкубатора проектів

Agile методи управління показали свою ефективність для проектів, в яких немає можливості точно визначити цілі на початковій стадії планування. Саме Agile методи здатні в більшості випадків стати основою організації управління всередині інкубатора проектів. Ітеративний підхід до розробки дозволяє оцінювати ступінь дозрівання інноваційного проекту і коригувати напрямок досліджень після закінчення кожної ітерації.

Нові технології, які пройшли дозрівання в інкубаторі проектів, в подальшому можуть бути реалізовані в рамках дуже великих R&D проектів. Однак на етапі досліджень, що проводяться в інкубаторі проектів, всі роботи доцільно проводити в рамках невеликих, незалежних, автономно працюючих команд професіоналів. Якщо для роботи над новою технологією потрібне проведення великої кількості робіт, що вимагають залучення великої кількості фахівців, то слід докласти максимум зусиль для того, щоб структурувати дослідження таким чином, щоб кожна частина дослідження могла проводитися автономно невеликою командою розробників.

З одного боку, потенційні R&D проекти, що направляються в інкубатор на «дозрівання», повинні відповідати цілям і місії компанії. До того ж такі дослідження використовують ресурси компанії, причому іноді досить значні. Тому управління дослідженнями в інкубаторі має активно координуватися з загальною організаційною структурою компанії. З іншого боку, інноваційні дослідження найчастіше потребують підходів, які можуть істотно відрізнятися від тих методів управління і відповідної звітності, які практикуються в компанії. Такі інноваційні дослідження зазвичай потребують значної свободи команди проекту. Тому для реалізації цих протилежних умов виникає необхідність у формуванні спеціальних підходів до організації системи управління всередині «інкубатора проектів» і його інтеграції в структуру управління компанією.

В звичайних проектах велика частина спілкування всередині команди формалізована, багато документів стандартизовані, тому, як правило, весь документообіг можна ефективно реалізувати в рамках інформаційних інтегрованих систем документообігу, які дозволяють чітко структурувати обов'язки, повноваження і рівні доступу до даних для більшості членів команди. Завдяки можливості чіткої структурованості і формалізації, можна забезпечити ефективність одночасної роботи над проектом великої кількості співробітників. Роботи, які пов'язані з дослідженням інновацій, мають високий ступінь невизначеності, що зазвичай не дозволяє структурувати виконання дослідницьких робіт відповідно до існуючих стандартів компанії. Спроби надмірно формалізувати спілкування всередині дослідницької команди можуть перешкоджати роботі. В даний час для таких робіт широко використовуються хмарні сховища з реалізацією спільного доступу і роботи всіх членів команди над документами проекту. Водночас збільшення команди дослідницького проекту буде негативно відбиватися на його керованості і спричинятиме виникнення проблем з комунікаціями. Тому координація робіт, що проводяться всередині інкубатора проектів, представляє певну проблему. Одним з найбільш ефективних інструментів такої координації може бути

використання SCRUM з синхронізацією циклів і ефективною організацією SCRUM спринтів. В табл. 2.1 представлено порівняння підходів до організації системи управління роботами в рамках інкубатора проектів і в рамках портфеля або програми R&D проектів [310].

Таблиця 2.1 – Порівняння підходів до організації системи управління роботами в рамках інкубатора проектів і в рамках портфеля або програми R&D проектів

	Організація системи управління дослідженням в рамках інкубатора проектів	Організація системи управління R&D проектом в рамках портфеля або програми
Місія	Ідентифікувати максимум можливостей нового продукту або технології і оцінити з прийнятним рівнем похибки їх характеристики, отримати нові знання, підвищити професійний рівень та досвід фахівців.	Максимізувати інтегральний ефект проекту відповідно до заздалегідь визначених цілей проекту, мінімізувати можливі ризики.
Команда	Дослідницька команда складається з невеликої кількості високо мотивованих, самодісциплінованих професіоналів, здатних до творчої дослідницької роботи, до яких пред'являються високі професійні та особистісні вимоги.	Кількість членів команди проекту може варіюватися від невеликої до дуже великої. Професійні та особистісні вимоги, що пред'являються кожному члену команди, відповідають тій чітко визначеній ролі, яку виконуватиме даний член команди.
Комунікації всередині команди	Велика частина передачі інформації може бути не формалізованою. Використання хмарних сховищ з реалізацією спільного доступу і роботи всіх членів команди над документами проекту. Значна частина інформації передається в процесі міжособистісного спілкування.	Велика частина передачі інформації формалізована. Використання інтегрованої системи документообігу.
Регламент	Дослідницька група максимально вільна у виборі способів, методів і проміжних цілей досліджень. Зафіксовано лише напрямок дослідження. Обов'язки та повноваження членів команди перерозподіляються в процесі роботи, виходячи з поточної доцільності.	Все регламентовано технічним завданням, статутом проекту, планом виконання робіт і рядом інших документів. Обов'язки та повноваження членів команди чітко визначені.

Зміни	Зміни планів роботи відбуваються постійно. Зміни можуть бути досить істотними, вони заохочуються і максимально враховуються на будь-якій стадії дослідження. Цілі уточнюються і узгоджуються по мірі роботи. План досліджень і повноваження виконавців постійно коригуються відповідно до поточної доцільності.	Цілі і план проекту мало схильні до змін. Необхідний облік і контроль змін. Зростання числа змін завжди негативно позначається на ефективності управління проектом.
Стиль управління	Горизонтальне управління. Значна внутрішня самоорганізація команди.	Вертикальне управління. Дії кожного члена команди значною мірою регламентовані проектною документацією і цілком конкретними завданнями, що поставлені керівництвом.
Відносини всередині команди	Ефективність роботи істотно залежить від ступеня відкритості, рівня довіри між членами команди і здатності комунікувати на міжособистісному рівні. Тому відчуття комфорту, конструктивний емоційний настрій і мотивація членів команди вкрай важливі.	Відносини всередині команди значною мірою можуть бути регламентовані і формалізовані. Тому відкритість і взаємна довіра між членами команди дуже бажані, але не є критично необхідними факторами, якщо це не заважає виконанню кожним членом команди своїх функцій.
Використання ресурсів	Набагато менша кількість ресурсів, в порівнянні з R&D проектом, в який потенційно може перерости дане дослідження. Пріоритетна мета – ідентифікувати максимум можливостей, використовуючи всі доступні ресурси. Мета економії ресурсів, як правило, не ставиться. Максимально оперативний перерозподіл наявних ресурсів між виконанням тих чи інших завдань на розсуд команди досліджень. Практично повна відсутність зовнішнього контролю над поточним використанням наявних ресурсів. Дослідницька команда не має повноважень самостійно залучати додаткові ресурси. Виділення додаткових ресурсів може прийматися тільки на рівні ради	Виділення ресурсів планується на початку проекту, виходячи з чітко сформульованих цілей проекту. При цьому одним з головних завдань планування і управління проектом є досягнення поставлених цілей, використовуючи мінімум ресурсів. На рівні керівництва проектом можливе прийняття рішень про перерозподіл або залучення певних обсягів додаткових ресурсів за погодженням зі спонсорами і стейкхолдерами з дотриманням формальних процедур і використанням спеціальних методів управління змінами. Здійснення постійного внутрішнього і зовнішнього моніторингу.

	директорів компанії або офісу управління програмами і проектами.	
Ставлення до ризиків	Більшість робіт, що проводяться в інкубаторі проектів, може навіть не мати чітко сформульованої мети. Рівень невизначеності дуже великий. Тому для управління такими роботами класичні методи управління ризиками не цілком підходять. У зв'язку з цим для організації системи управління дослідженнями в рамках інкубатора проектів основну увагу сконцентровано ні на управлінні ризиками, а на управлінні можливостями.	Оскільки реалізація R&D проектів пов'язана зі значними невизначеностями, управління ризиками є одним з головних аспектів управління такими проектами. Для ідентифікації і кількісної оцінки ризиків, пов'язаних з реалізацією R&D проектів, використовуються відповідні методи управління ризиками, а також математичні методи теорії ймовірностей, випадкових процесів і математичної статистики.
Знання та досвід	Значна частина набутих знань може бути не формалізованою. Звітна документація може містити лише невелику частину інформації в порівнянні з тими знаннями, навичками, особистим досвідом і ерудицією, які набувають члени дослідницької команди в процесі роботи. Таким чином, носіями значної частини знань будуть люди. Тому компанії, в якій передбачений інкубатор проектів, доцільно приймати ряд додаткових заходів, спрямованих на те, щоб акумулювати висококваліфіковані кадри, мотивувати своїх фахівців з тим, щоб мінімізувати їх витік.	В результаті реалізації R&D проектів відбувається документування нових технологічних процесів. Таким чином, знання і досвід формалізуються у вигляді проектної та технологічної документації. Поряд з цим велике значення може мати отримання нових прикладних навичок і досвіду членів команди проекту.

Створення інкубаторів проектів доцільно для компаній, які націлені на реалізацію інноваційних продуктів або послуг. На початкових стадіях роботи над інноваційними продуктами рівень невизначеності, як правило, дуже високий. На цьому етапі неможливо з достатньою точністю оцінити потенційні витрати і доходи, що пов'язані з реалізацією даного продукту або послуги, і ефективне управління такими проектами неможливо реалізувати, використовуючи стандартні методи, які прийняті в офісі управління проектами і програмами даної компанії. Основною функцією інкубатора проектів є створення таких умов і використання таких методів управління, які

максимально ефективні для забезпечення якнайшвидшого «дозрівання інновацій» – тобто отримання додаткової інформації про властивості та можливості створення розглядуваного інноваційного продукту або послуги, яка була б достатньою для того, щоб на підставі цієї інформації можна було б ініціювати відповідний R&D проект і його подальшу реалізацію з використанням стандартних методів управління, що прийняті в компанії.

Команда дослідницького проекту, який знаходиться в інкубаторі проектів, максимально вмотивована на те, щоб ідентифікувати та оцінити якомога більше можливостей, що пов’язані зі втіленням даної інновації, незважаючи на ризики і не маючи мети зекономити виділені для цього ресурси. Офіс управління проектами, портфелями та програмами, навпаки, дбає про те, щоб, перш за все, забезпечити сталий розвиток компанії, тобто про те, щоб співвіднести можливі результати впровадження досліджень з цілями та місією даної компанії [212]. Отже, команда дослідницького проекту виступає в якості емоційного інтелекту – тієї рушійної сили, що спрямована вперед задля впровадження інновацій [28], а офіс управління проектами і програмами – навпаки, тим критичним, консервативним розумом, що дозволяє прагматично оцінювати та контролювати ризики задля того, щоб забезпечити стійкість всієї системи управління. При такій організації системи управління може спостерігатися деякий антагонізм між командою дослідницького проекту, що працює всередині інкубатора проектів, і офісом управління проектами і програмами. Але цей антагонізм є цілком конструктивним. Такі взаємовідносини між дослідницькою командою і офісом управління проектами і програмами дозволяють забезпечити максимально продуктивне і безпечне для всієї компанії середовище для розвитку інновацій. Дуже важко в одному офісі управління проектами і програмами знайти стійкий баланс між проривним інноваційним розвитком та стабільністю компанії. Саме задля того, щоб забезпечити цей баланс всередині системи управління компанією, доцільно виділення інкубатора проектів як окремого підрозділу і встановлення чіткої та зрозумілої системи взаємовідношень з ним. При такій системі

організації інноваційних досліджень антагонізм, що спостерігається між командою дослідницького проекту, яка працює всередині інкубатора проектів, і офісом управління проектами і програмами не має деструктивного впливу на відношення всередині колективу компанії. Місія команди дослідницького проекту відома і формально визначена – ідентифікувати максимум можливостей інноваційного продукту і лобіювати перед офісом управління проектами і програмами найскоріший перехід до початку реалізації відповідного R&D проекту.

2.4. Розвиток концепції «управління можливостями»

Ключовим фактором реалізації інноваційних проектів є значний рівень невизначеності. У ряді випадків невизначеність може бути настільки великою, що використання класичних методів управління ризиками і використання навіть найскладніших математичних методів теорії ймовірностей не дозволяє забезпечити стійкого управління таким проектом.

Одним з головних призначень інкубатора проектів є те, що він дозволяє зменшити рівень невизначеності, пов'язаної з інноваційними проектами, ще до початку їх реалізації. І тільки після того, як невизначеність, яка пов'язана з реалізацією потенційного R&D проекту, знизиться до такого рівня, коли стануть придатними класичні методи оцінки і управління ризиками, на підставі використання цих методів можна буде обґрунтувати доцільність ініціації даного R&D проекту [308]. Схема переходу від ітеративних досліджень, що проводяться в рамках інкубатора проектів, до реалізації R&D проекту представлена на рис. 2.2. Також в якості критерія переходу від ітеративних досліджень, що проводяться в рамках інкубатора проектів, до реалізації R&D проекту може виступати рівень ентропії даного дослідження та рівень ентропії всього комплексу проектів проектно-орієнтованої організації [234]. Застосування методів оцінки і управління ризиками має сенс лише після того, як завдяки дослідженням, що проведені в рамках інкубатора

проектів, досліджувана інновація досягне певної міри дозрівання. При ітеративному процесі досліджень оцінку KPI і оцінку ризиків, що пов'язані з реалізацією досліджуваного інноваційного продукту або технології, можна проводити після закінчення кожної ітерації.

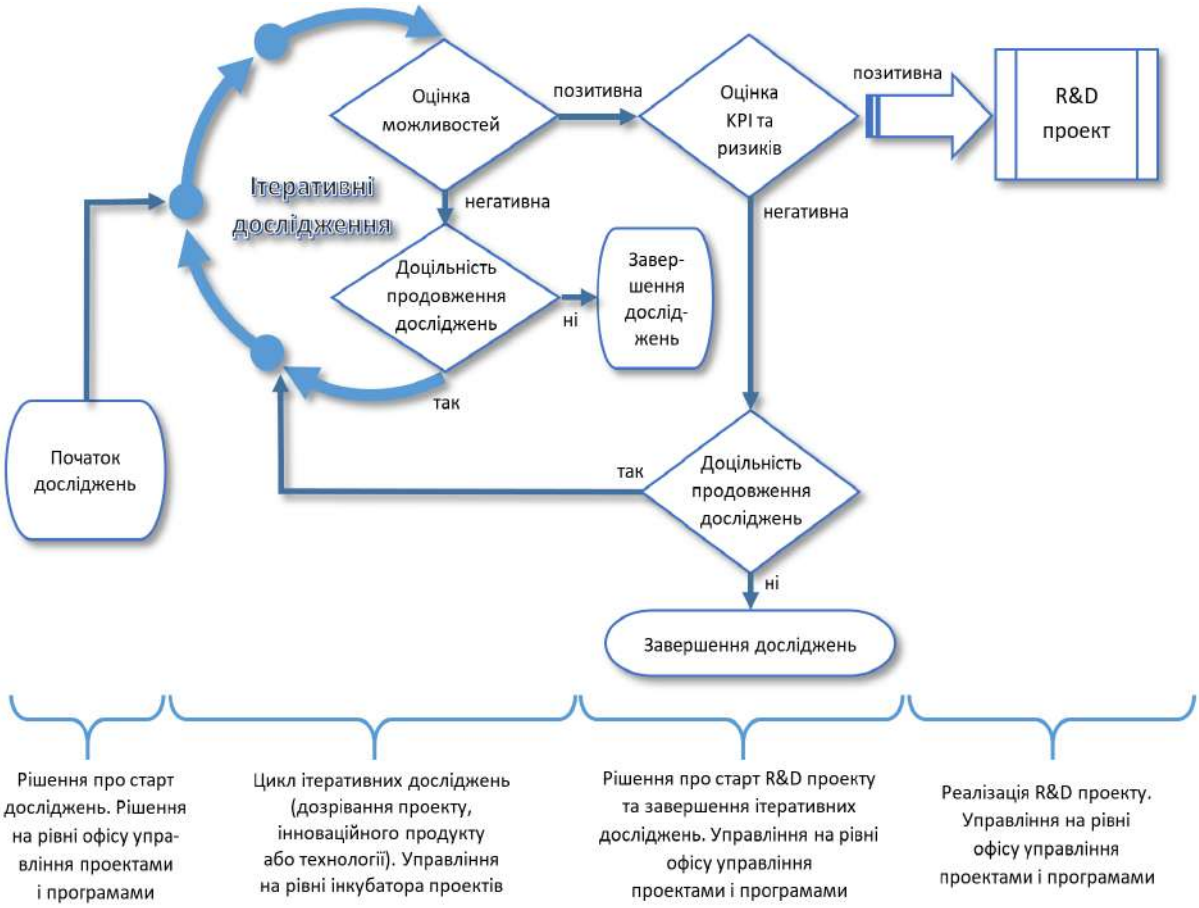


Рисунок 2.2 – Загальна схема переходу від ітеративних досліджень, що проводяться в рамках інкубатора проектів, до реалізації відповідного R&D проекту

Відмовившись від управління ризиками на етапі досліджень в інкубаторі проектів, дослідницька команда може сконцентруватися на управлінні можливостями. Це означає, що дослідницька команда повністю звільняється від обов'язків оцінювати можливі негативні наслідки впровадження результатів дослідження. Так само дослідницька команда отримує можливість самостійно приймати рішення про те, як використовувати доступні ресурси, причому задача економії ресурсів перед командою не стоїть. Головне завдання дослідницької команди полягає в тому, щоб, по-перше, ідентифікувати

якомога більше можливостей, пов'язаних з реалізацією досліджуваного інноваційного продукту або технології, і, по-друге, по можливості точно визначити діапазони, в яких можуть знаходитися значення параметрів цього інноваційного продукту або технології. Такий підхід, з одного боку, надає достатньо свободи для організації максимально ефективної роботи дослідницької команди з точки зору пошуку інноваційних рішень. Але з іншого боку, при такій внутрішній свободі дій, свободі використання ресурсів і практично повній відсутності формальних процедур внутрішнього контролю можуть виникнути серйозні проблеми. Для вирішення цих проблем пропонується концепція пісочниці.

2.5. Розвиток концепції «пісочниці»

Так звані «пісочниці» (Sandbox) досить широко використовується в IT сфері. В IT пісочницею називають спеціально виділене віртуальне середовище запуску комп'ютерних програм, яке дозволяє істотно обмежувати або емулювати взаємодію гостьової програми з мережею, операційною системою і пристроями вводу-виводу. Зазвичай пісочниці використовують для запуску неперевіреного потенційно небезпечного програмного коду. Оскільки реалізація інноваційних проектів пов'язана зі значними невизначеностями і ризиками, ми пропонуємо, за аналогією з IT сферою, в теорії управління проектами називати «пісочницею» таку організацію доступу до ресурсів компанії, при якій можна було б безпечно реалізовувати проекти, рівень ризику і невизначеності яких є неприпустимо високим за мірками стандартів, що прийняті в офісі управління проектами і програмами даної компанії [309].

Зважаючи на те, що для дослідницьких проектів, які перебувають в інкубаторі, рівень невизначеності занадто великий, стандартні підходи до оцінки та управління ризиками, що прийняті в офісі управління проектами і програмами компанії, не можна застосувати через те, що, по-перше, в більшості випадків вони будуть неефективними, а, по-друге, їх застосування

заважатиме, і навіть вкрай негативно впливатиме на виконання дослідницьких робіт. Тому в дисертаційній роботі запропоновано в інкубаторі проектів повністю відмовитися від тих стандартів і методів управління ризиками, що використовуються в офісі управління проектами і програмами компанії, і натомість, реалізувати методи і практики, що максимально відповідають концепції «управління можливостями» [309]. Такий підхід дозволить команді дослідницького проекту максимально сконцентруватися на ідентифікації нових властивостей і можливостей, що пов'язані з тим інноваційним продуктом, послугою або технологією, які вивчаються в рамках даного дослідницького проекту. Оцінка ризиків, що пов'язані з досліджуваною інновацією, проводиться на рівні офісу управління проектами і програмами з застосуванням всіх стандартів компанії після кожної ітерації досліджень. І якщо така оцінка встановить відповідність інновації, що вивчається, стандартам компанії щодо ефективності і рівня ризиків, то на базі проведених досліджень буде ініційовано початок відповідного R&D проекту, реалізація якого виконуватиметься з застосуванням стандартних підходів до управління ризиками, які впроваджені в офісі управління проектами і програмами. З огляду на те, що всередині інкубатора проектів повною мірою реалізується управління можливостями, і майже повністю, або навіть повністю відсутні заходи щодо оцінки ризиків, виникає гостра потреба в побудові запобіжних заходів, які б могли убезпечити систему управління всієї компанії від можливих негативних результатів діяльності, що ведеться в межах інкубатора проектів. В дисертаційній роботі пропонується реалізовувати ці запобіжні заходи не за рахунок створення відповідних внутрішніх механізмів управління дослідницьким проектом, а шляхом організації зовнішнього безпечного оточення виконання робіт, що проводяться в межах інкубатора проектів. Саме для вирішення цієї проблеми в роботі пропонується концепція «пісочниці». Рішення щодо організації «пісочниці» мають здійснюватися на рівні офісу управління проектами і програмами.

В подальшому під пісочницею ми будемо розуміти такий спосіб організації роботи над дослідницьким проектом, при якому команді проекту надається максимальна внутрішня свобода, можливість самоорганізації і повна свобода використання на свій розсуд всіх наданих їй ресурсів. У дослідницьких проектів, що реалізуються всередині пісочниці, можлива часткова або повна відсутність ряду функцій, які пов'язані з управлінням ризиками, управлінням змінами, управлінням комунікаціями, управлінням закупівлями і управлінням зацікавленими сторонами. При цьому виділення доступних ресурсів, критичний аналіз і оцінка отриманих результатів досліджень здійснюється зовнішньою організаційною структурою.

З одного боку, в пісочниці за рахунок максимальної внутрішньої свободи, відсутності формальних бюрократичних процедур і внутрішньої мобільності будуть створені максимально сприятливі умови для пошуку і дозрівання інновації, а, з іншого боку, завдяки жорстким зовнішнім обмеженням вдасться обмежити можливості негативного впливу досліджень, що проводяться всередині пісочниці, на основну діяльність компанії.

Таким чином, пісочниця створює захищене середовище, завдяки чому з'являється можливість надання дослідницькій команді максимальних свобод, що сприяє швидкому й ефективному дозріванню інновацій. Після того, як інноваційний проект пройде фазу дозрівання всередині пісочниці, коли рівень невизначеності і пов'язаних з ним ризиків істотно знизиться, в подальшому R&D проект, в рамках якого буде реалізовуватися ця інновація, може більш точно і ефективно управлятися класичними методами.

Слід зазначити, що в пісочницю доцільно поміщати тільки невеликі дослідницькі проекти, які вимагають малих ресурсів і можуть бути виконані невеликою командою фахівців. Це пояснюється тим, що, по-перше, такі проекти мають велику ймовірність виявитися нерезультативними. Тому має сенс проводити дослідження ітеративно і оцінювати доцільність продовження роботи після кожної ітерації. І, по-друге, найбільшої ефективності робіт всередині пісочниці можна досягти з використанням Agile методів, значна

частина з яких ефективна в разі, коли команда проекту складається з невеликої кількості людей.

2.6. Архітектура організації інкубаторів проектів

Залежно від специфіки компанії і особливостей проектів і використовуваних технологій всередині організаційної структури компанії інкубатор проектів може функціонувати на постійних засадах або організовуватися тимчасово в міру поточної необхідності.

Можна виділити кілька архітектур організації інкубаторів проектів: дифузну, вузлову і матричну [309]. В рамках дифузійної архітектури управління всіма дослідженнями реалізується всередині єдиного інкубатора (рис. 2.3). Така архітектура може бути використана в разі, коли всі дослідження можуть проводитися досить автономно і немає потреби в їх значній координації або розподілі великої кількості загальних ресурсів. За координацію між проектами і розподіл загальних ресурсів відповідає керівник інкубатора проектів. Керівник інкубатора проектів в основному виконує координаційні та допоміжні функції. Керівники досліджень безпосередньо підзвітні керівникам дослідницьких програм, в рамках яких виконуються відповідні проекти, які, в свою чергу, підзвітні офісу управління портфелями і програмами компанії. У разі, коли дослідження, що проводяться в рамках дослідницьких програм, вимагають значної координації або розподілу великої кількості спільно використовуваних ресурсів, може одночасно існувати декілька відносно незалежних інкубаторів, що працюють паралельно. Наприклад, в будівельній компанії може одночасно функціонувати інкубатор, в якому ведеться декілька досліджень, що спрямовані на вивчення можливості використання нових будівельних матеріалів, окремо від нього – інкубатор, в якому ведуться дослідження, які спрямовані на впровадження нових програмних засобів проектування і візуалізації з використанням технологій віртуальної реальності, а в третьому інкубаторі проектів можуть паралельно

працювати кілька дослідницьких груп, що вивчають можливості залучення альтернативних джерел інвестицій за рахунок впровадження нових маркетингових та економіко-правових інструментів.

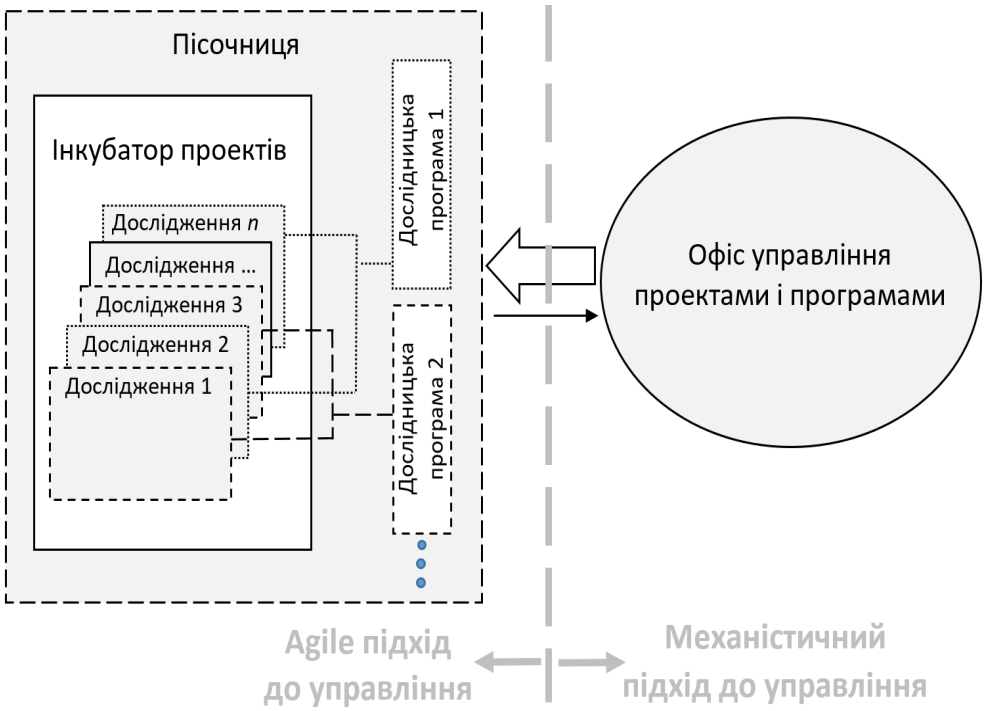


Рисунок 2.3 – Дифузна архітектура організації інкубатора проектів

Наявність декількох інкубаторів, що працюють паралельно, може бути доцільна у разі, коли в компанії одночасно ведеться декілька великих дослідницьких програм, причому потрібна значна координація досліджень, що проводяться в рамках кожної програми. В цьому випадку управління кожною дослідницькою програмою може бути реалізовано в рамках окремого інкубатора проектів (рис. 2.4). Таку архітектуру організації структури інкубаторів проектів будемо називати вузловою [309]. При вузловій архітектурі організації немає необхідності окремо виділяти посади керівників інкубаторів проектів, оскільки функції керівництва інкубаторами можна поєднувати з керівництвом відповідними дослідницькими програмами. Доцільність виділення декількох інкубаторів проектів може бути також пояснена наявністю широкого спектра істотно різних сфер дослідження, істотно різних ресурсів, результатів або методів дослідження.

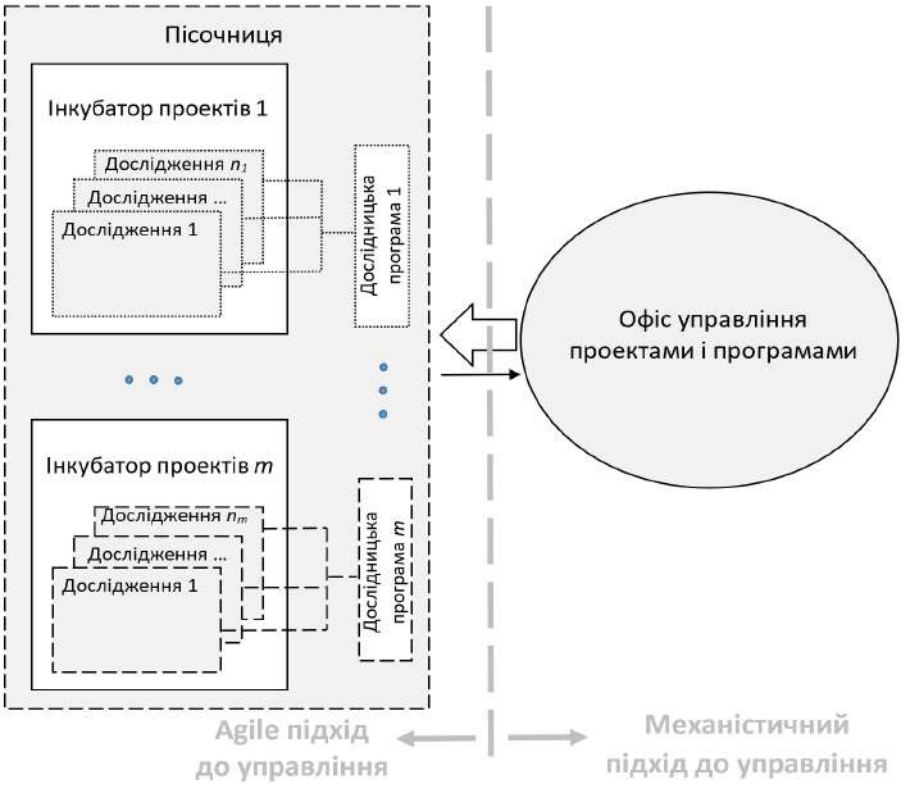


Рисунок 2.4 – Вузлова архітектура організації інкубатора проектів

У цьому випадку може бути доцільно використання матричної архітектури, при якій управління проектами однієї дослідницької програми реалізується в рамках різних вузькоспеціалізованих інкубаторів проектів (рис. 2.5). Перевага такого підходу до організації архітектури інкубаторів проектів полягає в тому, що в рамках одного інкубатора можуть бути зосереджені функціонально близькі дослідження, що відносяться до різних дослідницьких програм, але при цьому об'єднані спільними ресурсами, схожими підходами до виконання робіт і, можливо, близькими результатами. При матричній схемі організації керівництво інкубаторів проектів має набагато більший вплив на хід виконання досліджень, ніж при вузловій схемі. Більшість процесів, які проходять в рамках дослідницьких програм, що проводяться всередині пісочниці проектів, можуть управлятися автономно з використанням Agile методів. У той же час, організація управління в рамках офісу управління портфелями і програмами всієї компанії може бути заснована на використанні класичних механістичних підходів до управління.

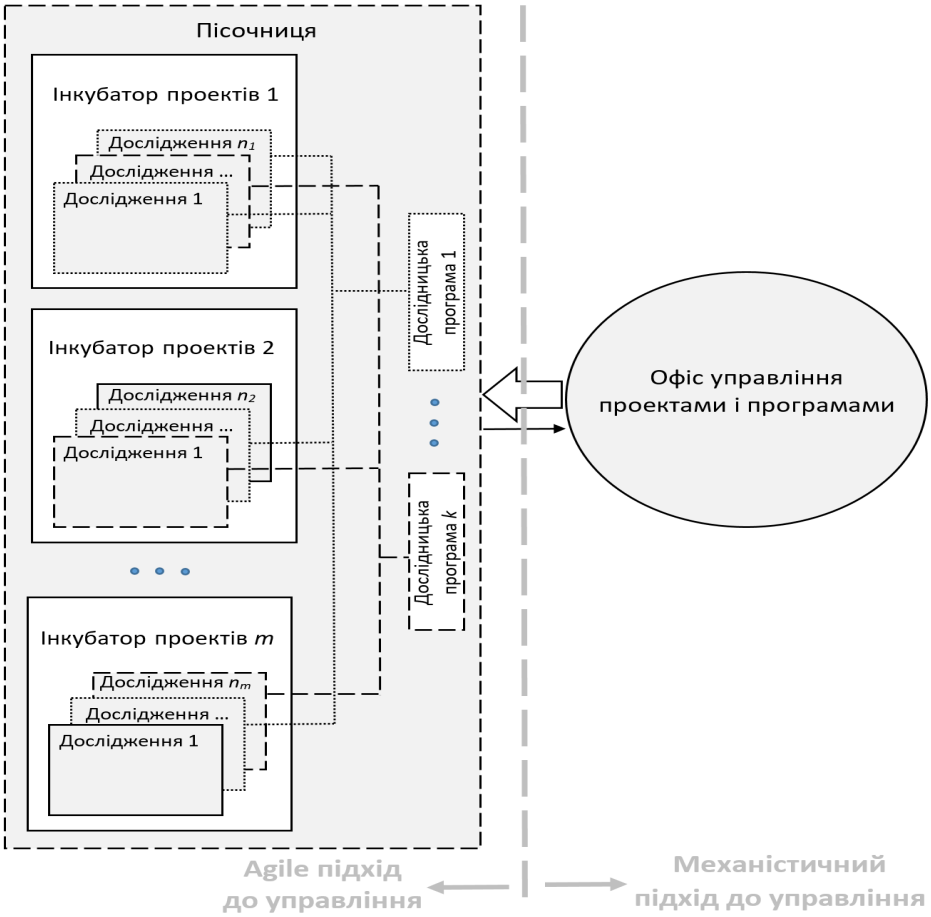


Рисунок 2.5 – Матрична архітектура організації інкубатора проектів

Координація між організаційними структурами має важливе значення. При цьому відношення між пісочницею проектів і офісом управління портфелями і програмами компанії є несиметричними, оскільки офіс управління портфелями і програмами компанії може оцінювати хід робіт і істотно впливати на виділення ресурсів і вибір напрямку досліджень, що проводяться всередині інкубаторів проектів, в той час як керуючі структури інкубаторів проектів надають звіти про виконані роботи і набуті знання, але не мають повноважень безпосередньо впливати на будь-які рішення, що приймаються в компанії або в офісі управління портфелями і програмами.

Структура життєвого циклу дослідницьких проектів, що проводяться в рамках інкубатора проектів, представлена на рис. 2.6 – 2.8.

Схема етапів, що наведена на рис. 2.6, є загальною, а схеми, які наведені на рис. 2.7, 2.8 та 2.9, є складовими частинами цієї загальної схеми [308].

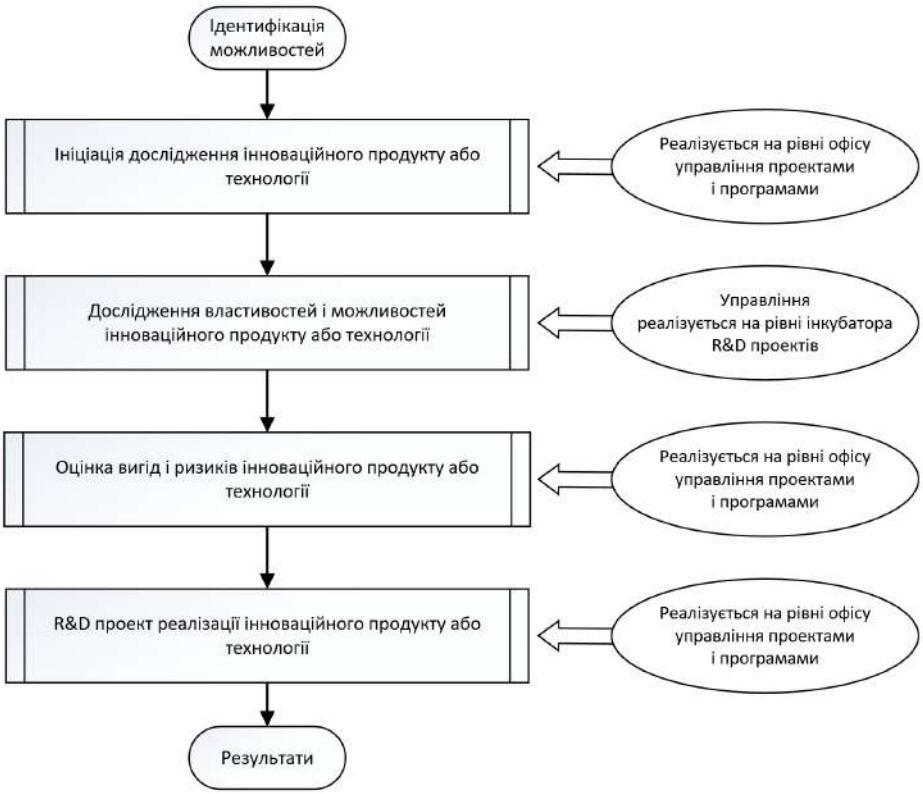


Рисунок 2.6 – Загальна схема етапів проведення досліджень інноваційного продукту або технології до початку реалізації відповідного R&D проекту

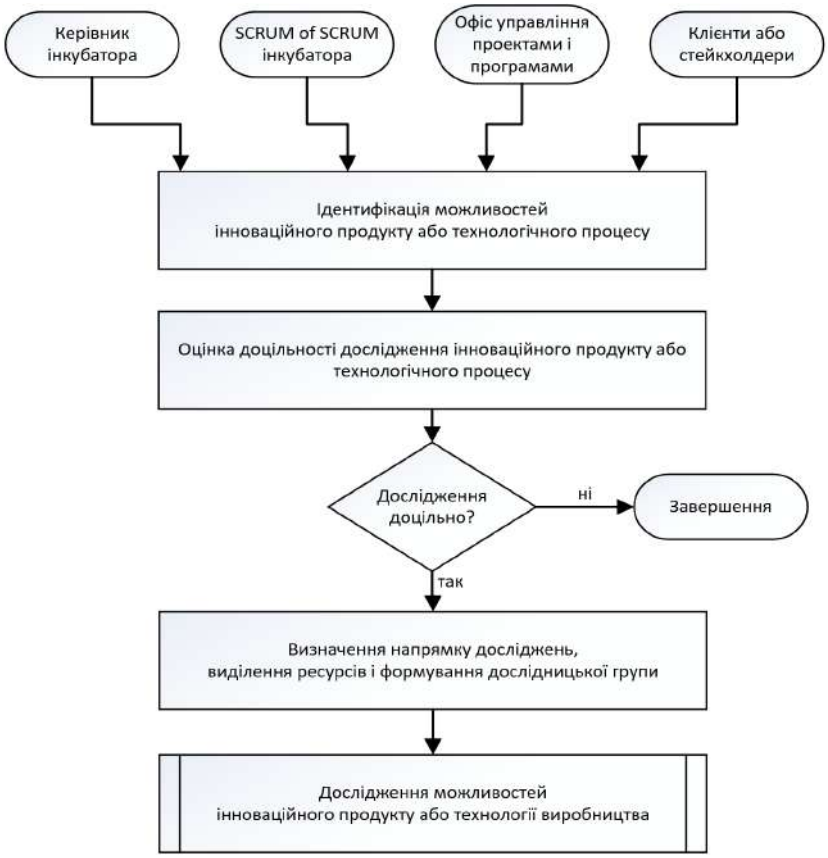


Рисунок 2.7 – Алгоритм ініціації дослідження інноваційного продукту або технології

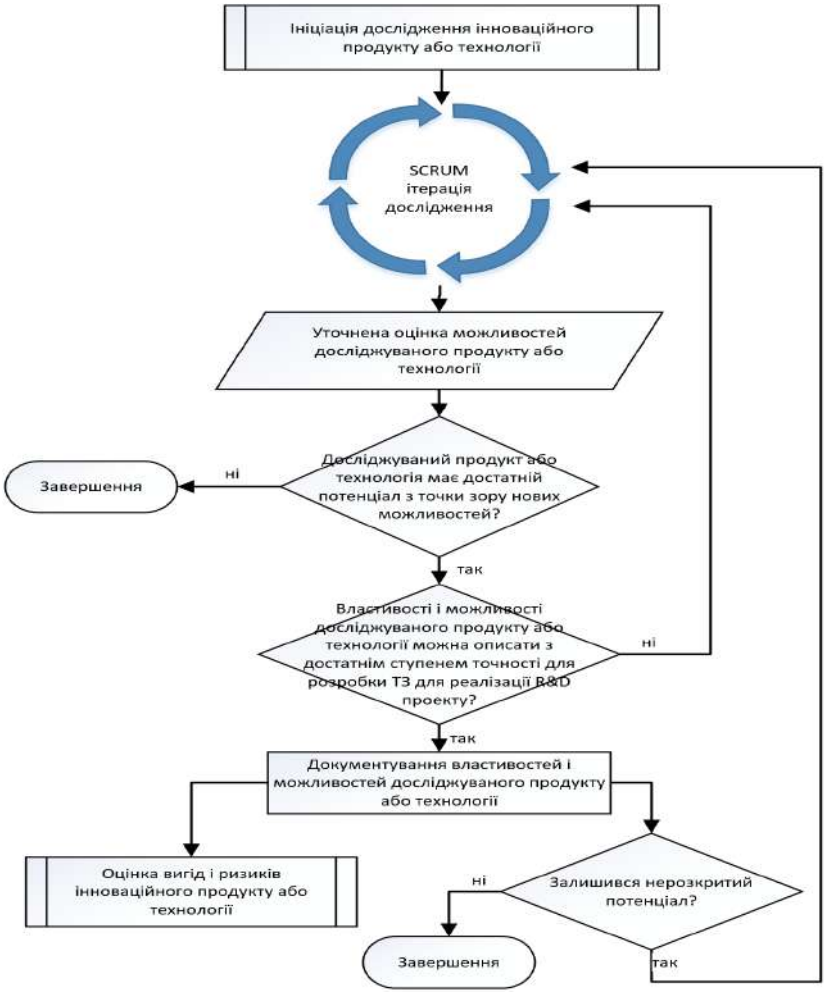


Рисунок 2.8 – Алгоритм дослідження властивостей і можливостей інноваційного продукту

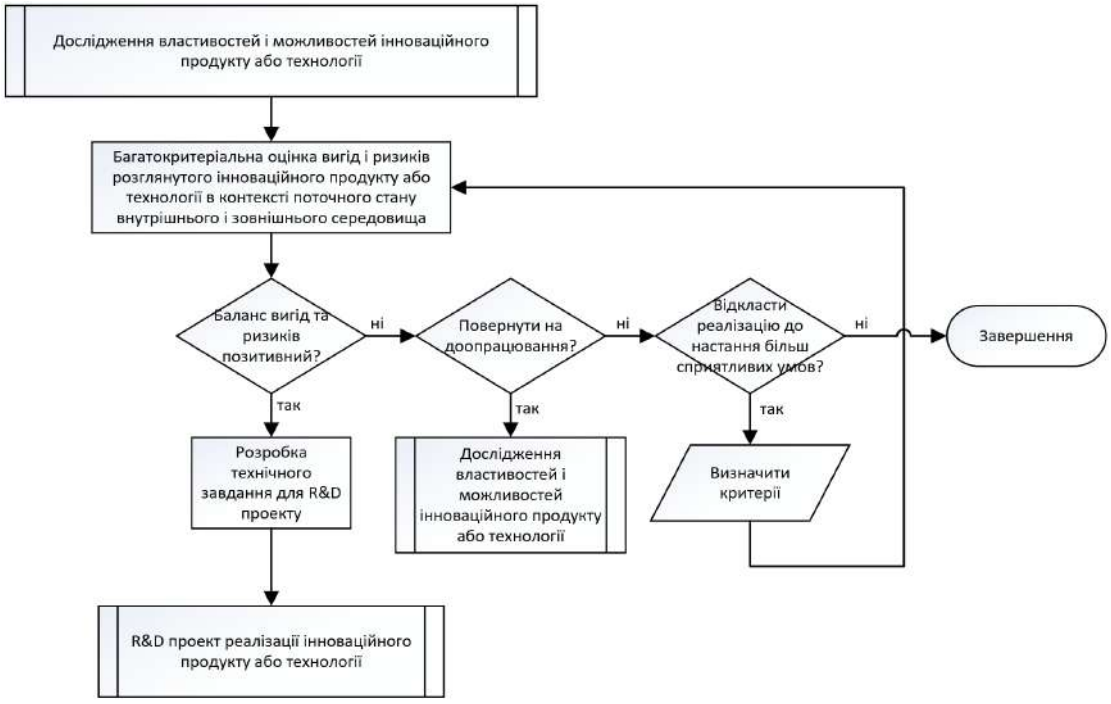


Рисунок 2.9 – Алгоритм оцінки вигід і ризиків інноваційного продукту

2.7. Дослідження залежності показників проекту від порядку виконання робіт

В даний час внаслідок глобалізації, значного збільшення швидкості поширення інформації та мобільності ресурсів рівень конкуренції в більшості галузей виробництва і послуг істотно збільшився. Як показує практика, найбільшу додаткову вартість в даний час отримують лише компанії, які мають у своєму розпорядженні найпередовіші технології. Останнім часом доходи компаній, які націлені на розробку інноваційних продуктів і послуг, перевищують доходи, одержувані від монопольного доступу до обмежених природних ресурсів. При цьому велике значення має навіть не висока технологічність, а унікальність наданого продукту або послуги на ринку. Ринок дуже швидко реагує на появу нових технологій і швидко йде за ними. Тому, освоївши навіть дуже високотехнологічні та наукомісткі технології, вже через зовсім незначний проміжок часу ряд конкуруючих компаній також впровадять ці технологи і будуть готові представити продукцію аналогічної якості. Єдиним засобом для того, щоб мати конкурентну перевагу, є постійний розвиток і вдосконалення технологій і методів організації виробництва. В якості найбільш яскравих прикладів можна навести досвід розвитку передових компаній, що працюють в сфері електроніки та програмного забезпечення. Однак розвиток і впровадження інновацій має ключове значення не тільки в сфері IT технологій. Пошук і впровадження найпередовіших і перспективних технологій сьогодні є головним чинником успіху підприємств практично в усіх галузях виробництва і в сфері обслуговування.

Існує ряд наукових робіт, які присвячені теорії управління дослідницькими проектами (EP) та R&D проектами. В статті [245] досліджено оптимальний з точки зору інноваційної діяльності фірми склад портфеля проектів. Процеси розробки нового продукту (NPD) і процеси його впровадження вивчені в [251]. Було показано, що оптимальний час закінчення фази досліджень і початок фази масового впровадження можуть бути

невизначеними, оскільки процеси, що пов'язані з NPD і реалізацією інноваційних продуктів, зазвичай тісно взаємопов'язані. Тому строге визначення послідовності дій та етапів в деяких випадках може бути недоцільним при управлінні дослідницькими проектами. У статті [268] вивчені методи управління цінністю дослідницьких проектів.

В роботах [285, 286] досліджено проблему оптимізації портфеля проектів з урахуванням розподілу коштів і витрат у часі, послідовності реалізації проектів і обов'язкового включення деяких проектів в портфель протягом заданого періоду часу. В статті [228] досліджені питання організації процесів проектування і проблеми, що пов'язані з одночасним досягненням контролю і ефективності при реалізації радикальних інновацій. Деякі узагальнені підходи до управління дослідницькими проектами в різних галузях і типах проектів представлені в [370]. Також в [370] описані різні підходи, які застосовуються на практиці керівниками дослідницьких проектів, і зроблено аналіз теоретичних основ управління такими проектами.

Оцінки тривалості життєвого циклу для деяких типів проектів досліджуються в роботі [265] з урахуванням фактору невизначеності. В статті [301] досліджуються підходи до управління проектами, які спрямовані на поліпшення інтеграції знань при різних типах невизначеності. В [356] розроблена методика управління термінами реалізації робіт в проектах створення і надання інформаційних ресурсів з урахуванням «стиснення» і «розтягування» часу реалізації проекту в залежності як від термінів, так і від тих трудових ресурсів, які виділяються.

У статтях [329, 333] розглядається оптимальний вибір послідовності проектів і їх параметрів, при яких забезпечується досягнення мети з урахуванням основних вимог і обмежень проектів, а також аналізуються питання стійкості управління проектами. Задачі оптимального планування термінів виконання, які пов'язані з проектами придбання і використання інноваційного обладнання з урахуванням динаміки фізичного і морального

зносу, а також умов нестійкого зовнішнього оточення досліджені в [270, 294, 315].

Проблеми формування проектів на рівні створення і впровадження методологій управління проектами з урахуванням умов конкретних проектно-орієнтованих підприємств розглянуті в [357]. Багатокритеріальний вибір портфеля проектів і проблема планування на основі аналізу прийнятності вивчені в [348, 349]. Методи і моделі сталого розвитку проектно-орієнтованих компаній запропоновані в роботах [293, 296, 298]. У статті [362] розроблена модель управління проектами, що базується на двох критеріях оптимізації. Питання формування і управління портфелем проектів з урахуванням кількох критеріїв в умовах невизначеності прийняття рішень вивчені в [297, 304, 349]. Актуальні теоретичні і практичні проблеми, які пов'язані з проектами побудови розподілених сховищ даних з урахуванням властивостей даних і статистики запитів, розглянуті в [361].

Задачі, які пов'язані з проблемою планування розкладу проектів з обмеженими ресурсами (RCPSP), розглянуті в [273]. В цій роботі був виконаний огляд понад 200 статей, присвячених RCPSP за період 1980–2017 р., були оцінені останні розробки в цій області і вказані перспективні напрямки подальших досліджень. В [246] RCPSP розглядалися з детермінованими вимогами до відновлюваних ресурсів, але з невизначеною тривалістю діяльності, яка представлена випадковими величинами з різними функціями розподілу ймовірностей. У статті [229] для обчислення оцінок часу і вартості робіт, пов'язаних з проектом, використано концепцію стратифікації. Незважаючи на те, що в цьому напрямку досягнуто значних успіхів, ряд практично важливих проблем все ще залишається недостатньо вивченим.

Створення інноваційних продуктів, послуг або технологій часто пов'язане зі значними ризиками [88]. В ряді випадків більша частина досліджень, спрямованих на створення інновацій, не приносить очікуваних результатів. Але ті деякі дослідницькі проекти, які завершуються успішно, здатні багаторазово окупити всі інвестиції, вкладені як в цей успішний проект,

так і в усі неуспішні дослідницькі роботи, що проводилися компанією до цього.

Іноді дослідження, необхідні для створення інноваційного продукту, послуги або технології вимагають залучення значних ресурсів або великої кількості фахівців [59]. У таких випадках доцільно розділити дослідження на відносно невеликі роботи, які можна реалізовувати автономно. Кожна з цих робіт потребує певної кількості ресурсів. Успішність кожної такої роботи можна прогнозувати лише з певною ймовірністю, а час її реалізації, як правило, є випадковою величиною. Очевидно, в такому випадку велике значення може мати порядок, в якому організовано реалізацію дослідницьких робіт. Тому виникає практичний інтерес до розробки методів обґрунтування вибору оптимального порядку реалізації робіт, що проводяться в рамках дослідницького проекту.

Великий практичний і теоретичний інтерес представляє розвиток кількісних методів обґрунтування оптимальних послідовностей виконання робіт, при яких досягається баланс між середнім очікуваним часом реалізації всього дослідницького проекту і середнім очікуваним значенням сумарних витрат, що пов'язані з реалізацією цього проекту [132].

Розглянемо дослідницький проект, в рамках якого проводитиметься n робіт. Причому ці роботи можуть вестися незалежно, і можливий будь-який порядок їх реалізації. Нехай час реалізації i-ї роботи є випадковою величиною T_i з відомою функцією щільності розподілу $f_i(t)$. Будемо припускати, що витрати, які пов'язані з виділенням ресурсів для кожної i-ї роботи, виплачуються на початку реалізації цієї роботи і також є випадковими величинами C_i з відомими функціями щільності розподілів $\varphi_i(t)$. Будемо вважати результат всього дослідницького проекту успішним, якщо успішно закінчиться кожна з робіт. Припустимо, що для кожної з розглянутих робіт є оцінка ймовірності успіху, і для i-ї роботи така ймовірність дорівнює p_i. Таким чином, очевидно, ймовірність того, що весь цикл досліджень закінчиться успішно, дорівнює

$$\widetilde{p} = \prod_{i=1}^{n} p_i \,. \qquad (2.1)$$

Причому ця ймовірність не залежить від послідовності проведення досліджень. Однак природно виникає питання про те, яким чином слід організувати черговість виконання робіт для того, щоб, з одного боку, мінімізувати очікувані середні сумарні витрати, а з іншого – мінімізувати загальний час проведення дослідницьких робіт. На рис. 2.10–2.12 зображено декілька схем організації послідовності реалізації робіт.

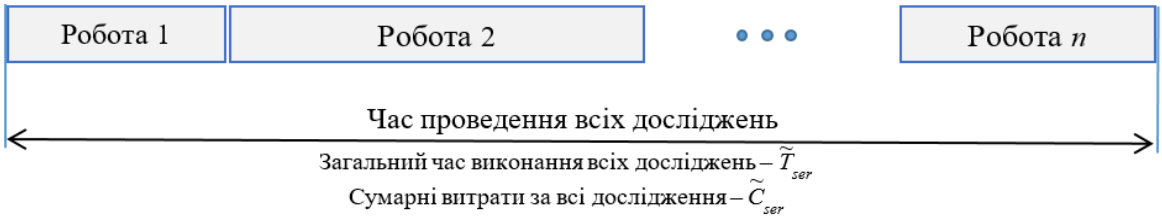


Рисунок 2.10 – Послідовне виконання робіт

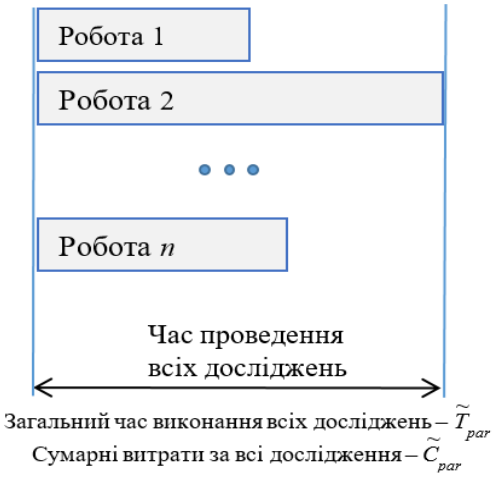


Рисунок 2.11 – Паралельне виконання робіт

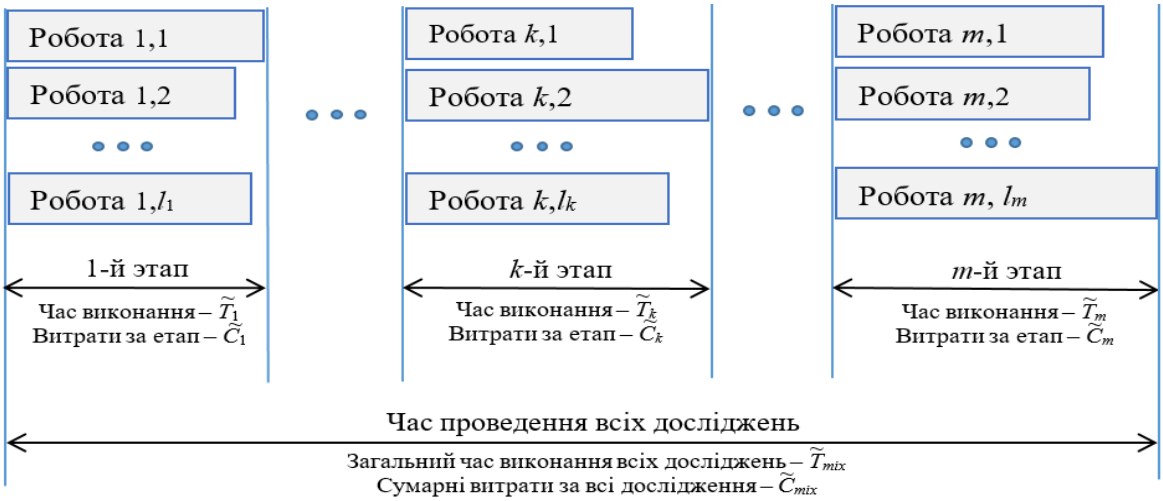


Рисунок 2.12 – Змішана послідовність виконання робіт

Позначимо:

$\widetilde{T}_{ser}$ – час проведення всіх дослідницьких робіт при послідовному виконанні робіт;

$\widetilde{C}_{ser}$ – витрати, які пов'язані з проведенням усіх дослідницьких робіт при послідовному їх виконанні;

$\widetilde{T}_{par}$ – час проведення всіх дослідницьких робіт при паралельному їх виконанні;

$\widetilde{C}_{par}$ – витрати, що пов'язані з проведенням усіх дослідницьких робіт при паралельному їх виконанні;

$\widetilde{T}_{mix}$ – час проведення всіх дослідницьких робіт при змішаному порядку їх виконання;

$\widetilde{C}_{mix}$ – витрати, що пов'язані з проведенням усіх дослідницьких робіт при змішаному порядку їх виконання.

Перша з розглянутих схем організації робіт (рис. 2.10) полягає в послідовному виконанні всіх робіт. При такому підході ресурси на кожну наступну роботу виділяються тільки в разі успішного завершення всіх попередніх робіт. Очевидно, що при послідовній реалізації робіт можна мінімізувати математичне сподівання сумарних витрат на всі дослідження, але при цьому математичне сподівання часу реалізації всіх досліджень збільшується. Також очевидно, що при послідовному виконанні робіт можна досягти істотно різних середніх значень часу виконання проектів і значень середніх сумарних витрат за рахунок вибору черговості виконання цих робіт. Очевидно, що найменш ресурсномісткі роботи і роботи, що мають мінімальні шанси закінчитися успіхом, слід реалізовувати в першу чергу. І навпаки, якщо спочатку запланувати реалізацію самих ресурсномістких робіт, а виконання найбільш ризикованих робіт планувати на кінець досліджень, то є великі шанси того, що, витративши більшу частину ресурсів на початковій стадії досліджень, проект зіткнеться з неуспіхом при реалізації останніх робіт [61,

63]. Таким чином, вибір такої послідовності виконання робіт не є оптимальним ані з точки зору середніх очікуваних витрат, ані з точки зору середнього очікуваного часу виконання робіт.

При паралельному виконанні робіт (рис. 2.11) досягається мінімальний очікуваний час реалізації всіх дослідницьких робіт. Але при цьому середні очікувані витрати, що пов'язані з виконанням дослідницьких робіт, стають максимальними.

Разом з послідовним і паралельним виконанням робіт можна розглядати змішані послідовності виконання дослідницьких робіт (рис. 2.12). При змішаній послідовності всі дослідницькі роботи можна розбити на m етапів ($1<m<n$) і в рамках кожного етапу планувати виконання однієї або декількох робіт. На рис. 2.12 використовується нумерація робіт в рамках кожного етапу. Позначимо:

$p_{k,i}$ – ймовірність того, що на k-му етапі реалізації досліджень i-а робота закінчиться успішно;

$T_{k,i}$ – час реалізації i-ї роботи на k-му етапі реалізації досліджень;

$C_{k,i}$ – витрати при реалізації i-ї роботи на k-му етапі реалізації досліджень.

У певному сенсі змішані схеми управління послідовністю виконання дослідницьких робіт є проміжним варіантом між строго послідовною і строго паралельною схемами. Очевидно, існують такі змішані схеми, при яких досягається баланс між середньою сумарною очікуваною вартістю і середнім очікуваним часом виконання всіх дослідницьких робіт. Для визначення таких збалансованих схем організації порядку дослідницьких робіт оцінимо математичне сподівання середнього часу реалізації всього дослідницького проекту і математичне сподівання пов'язаних з цим сумарних витрат при різних варіантах організації послідовності виконання робіт.

Неважко бачити, що при послідовному виконанні дослідницьких робіт математичне сподівання часу проведення всього дослідницького проекту визначається формулою

$$E(\widetilde{T}_{ser}) = (1-p_1)\cdot\int_0^{+\infty} t\cdot f_1(t)dt +$$

$$+\sum_{i=2}^{n}\left((1-p_i)\cdot\prod_{j=1}^{i-1}p_j\cdot\sum_{j=1}^{i}\int_0^{+\infty} t\cdot f_j(t)dt\right)+\prod_{j=1}^{n}p_j\cdot\sum_{j=1}^{n}\int_0^{+\infty} t\cdot f_j(t)dt\,, \qquad (2.2)$$

а математичне сподівання сумарних витрат, що пов'язані з реалізацією всіх робіт, становить

$$E(\widetilde{C}_{ser}) = (1-p_1)\cdot\int_0^{+\infty} t\cdot \varphi_1(t)dt +$$

$$+\sum_{i=2}^{n}\left((1-p_i)\cdot\prod_{j=1}^{i-1}p_j\cdot\sum_{j=1}^{i}\int_0^{+\infty} t\cdot \varphi_j(t)dt\right)+\prod_{j=1}^{n}p_j\cdot\sum_{j=1}^{n}\int_0^{+\infty} t\cdot \varphi_j(t)dt\,. \qquad (2.3)$$

У разі паралельного виконання робіт математичне сподівання сумарних витрат, які пов'язані з реалізацією всіх досліджень, визначається формулою

$$E(\widetilde{C}_{par}) = \sum_{i=1}^{n}\int_0^{+\infty} t\cdot \varphi_i(t)dt\,. \qquad (2.4)$$

При цьому математичне сподівання часу проведення всіх дослідницьких робіт дорівнює

$$E(\widetilde{T}_{par}) = \sum_{i=1}^{n}\left(E(T_i)\cdot\prod_{j=1}^{n}\left(p_j\cdot P(T_i>T_j)+(1-p_j)\right)\right)=$$

$$=\sum_{i=1}^{n}\left(\int_0^{+\infty} t\cdot f_i(t)dt\cdot\prod_{j=1}^{n}\left(p_j\cdot\int_0^{+\infty}\int_0^{t} f_i(t)\cdot f_j(\tau)d\tau dt+(1-p_j)\right)\right). \qquad (2.5)$$

Спираючись на формули (2.2) – (2.5), можна вивести відповідні значення для змішаної схеми порядку реалізації робіт (рис. 2.3). Так, математичне сподівання часу проведення всіх досліджень при змішаному порядку реалізації робіт розраховується за формулою

$$E(\widetilde{T}_{mix}) = (1-\widetilde{p}_1)\cdot E(\widetilde{T}_1) +$$

$$+\sum_{k=2}^{m}\left((1-\widetilde{p}_k)\cdot\prod_{j=1}^{k-1}\widetilde{p}_j\cdot\sum_{j=1}^{k}E(\widetilde{T}_j)\right)+\prod_{j=1}^{m}\widetilde{p}_j\cdot\sum_{j=1}^{m}E(\widetilde{T}_j), \quad (2.6)$$

де ймовірність успішного закінчення всіх робіт *k*-го етапу дорівнює

$$\widetilde{p}_k=\prod_{i=1}^{l_k}p_{k,i}, \quad (2.7)$$

а математичне сподівання часу проведення *k*-го етапу досліджень становить

$$E(\widetilde{T}_k)=\sum_{i=1}^{l_k}\left(E(T_{k,i})\cdot\prod_{j=1}^{l_k}\left(p_{k,j}\cdot P(T_{k,i}>T_{k,j})+1-p_{k,j}\right)\right)=$$

$$=\sum_{i=1}^{l_k}\left(\int_0^{+\infty}t\cdot f_{k,i}(t)dt\cdot\prod_{j=1}^{l_k}\left(p_{k,j}\cdot\int_0^{+\infty}\int_0^{t}f_{k,i}(t)\cdot f_{k,j}(\tau)d\tau dt+1-p_{k,j}\right)\right). \quad (2.8)$$

Математичне сподівання сумарних витрат, які пов'язані з проведенням всіх досліджень при змішаному порядку управління роботами, розраховується за формулою

$$E(\widetilde{C}_{mix})=(1-\widetilde{p}_1)\cdot E(\widetilde{C}_1)+$$

$$+\sum_{k=2}^{m}\left((1-\widetilde{p}_k)\cdot\prod_{j=1}^{k-1}\widetilde{p}_j\cdot\sum_{j=1}^{k}E(\widetilde{C}_j)\right)+\prod_{j=1}^{m}\widetilde{p}_j\cdot\sum_{j=1}^{m}E(\widetilde{C}_j)=$$

$$=(1-\prod_{i=1}^{l_1}p_{1,i})\cdot E(\widetilde{C}_1)+$$

$$+\sum_{k=2}^{m}\left((1-\prod_{i=1}^{l_k}p_{k,i})\cdot\prod_{j=1}^{k-1}\prod_{i=1}^{l_j}p_{j,i}\cdot\sum_{j=1}^{k}E(\widetilde{C}_j)\right)+\prod_{j=1}^{m}\prod_{i=1}^{l_j}p_{j,i}\cdot\sum_{j=1}^{m}E(\widetilde{C}_j), \quad (2.9)$$

де математичне сподівання сумарних витрат, пов'язаних з проведенням *k*-го етапу досліджень, дорівнює

$$E(\widetilde{C}_k)=\sum_{i=1}^{l_k}\int_0^{+\infty}t\cdot\varphi_{k,i}(t)dt. \quad (2.10)$$

Таким чином, формули (2.2) – (2.10) дозволяють розраховувати математичні сподівання витрат і часу проведення робіт, що проводяться в рамках всього дослідницького проекту при різних варіантах організації порядку виконання робіт.

У розглянутій постановці задачі передбачається, що дослідницький проект розбивається на етапи так, що всі роботи кожного етапу починаються одночасно відразу після успішного закінчення всіх робіт, які виконуються в рамках попереднього етапу. Слід зазначити, що така організація виконання робіт відрізняється від тієї, яка зазвичай використовується в класичній постановці задачі планування розкладу проекту (PSP) (див., наприклад, [246, 273]).

Позначимо $\{S_i\}_{i=1,\dots,L}$ – множину всіх допустимих схем організації порядку виконання дослідницьких робіт. Для кожної фіксованої схеми управління порядком виконання робіт S за допомогою формул (2.2) – (2.10) можна розрахувати відповідні значення математичного сподівання часу всіх дослідницьких робіт $E(\widetilde{T}(S))$ і математичне сподівання пов'язаних з цим сумарних витрат $E(\widetilde{C}(S))$. Таким чином, кожній схемі виконання робіт S_i ставиться у відповідність пара значень

$$S_i \to (E(\widetilde{T}(S_i)), E(\widetilde{C}(S_i))), \quad i = 1 \dots n. \tag{2.11}$$

І можна ставити питання про знаходження такого порядку виконання робіт S_i, при якому досягається збалансований мінімум значень $E(\widetilde{T})$ і $E(\widetilde{C})$, тобто досліджувати задачу двухкрітеріальної оптимізації

$$(E(\widetilde{T}(S_i)), E(\widetilde{C}(S_i))) \xrightarrow[S_i,\, i=1\dots L]{} \min. \tag{2.12}$$

Формули (2.2)–(2.10) дозволяють досліджувати задачу багатокритеріальної оптимізації (2.12) при найзагальніших припущеннях щодо форми законів розподілів тривалостей і величин витрат на реалізацію робіт. Для подальшого аналізу розглянемо задачу багатокритеріальної оптимізації (2.12) для окремого випадку, коли час реалізації кожної з розглянутих робіт може бути заданий випадковою величиною з експоненціальним законом розподілу, а витрати – випадковою величиною, що має гамма-розподіл. Такий вибір законів розподілів відповідає ситуації, коли в кожен момент часу прогнозована залишкова тривалість кожної активності не

залежить від того, скільки часу вже пройшло від початку її реалізації до цього моменту часу. При цьому допускається, що витрати деяких робіт є випадковими величинами, які можуть бути сумою великої кількості відносно невеликих випадкових незалежних статей витрат, а для деяких робіт витрати, що необхідні для їх закінчення, можуть мати близький до експоненціального закон розподілу.

Таким чином, функція щільності розподілу часу реалізації *i*-ї роботи має вигляд

$$f_i(x) = \begin{cases} \lambda_i e^{-\lambda_i x}, & x \geq 0, \\ 0, & x < 0. \end{cases} \tag{2.13}$$

А функція щільності розподілу величини витрат *i*-ї роботи визначається формулою

$$\varphi_i(x) = \begin{cases} x^{k_i - 1} \dfrac{e^{-x/\theta_i}}{\theta^{k_i} \Gamma(k_i)}, & x \geq 0, \\ 0, & x < 0, \end{cases} \tag{2.14}$$

де $\Gamma(t)$ – гама-функція Ейлера. Постійні параметри $\lambda > 0$, $k > 0$ та $\theta > 0$ визначають форму відповідних функцій розподілів. При такому виборі законів розподілу математичне сподівання часу реалізації всього дослідницького проекту при послідовному порядку виконання робіт дорівнює

$$E(\widetilde{T}_{ser}) = \frac{(1-p_1)}{\lambda_1} + \sum_{i=2}^{n} \left((1-p_i) \cdot \prod_{j=1}^{i-1} p_j \cdot \sum_{j=1}^{i} \frac{1}{\lambda_j} \right) + \prod_{j=1}^{n} p_j \cdot \sum_{j=1}^{n} \frac{1}{\lambda_j}, \tag{2.15}$$

а математичне сподівання сумарних витрат, що пов'язані з реалізацією всіх досліджень, розраховується за формулою

$$E(\widetilde{C}_{ser}) = k_1\theta_1 \cdot (1-p_1) + \sum_{i=2}^{n} \left((1-p_i) \cdot \prod_{j=1}^{i-1} p_j \cdot \sum_{j=1}^{i} k_j\theta_j \right) + \prod_{j=1}^{n} p_j \cdot \sum_{j=1}^{n} k_j\theta_j \,. \tag{2.16}$$

У разі паралельного виконання робіт математичне сподівання сумарних витрат, які пов'язані з реалізацією всіх досліджень, становить

$$E(\widetilde{C}_{par}) = \sum_{i=1}^{n} k_j\theta_j \,, \tag{2.17}$$

а математичне сподівання часу проведення всіх дослідницьких робіт дорівнює

$$E(\widetilde{T}_{par}) = \sum_{i=1}^{n}\left(\frac{1}{\lambda_i}\cdot\prod_{j=1}^{n}\left(\frac{p_j\cdot\lambda_j}{\lambda_i+\lambda_j}+(1-p_j)\right)\right). \quad (2.18)$$

При змішаному порядку реалізації робіт математичне сподівання часу проведення всіх досліджень розраховується за формулою

$$E(\widetilde{T}_{mix}) = (1-\widetilde{p}_1)\cdot E(\widetilde{T}_1) +$$

$$+\sum_{k=2}^{m}\left((1-\widetilde{p}_k)\cdot\prod_{j=1}^{k-1}\widetilde{p}_j\cdot\sum_{j=1}^{k}E(\widetilde{T}_j)\right)+\prod_{j=1}^{m}\widetilde{p}_j\cdot\sum_{j=1}^{m}E(\widetilde{T}_j), \quad (2.19)$$

де ймовірність успішного закінчення всіх робіт *k*-го етапу дорівнює

$$\widetilde{p}_k = \prod_{i=1}^{l_k} p_{k,i}, \quad (2.20)$$

а математичне сподівання часу проведення *k*-го етапу досліджень становить

$$E(\widetilde{T}_k) = \sum_{i=1}^{l_k}\left(\frac{1}{\lambda_{k,i}}\cdot\prod_{j=1}^{l_k}\left(\frac{p_{k,j}\cdot\lambda_{k,j}}{\lambda_{k,i}+\lambda_{k,j}}+1-p_{k,j}\right)\right). \quad (2.21)$$

Математичне сподівання сумарних витрат, пов'язаних з проведенням всіх досліджень при змішаному порядку управління роботами, розраховується за формулою

$$E(\widetilde{C}_{mix}) = (1-\prod_{i=1}^{l_1} p_{1,i})\cdot E(\widetilde{C}_1) +$$

$$+\sum_{k=2}^{m}\left((1-\prod_{i=1}^{l_k} p_{k,i})\cdot\prod_{j=1}^{k-1}\prod_{i=1}^{l_j} p_{j,i}\cdot\sum_{j=1}^{k}E(\widetilde{C}_j)\right)+\prod_{j=1}^{m}\prod_{i=1}^{l_j} p_{j,i}\cdot\sum_{j=1}^{m}E(\widetilde{C}_j), \quad (2.22)$$

де математичне сподівання сумарних витрат, пов'язаних з проведенням *k*-го етапу досліджень, дорівнює

$$E(\widetilde{C}_k) = \sum_{i=1}^{l_k} k_{k,i}\cdot\theta_{k,i}. \quad (2.23)$$

Для подальшого аналізу розглянемо дослідницький проект, що складається з шести незалежних робіт, для яких значення параметрів λ, k та θ представлені в табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Значення характеристик законів розподілів витрат і тривалостей робіт та ймовірності їх успішної реалізації

Номер роботи	Характеристики тривалості робіт			Характеристики величин витрат робіт				Ймовірність успіху, p_i
	Параметр закону розподілу, λ	Математичне сподівання, $E(T_i)$, міс.	Середньоквадратичне відхилення, $\sigma(T_i)$, міс.	Параметри закону розподілу		Математичне сподівання, $E(T_i)$, тис. дол.	Середньоквадратичне відхилення, $\sigma(T_i)$, тис. дол.	
				k_i	θ_i			
1	0,1	10,0	10,0	126,1	1,0	123,5	11,0	0,98
2	0,4	2,5	2,5	47,4	0,5	24,1	3,5	0,77
3	0,2	4,2	4,2	4,8	3,2	15,4	7,0	0,94
4	0,1	7,0	7,0	32,1	0,8	25,5	4,5	0,85
5	0,1	12,0	12,0	291,7	0,3	87,1	5,1	0,95
6	0,1	7,0	7,0	2,9	5,6	16,2	9,5	0,77

Символом $S^m_{r_1,r_2,...,r_n}$, де $r_i \in \{1,2,...,m\}$, $i = 1,...,n$ позначимо схему порядку виконання робіт, яка складається з m етапів (рис. 2.12). Значення індексу r_i показує номер етапу, на якому планується реалізовувати i-у роботу. Схема, при якій всі роботи планується виконувати паралельно, буде позначатися $S^1_{1,1,...,1}$. При збільшенні кількості робіт кількість можливих схем організації послідовності їх реалізації зростає нелінійно. Так, для проекту, що складається з 4 робіт, існує 75 різних схем організації порядку виконання робіт; для проекту, що складається з 6 робіт, – 4683 різних схем; а для 10 робіт існує 102247563 різних схем. При такій великій кількості можливостей організації порядку виконання робіт задача обґрунтування вибору оптимальної схеми виконання робіт представляє значні труднощі.

Для того, щоб дослідити цю проблему для кожної схеми порядку виконання робіт $S^m_{r_1,r_2,...,r_n}$, використовуючи формули (2.19) та (2.22), були розраховані відповідні значення $E(\widetilde{T}(S^m_{r_1,r_2,...,r_n}))$ та $E(\widetilde{C}(S^m_{r_1,r_2,...,r_n}))$. Всі розрахунки були реалізовані у вигляді програми на мові Java (додаток А). У табл. 2.3 представлено фрагмент результатів обчислень.

Таблиця 2.3 – Результати розрахунків середнього очікуваного часу виконання і середніх сумарних очікуваних витрат для всього дослідницького проекту

№	Схема порядку виконання робіт, $S^m_{r_1,r_2,\ldots,r_n}$	Розподіл робіт між етапами проекту	$E(\widetilde{T}(S^m_{r_1,r_2,\ldots,r_n}))$, міс.	$E(\widetilde{C}(S^m_{r_1,r_2,\ldots,r_n}))$, тис. дол.
1	$S^1_{1,1,1,1,1,1}$	| 1;2;3;4;5;6 |	2,27	291,80
2	$S^2_{2,1,1,1,1,1}$	| 2;3;4;5;6 | 1 |	5,49	223,88
3	$S^2_{1,2,1,1,1,1}$	| 1;3;4;5;6 | 2 |	3,56	281,50
4	$S^2_{2,2,1,1,1,1}$	| 3;4;5;6 | 1;2 |	6,50	230,47
5	$S^3_{3,2,1,1,1,1}$	| 3;4;5;6 | 2 | 1 |	6,98	213,87
6	$S^3_{2,3,1,1,1,1}$	| 3;4;5;6 | 1 | 2 |	7,65	230,19
7	$S^2_{1,1,2,1,1,1}$	| 1;2;4;5;6 | 3 |	4,14	283,63
…	…	…	…	…
4681	$S^6_{1,3,2,4,5,6}$	| 1 | 3 | 2 | 4 | 5 | 6 |	17,82	240,67
4682	$S^6_{2,1,3,4,5,6}$	| 2 | 1 | 3 | 4 | 5 | 6 |	16,26	210,70
4683	$S^6_{1,2,3,4,5,6}$	| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |	17,41	238,62

На рис. 2.13 зображені точки $(E(\widetilde{T}(S^m_{r_1,r_2,\ldots,r_n})), E(\widetilde{C}(S^m_{r_1,r_2,\ldots,r_n})))$, координати яких розраховані за формулами (2.19) і (2.22) для всіляких допустимих схем організації порядку виконання дослідницьких робіт $S^m_{r_1,r_2,\ldots,r_n}$. Окремо виділені непокращувані точки, що лежать на паретовій межі рішення задачі двухкрітеріальної оптимізації (2.12). Поруч з кожною точкою паретової межі вказана відповідна схема порядку виконання робіт $\breve{S}^m_{r_1,r_2,\ldots,r_n}$.

У табл. 2.4 представлені непокращувані значення середнього очікуваного часу виконання і середніх сумарних очікуваних витрат, а також відповідні їм схеми порядку виконання робіт.

Проаналізуємо множину Парето для задачі багатокритеріальної оптимізації (2.12) і відповідну множину непокращуваних схем організації порядку виконання робіт $\breve{S}^m_{r_1,r_2,\ldots,r_n}$.

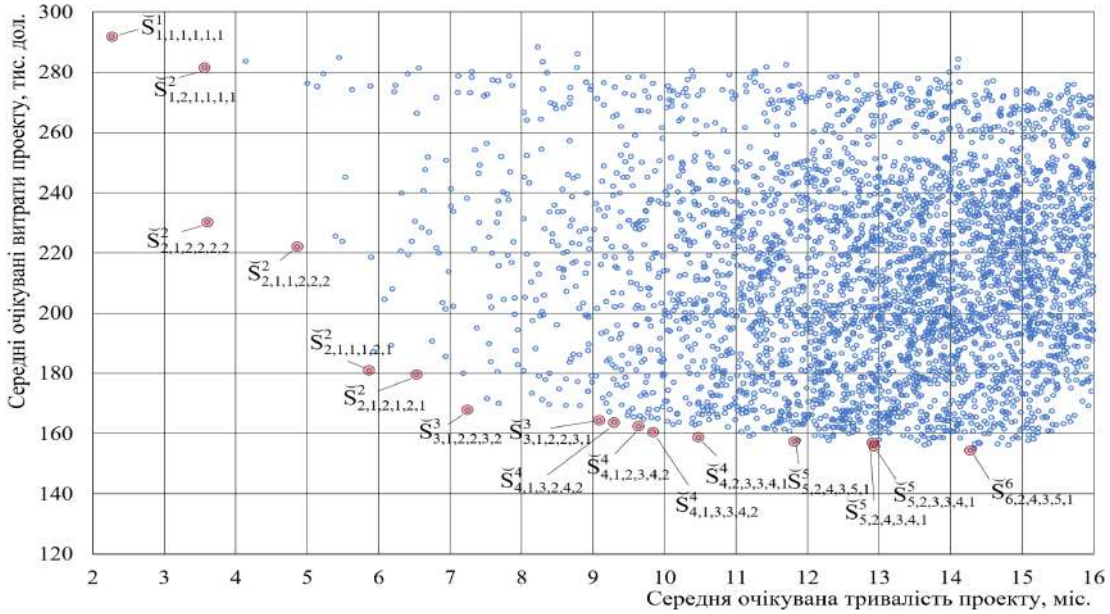


Рисунок 2.13 – Паретова межа задачі багатокритеріальної оптимізації (2.12)

Таблиця 2.4 – Непокращувані значення середнього очікуваного часу виконання і середніх сумарних очікуваних витрат для всього проекту

№	Схема порядку виконання робіт, $\breve{S}^{m}_{r_1,r_2,\ldots,r_n}$	Розподіл робіт між етапами проекту	$E(\widetilde{T}(\breve{S}^{m}_{r_1,r_2,\ldots,r_n}))$, міс.	$E(\widetilde{C}(\breve{S}^{m}_{r_1,r_2,\ldots,r_n}))$, тис. дол.
1	$\breve{S}^{1}_{1,1,1,1,1,1}$	| 1;2;3;4;5;6 |	2,27	291,80
2	$\breve{S}^{2}_{1,2,1,1,1,1}$	| 1;3;4;5;6 | 2 |	3,56	281,50
3	$\breve{S}^{2}_{2,1,1,1,2,1}$	| 2;3;4;6 | 1;5 |	5,86	180,97
4	$\breve{S}^{2}_{2,1,2,1,2,1}$	| 2;4;6 | 1;3;5 |	6,52	179,70
5	$\breve{S}^{3}_{3,1,2,2,3,1}$	| 2;6 | 3;4 | 1;5 |	9,08	164,32
6	$\breve{S}^{4}_{4,2,3,3,4,1}$	| 6 | 2 | 3;4 | 1;5 |	10,47	158,77
7	$\breve{S}^{5}_{5,2,3,3,4,1}$	| 6 | 2 | 3;4 | 5 | 1 |	12,93	155,85
8	$\breve{S}^{5}_{5,2,4,3,4,1}$	| 6 | 2 | 4 | 3;5 | 1 |	12,90	157,11
9	$\breve{S}^{5}_{5,2,4,3,5,1}$	| 6 | 2 | 4 | 3 | 1;5 |	11,82	157,40
10	$\breve{S}^{6}_{6,2,4,3,5,1}$	| 6 | 2 | 4 | 3 | 5 | 1 |	14,28	154,48
11	$\breve{S}^{2}_{2,1,1,2,2,2}$	| 2;3 | 1;4;5;6 |	4,86	222,11
12	$\breve{S}^{2}_{2,1,2,2,2,2}$	| 2 | 1;3;4;5;6 |	3,60	230,23
13	$\breve{S}^{3}_{3,1,2,2,3,2}$	| 2 | 3;4;6 | 1;5 |	7,24	167,83
14	$\breve{S}^{4}_{4,1,3,2,4,2}$	| 2 | 4;6 | 3 | 1;5 |	9,29	163,74
15	$\breve{S}^{4}_{4,1,2,3,4,2}$	| 2 | 3;6 | 4 | 1;5 |	9,64	162,41
16	$\breve{S}^{4}_{4,1,3,3,4,2}$	| 2 | 6 | 3;4 | 1;5 |	9,84	160,59

Очевидно, що точки, які не потрапили на паретову межу, не становлять практичного інтересу, оскільки існує принаймні одна точка на паретвій межі, у якій обидва критерії не гірше, і, як мінімум, один – краще. Тому всі точки, що не потрапили на межу Парето, неефективні і можуть бути виключені з розгляду. Таким чином, побудувавши межу Парето, можна відсікти більшу частину неефективних рішень. У розглянутому прикладі з 4683 різних можливих схем подальшого розгляду заслуговують лише 16 схем, які представлені в табл. 2.4. Всі ці рішення є непокращуваними, і без залучення додаткової аргументації неможливо віддати перевагу якомусь одному з цих рішень.

Паретова межа, що представлена на рис. 2.13, дає можливість зробити ряд висновків. Якщо керівництво дослідницького проекту ставить задачу мінімізації витрат, а часу на виконання робіт не надається ніякого значення, то можна вибрати схему порядку виконання робіт $\breve{S}^6_{6,2,4,3,5,1}$. При цьому математичне сподівання сумарних витрат дослідницького проекту дорівнюватиме 154,84 тис. дол., а середній очікуваний час виконання всіх робіт складе 14,28 міс. (табл. 2.4). Однак, з рис. 2.13 і табл. 2.4 видно, що якщо допустити зовсім незначне збільшення середніх очікуваних витрат, можна істотно поліпшити час виконання всіх робіт дослідницького проекту. Дійсно, якщо замість схеми порядку виконання робіт $\breve{S}^6_{6,2,4,3,5,1}$ вибрати, наприклад, схему $\breve{S}^3_{3,1,2,2,3,2}$, то середній очікуваний час проведення всіх робіт скоротиться майже в два рази (до 7,24 міс.), але при цьому середні очікувані витрати збільшяться всього лише на 8% (до 167,83 тис. дол.).

У разі, якщо час виконання робіт має ключове значення, то, вибравши схему порядку виконання робіт $\breve{S}^1_{1,1,1,1,1,1}$, можна досягти мінімального значення середнього очікуваного часу виконання всіх робіт (2,27 міс.), проте сумарні очікувані витрати при цьому будуть максимальними і складуть 291,8 тис. дол.

Виходячи з отриманих результатів, найбільш збалансованими можуть виглядати схеми порядку виконання робіт $\breve{S}^2_{2,1,1,1,2,1}$, $\breve{S}^2_{2,1,2,1,2,1}$ та $\breve{S}^3_{3,1,2,2,3,2}$. Для них

загальні очікувані витрати всього на 10 – 17% більше, ніж для самого економного варіанту виконання робіт, але при цьому середній очікуваний час виконання всіх робіт приблизно в два – два з половиною рази менше (табл. 2.4).

При обґрунтуванні організаційної структури проведення дослідницьких робіт недостатньо брати до уваги якийсь один фактор. Необхідно розглядати їх сукупність. Дослідження межі Парето, яка отримана в ході вивчення задачі багатокритеріальної оптимізації (2.12), полегшує процес прийняття рішення щодо обґрунтування порядку виконання робіт. Як показало дослідження, серед точок, що лежать на межі Парето, одні характеризуються коротким середнім сумарним часом, інші – низькими сумарними очікуваними витратами, а деякі мають збалансовані значення цих двох параметрів. У зв'язку з цим, паретову межу, що складається з непокращуваних значень середнього очікуваного часу і середніх очікуваних витрат, доцільно умовно розділити на три частини (рис. 2.14).

Для точок з першої частини паретової межі (рис. 2.14) досягаються найкращі значення середнього очікуваного часу виконання всіх робіт. Однак при цьому середні очікувані витрати досягають максимальних значень. Для того, щоб перебуваючи в цій області, зменшити середній сумарний очікуваний час виконання робіт на 1,2 міс., доведеться збільшити середні очікувані сумарні витрати приблизно на 62 тис. дол. У третій області, навпаки, досягаються мінімальні середні очікувані значення витрат за рахунок погіршення середнього очікуваного часу виконання робіт. При цьому зменшення середніх сумарних витрат на 8% супроводжується збільшенням часу виконання робіт приблизно на 100%. Найбільш збалансоване співвідношення між середніми очікуваними витратами і часом виконання всіх дослідницьких робіт спостерігається в другій області.

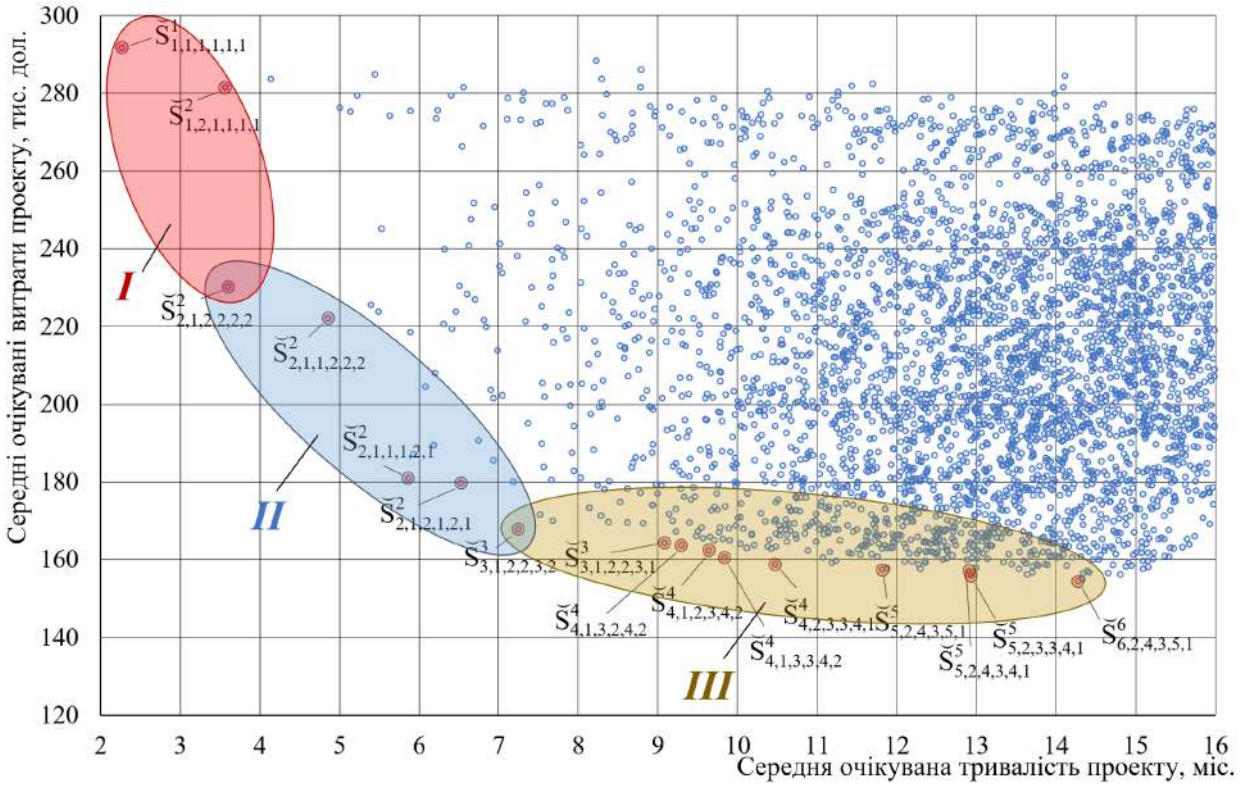


Рисунок 2.14 – Три типи непокращуваних порядків виконання робіт: прискорені, економічні, збалансовані

Всі точки, які лежать на межі Парето, є непокращуваними, і без залучення додаткової аргументації неможливо віддати перевагу якомусь одному з рішень на паретовій межі. Тільки виходячи з додаткових чинників і власного досвіду, а також оцінок залучених експертів, керівництво дослідницької програми може зробити остаточний вибір з усіх альтернатив, наявних на паретовій межі.

В даному підрозділі в якості критерію було розглянуто середній очікуваний час виконання робіт, але можливий розгляд й інших критеріїв. Запропоновані методи можна також використовувати, наприклад, для дослідження оптимальних співвідношень між середніми очікуваними витратами та ймовірністю того, що час виконання всіх робіт перевищить певну величину, і т. п. Дослідження, що представлені в даному розділі, були обмежені розглядом двухкрітеріальної задачі оптимізації. При виборі оптимального порядку виконання робіт можна розглядати і більшу кількість критеріїв. Найбільші складності при дослідженні задач з великою кількістю

критеріїв представляють не обчислювальні аспекти, а проблеми, які пов'язані з візуалізацією багатовимірної межі Парето.

В даному підрозділі розглянуто випадок, коли дослідницькі роботи можуть бути виконані в довільному порядку. Однак, очевидно, що всі запропоновані міркування можуть бути успішно застосовані і в разі, коли деякі з робіт можуть бути виконані тільки в певній послідовності.

2.8. Висновки до другого розділу

В цьому розділі розв’язана задача побудови концептуальної моделі управління інноваційною діяльністю, що дозволяє реалізувати переваги як класичних методів управління проектами, так і Agile методів. Для розв’язання цієї задачі було запропоновано концептуальну модель управління інноваційною діяльністю, а також розроблено концепції «інкубатора проектів» та «пісочниці», в рамках яких реалізується структура управління проектно-орієнтованої організації та управління доступом до її ресурсів. Отримала подальший розвиток концепція «управління можливостями», в рамках якої реалізується диференційований підхід до управління невизначеністю інноваційних проектів: управління можливостями на початкових етапах дозрівання інноваційного проекту і перехід до управління ризиками на стадії ініціації і реалізації R&D проекту. А також отримала подальший розвиток концепція «дозрівання інновації», в рамках якої реалізується управління передумовами своєчасної ініціації і успішної реалізації інноваційного проекту. Також в цьому розділі розроблено метод багатокритеріальної оптимізації порядку виконання робіт в складі дослідницького проекту, що дозволяє робити обґрунтований вибір такого порядку виконання робіт, при якому досягається збалансований мінімум значень середньої очікуваної тривалості та середніх очікуваних сумарних витрат за проектом.

Основні положення розділу розкриті в публікаціях автора [132, 234, 308–310].

РОЗДІЛ 3
РОЗРОБКА МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ ТЕРМІНІВ РЕАЛІЗАЦІЇ ПРОЕКТІВ ІННОВАЦІЙНОГО РОЗВИТКУ ТРАНСПОРТНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

3.1. Обґрунтування термінів реалізації проектів створення об'єктів інноваційної транспортної інфраструктури

Ефективність роботи транспортної інфраструктури є ключовим фактором успішного функціонування багатьох підприємств, галузей і регіонів України. В даний час значна частина транспортної інфраструктури українських морських портів застаріла і вимагає термінових заходів по її модернізації. Тому великий практичний інтерес представляє створення ефективних методів обґрунтування оптимальних термінів реалізації проектів інноваційного розвитку об'єктів транспортної інфраструктури. У ситуації, коли наявний об'єкт застарілої транспортної інфраструктури планується замінити на новий інфраструктурний об'єкт, може здаватися доцільним якомога раніше почати реалізацію проекту створення та використання інноваційного об'єкта, щоб мати можливість якомога раніше почати користуватися всіма перевагами, які надає використання інноваційних технологій. Але, з іншого боку, такий підхід може призвести до того, що експлуатація об'єкта інфраструктури, який використовує старі технології, буде закінчена задовго до того, як буде вичерпаний його фізичний ресурс і до того, як буде досягнуто термін окупності відповідних капіталовкладень. Таким чином, виникає необхідність в розробці кількісних методів, що дозволяють приймати обґрунтовані рішення щодо оптимальних термінів завершення старих і початку нових проектів, які використовують більш ефективні інноваційні технології.

Метою даного підрозділу є розробка методу обґрунтування оптимальних термінів впровадження проектів інноваційного розвитку транспортної інфраструктури з врахуванням як фізичного, так і морального зносу.

Введемо позначення:

T_{bo} – тривалість фаз проектування і будівництва об'єкта транспортної інфраструктури, що використовує старі технології, роки;

T_{bn} – тривалість фаз проектування і будівництва інноваційного об'єкта транспортної інфраструктури, роки;

T_o – планована тривалість операційної фази для проекту будівництва та використання об'єкта інфраструктури старого типу, роки;

T_n – планована тривалість операційної фази для проекту будівництва та використання інноваційного об'єкта інфраструктури, роки;

$g_o(t)$ – середня інтенсивність доходів, які пов'язані з експлуатацією об'єкта інфраструктури, що використовує старі технології, через t років після початку його експлуатації, дол./рік;

$g_o(t)$ – середня інтенсивність доходів, які пов'язані з експлуатацією об'єкта інфраструктури, що використовує інноваційні технології, через t років після початку його експлуатації, дол./рік;

A_o – витрати, які пов'язані з фазою проектування і будівництва об'єкта, що використовує старі технології, дол.;

A_n – витрати, які пов'язані з фазою проектування і будівництва об'єкта, що використовує інноваційні технології, дол.;

$c_o(t)$ – середня інтенсивність операційних витрат, які пов'язані з експлуатацією об'єкта, що використовує старі технології, після його експлуатації протягом t років, дол./рік;

$c_n(t)$ – середня інтенсивність операційних витрат, які пов'язані з експлуатацією об'єкта, що використовує інноваційні технології, після його експлуатації протягом t років, дол./рік;

$S_o(t)$ – витрати, які пов'язані з виведенням з експлуатації та демонтажем об'єкта транспортної інфраструктури, що використовує старі технології, після його експлуатації протягом t років, дол./рік;

$S_n(t)$ – витрати, які пов'язані з виведенням з експлуатації та демонтажем об'єкта транспортної інфраструктури, що використовує інноваційні технології, після його експлуатації протягом t років, дол./рік.

З огляду на те, що термін служби об'єктів транспортної інфраструктури, як правило, становить кілька років часто – десятки років, то для оцінки ефективності його використання протягом усього життєвого циклу слід використовувати дисконтування. Нехай r – річна ставка відсотка при неперервному нарощенні. Використовуючи відому формулу неперервного нарощення відсотків, можна знайти сучасну вартість загальних витрат обладнання старого типу в залежності від тривалості операційної фази T_o:

$$PV\left(C_{o,total}(T_o)\right) = \int_0^{T_o} (g_o(\tau) - c_o(\tau)) \cdot e^{-r\cdot\tau} d\tau - \\ - A_o - S_o(T_{b\,o} + T_o) \cdot e^{-r\cdot(T_{b\,o}+T_o)}. \quad (3.1)$$

Для порівняння ефективності проектів на часових інтервалах різної довжини часто використовується показник EAC (Equivalent Annual Cost) [281]. EAC дорівнює сучасному значенню витрат, які пов'язані з реалізацією проектів, помноженому на значення $CRF(T_o, r)$ (Capital Recovery Factor), де

$$CRF(T_o, r) = \frac{e^r - 1}{1 - e^{-r\cdot(T_{b\,n}+T_n)}}. \quad (3.2)$$

В даному випадку показник EAC для проекту будівництва та використання об'єкта транспортної інфраструктури, що використовує старі технології, визначається формулою

$$EAC_o(T_o) = PV\left(C_{o,total}(T_o)\right)\cdot\frac{e^r-1}{1-e^{-r\cdot(T_{bn}+T_n)}}. \qquad (3.3)$$

Оптимальною є така тривалість операційної фази T_o^* проекту будівництва та використання об'єкта інфраструктури старого типу, при якій вираз (3.3) приймає максимальне значення [103]. Аналогічно, для проектів будівництва та використання об'єктів інноваційної транспортної інфраструктури оптимальною вважається така тривалість операційної фази T_n^*, при якій досягає максимуму вираз

$$EAC_n(T_n) = \left(\int_0^{T_n}(g_n(\tau)-c_n(\tau))\cdot e^{-r\cdot\tau}d\tau - \right.$$
$$\left. - A_n - S_n(T_{bn}+T_n)\cdot e^{-r\cdot(T_{bn}+T_n)}\right)\frac{e^r-1}{1-e^{-r\cdot(T_{bn}+T_n)}}. \qquad (3.4)$$

Вивчимо питання знаходження оптимальних термінів закінчення експлуатаційної фази старого інфраструктурного проекту і переходу до реалізації нового. Нехай протягом першого циклу тривалістю $T_{bo}+T_o$ планується реалізовувати інфраструктурний проект, заснований на використанні старих технологічних рішень. Потім, протягом другого циклу тривалістю $T_{bn}+T_n$, планується реалізовувати проект, який використовує інноваційні технології. Тоді сучасна вартість загальних витрат протягом цих двох циклів може бути розрахована за формулою

$$EAC_{on}(T_o,T_n) = \left(\int_0^{T_o}(g_o(\tau)-c_o(\tau))\cdot e^{-r\cdot\tau}d\tau - \right.$$
$$- A_o - S_o(T_{bo}+T_o)\cdot e^{-r\cdot(T_{bo}+T_o)} + + e^{-r\cdot(T_{bo}+T_o)}\cdot\int_0^{T_n}(g_n(\tau)-c_n(\tau))\cdot e^{-r\cdot\tau}d\tau -$$
$$\left. - A_n\cdot e^{-r\cdot(T_{bo}+T_o)} - S_n(T_n)\cdot e^{-r\cdot(T_{bo}+T_o+T_{bn}+T_n)}\right)\frac{e^r-1}{1-e^{-r\cdot(T_{bo}+T_o+T_{bn}+T_n)}}. \qquad (3.5)$$

Значення EAC для двох повних циклів використання об'єктів інфраструктури старого і нового типу є функцією двох змінних T_o і T_n. Значення $T_o = T_o^{**}$ і $T_n = T_n^{**}$, при яких вираз (3.5) досягає свого максимуму,

можна вважати оптимальними тривалостями операційної фази проектів при переході від старих технологій до інноваційних.

Для подальшого аналізу розглянемо числовий приклад для проекту оновлення перевантажувального обладнання контейнерного терміналу. Нехай витрати, які пов'язані з фазою проектування і будівництва об'єктів транспортної інфраструктури старого і нового типу, відповідно, дорівнюють A_o=4,73 млн. дол. і A_n=3,845 млн. дол. Динаміка операційних витрат описується функцією $c_o(t) = 510{,}1 + 2{,}19 \cdot t^{2{,}03}$, тис. дол./рік і $c_n(t) = 404{,}8 + 2{,}3 \cdot t^{2{,}32}$, тис. дол./рік. Витрати, які пов'язані з виведенням з експлуатації та демонтажем після експлуатації протягом t років для об'єкту транспортної інфраструктури старого типу, дорівнюють $S_o(t) = -51{,}2 - 1390{,}02 \cdot (1{,}14 \cdot t + 1)^{-1{,}32}$ тис. дол., а для об'єкту інфраструктури нового типу – $S_n(t) = -14{,}9 - 1580{,}01 \cdot (0{,}52 \cdot t + 1)^{-2{,}02}$ тис. дол. Середня інтенсивність доходів, які пов'язані з експлуатацією об'єктів інфраструктури старого та нового типу через t років після початку їх експлуатації, дорівнюють $G_o(t) = 1405{,}03 + 1430{,}12 \cdot (0{,}51 \cdot t + 2{,}42)^{-1{,}92}$ та $G_n(t) = 1491{,}03 + 1430{,}03 \cdot (0{,}52 \cdot t + 2{,}41)^{-1{,}91}$ тис. дол./рік відповідно. Тривалість фази проектування і будівництва становить $T_{bo} = 1{,}1$ та $T_{bn} = 0{,}9$ років. Річна процентна ставка, приведена в частках, прийнята рівною $r = 0{,}08$. Графіки змінення $EAC_o(T)$ та $EAC_n(T)$ представлені на рис. 3.1. На рис. 3.2 представлено поверхню змінення значень EAC в залежності від тривалості операційної фази проектів будівництва та використання об'єктів транспортної інфраструктури з використанням старих і нових технологій. Всі чисельні розрахунки за формулами (3.1)–(3.5), необхідні для побудови графіків і знаходження оптимальних значень, наведених в даній роботі, були реалізовані в середовищі математичних обчислень Maple.

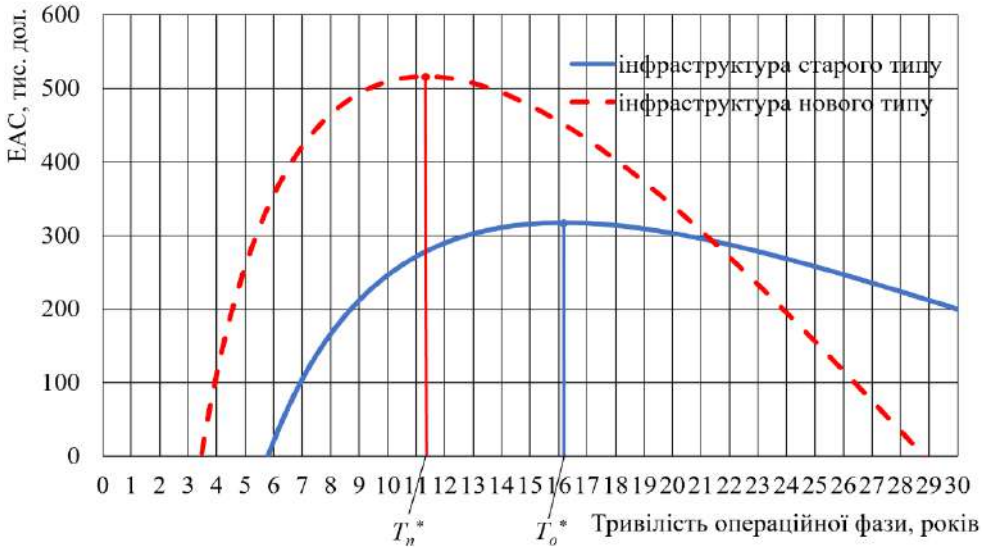


Рисунок 3.1 – Графіки змінення значень EAC для проектів, що засновані на використанні старих і нових технологій в залежності від тривалості операційної фази

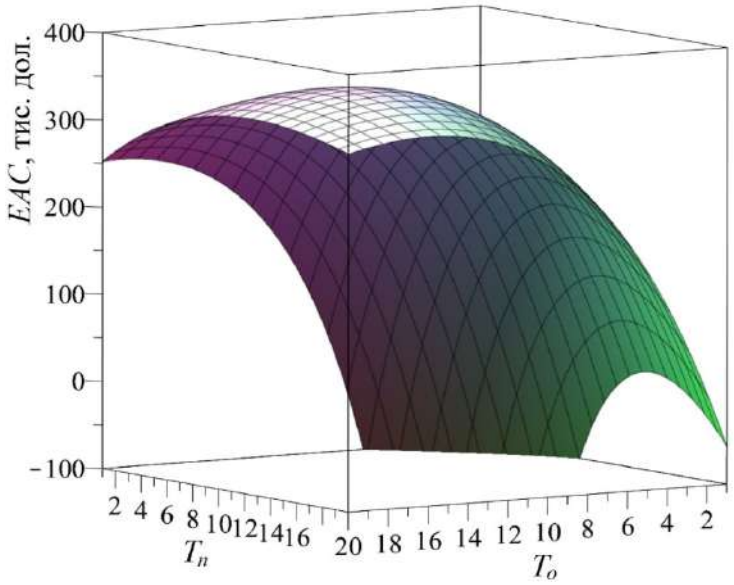


Рисунок 3.2 – Змінення значень $EAC_{on}(T_o, T_n)$

В даному випадку максимальне значення $EAC_{on}(T_o, T_n)$ досягається при $(T_o^{**}, T_n^{**}) = (14{,}54,\ 12{,}36)$ і становить 355,12 тис. дол., в той час як вираз (3.3) досягає максимуму при $T_o^* = 16{,}18$, а вираз (3.4) – при $T_n^* = 11{,}34$. Отже, з отриманих результатів можна бачити, що в даному випадку при переході від використання старих технологій до інноваційних тривалість операційної фази проекту використання об'єкту транспортної інфраструктури старого типу доцільно скоротити на 10%.

3.2. Оцінка стійкості показників ефективності проектів інноваційного розвитку транспортної інфраструктури

Доцільність ініціації проектів оновлення об'єктів транспортної інфраструктури може виникати з кількох причин. У ряді випадків це може бути пов'язано з фізичним зносом технічних засобів або з моральним зносом, який обумовлений появою на ринку більш ефективних технологічних рішень. Втім у багатьох випадках доцільність початку подібних проектів визначається не якимось одним фактором, а сукупним впливом фізичного і морального зносу наявних об'єктів інфраструктури.

При плануванні термінів реалізації проектів будівництва та використання інфраструктури морського транспорту в багатьох випадках також необхідно враховувати вплив різних випадкових факторів. Показники ефективності функціонування об'єктів інфраструктури залежать від таких зовнішніх факторів як інтенсивність та структура вантажопотоку, погодні умови і т.п., які схильні до випадкових змін. Навіть для однакового обладнання, що використовується в ідентичних умовах, динаміка фізичного зносу може бути істотно різною. І це необхідно враховувати.

В даний час багато підприємств України, і в тому числі морські порти, потребують модернізації обладнання. Це обумовлює значний практичний інтерес до розробки науково обґрунтованих методів визначення оптимальних термінів переходу на обладнання нового типу. У роботах [224] і [294] досліджувалися оптимальні терміни заміни обладнання в умовах, коли операційні витрати на обладнання схильні до випадкових коливань. Також в [224] досліджені питання впливу ставок оподаткування на визначення оптимальної тривалості життєвого циклу проектів придбання та використання обладнання. В роботі [294] було досліджено вплив випадкових коливань рівня завантаження обладнання на його оптимальні терміни служби. Однак в цих

роботах не розглядалася можливість капітальних ремонтів обладнання і не враховувався фактор морального зносу.

В [352] і [315] досліджено питання визначення оптимальних термінів проектів придбання та використання обладнання з урахуванням можливості його реставрації. Так, в [352] розглядалася можливість єдиного ремонту обладнання для вугільної електростанції. В роботі [315] розглядалося перевантажувальне обладнання і допускалася можливість його багаторазових капітальних ремонтів. І в [352], і в [315] враховувався фактор випадковості при зміні операційних витрат на обладнання. Однак в цих роботах не були розглянуті питання, пов'язані з обґрунтуванням тривалості життєвого циклу проектів придбання і використання старіючого обладнання в зв'язку з появою інноваційного більш ефективного обладнання.

В роботі [375] досліджувалася проблема знаходження оптимального часу заміни обладнання з урахуванням оподаткування та амортизаційної політики. Для цього запропоновано математичну модель, яка заснована на диференціальному рівнянні в частинних похідних. Для моделювання випадкових коливань використовувався броунівський процес. Відмови складних багатокомпонентних технічних систем вивчені в [302]. У цій роботі досліджено вплив зміни показників функціювання технічної системи, якості її елементів і взаємодії між ними на збої всієї системи і зміни пов'язаних з цим витрат, а також представлено моделі оцінки витрат для систем з різною конфігурацією елементів і проведено аналіз чутливості. За рамками даних досліджень залишилися питання, пов'язані з моральним старінням обладнання.

У роботах [298] і [297] досліджені питання сталого функціонування транспортних систем в умовах нерівномірного вантажопотоку і обґрунтування вибору оптимальної структури парку обладнання. Однак в цих роботах також не було приділено уваги обґрунтуванню стратегій замін обладнання з урахуванням технологічного прогресу.

Плануванню термінів реалізації проектів впровадження нових технологій присвячено статтю [274]. Запропоновані в ній моделі та висновки базуються на певних припущеннях щодо темпів розвитку технічного прогресу і появи нових технологій.

В роботі [223] вивчені питання дострокової і відкладеної заміни обладнання в детермінованій моделі з урахуванням технологічного прогресу. Передбачалося, що рівень доходів і витрат, пов'язаних з обладнанням, змінюється з часом. Оптимальний час детермінованої заміни обладнання визначався за допомогою моделі динамічного програмування.

У статті [250] вивчалися питання визначення оптимального часу реалізації проектів впровадження інноваційного обладнання з урахуванням невизначеності часу появи нових технологій і їх ефективності. Розглянуто три стратегії впровадження технологічних інновацій. Проведено обґрунтування вибору тієї чи іншої стратегії при різних рівнях невизначеності, ефективності, а також темпів розвитку технологічних інновацій.

Для того, щоб обґрунтувати час заміни обладнання з урахуванням наявних резервів запасних частин і з урахуванням технічного прогресу, в [323] було запропоновано використовувати модель марковського процесу прийняття рішень. Передбачалося, що завдяки технічному прогресу, на ринку з плином часу можуть з'являтися нові типи обладнання, але при заміні обладнання старого типу на обладнання нового типу запасні частини для обладнання старого типу стають зайвими.

Однак, в роботах [223, 250, 274, 323] не було досліджено вплив фізичного зносу обладнання на визначення оптимальних термінів закінчення проектів їх придбання та використання. Є ряд робіт, в яких при визначенні оптимальних термінів заміни обладнання враховується тільки фактор фізичного зносу або тільки фактор появи нових технологій. Так само багатьма авторами підкреслюється необхідність вивчення впливу фактору випадковості при обґрунтуванні тривалості проектів придбання та використання обладнання. У багатьох роботах в тій чи іншій мірі враховуються тільки деякі

з наведених факторів. У той же час в ряді випадків при прийнятті рішень про заміну обладнання необхідно в повній мірі враховувати сукупність всіх зазначених факторів.

Метою даного підрозділу є розробка методу планування оптимальних термінів завершення проектів придбання та подальшого використання обладнання, схильного до фізичного і морального зносу, та початку реалізації проектів придбання та використання більш досконалого обладнання, враховуючи стійкість показників ефективності цих проектів.

Для досягнення поставленої мети вирішуються наступні задачі:

– обґрунтовується вибір критеріїв оцінки ефективності проектів придбання та використання обладнання при переході на обладнання нового типу;

– встановлюються кількісні оцінки ступеня невизначеності показників ефективності в залежності від вибору тривалості операційної фази проектів придбання та використання обладнання;

– встановлюється багатокритеріальна оцінка ефективності і стійкості показників проектів придбання та використання обладнання в залежності від тривалості їх життєвих циклів.

У більшості випадків виплати на ремонти та обслуговування обладнання здійснюються дискретно і агрегуються помісячно, поквартально чи щорічно. Тому, при оцінці ефективності проектів придбання та використання обладнання, постфактум часто використовуються дискретні моделі. Однак для прогнозування зручніше використовувати неперервні криві прогнозованих можливих змін показників і неперервні методи оптимізації. Тому в даному розділі увагу приділено розвитку методів, що базуються на застосуванні неперервних моделей.

Розглянемо ситуацію, коли старе обладнання планується замінювати на більш досконале обладнання такої ж продуктивності [139, 151]. Введемо наступні позначення:

A_o – вартість покупки і монтажу обладнання старого типу, дол.;

A_n – вартість покупки і монтажу обладнання нового типу, дол.;

$c_o(t)$ – середня інтенсивність операційних витрат обладнання старого типу після його експлуатації протягом *t* років, дол./рік;

$c_n(t)$ – середня інтенсивність операційних витрат обладнання нового типу після його експлуатації протягом *t* років, дол./рік;

$S_o(t)$ – вартість демонтажу та продажу обладнання старого типу після його експлуатації протягом *t* років, дол.;

$S_n(t)$ – вартість демонтажу та продажу обладнання нового типу після його експлуатації протягом *t* років, дол.;

T_o – час, протягом якого планується використовувати обладнання старого типу, роки;

T_n – час, протягом якого планується використовувати обладнання нового типу, роки.

Так як термін служби складного обладнання, як правило, становить кілька років, то для оцінки ефективності проекту його придбання та використання протягом усього життєвого циклу слід використовувати дисконтування [137]. Нехай r – річна ставка відсотка при неперервному нарощенні. Використовуючи відому формулу неперервного нарощення відсотків (див., наприклад, [280]), можна знайти сучасну вартість операційних витрат проекту придбання та використання обладнання старого типу при його використанні протягом T_o років:

$$PV(C_{o,oper}(T_o)) = \int_0^{T_o} c_o(\tau) \cdot e^{-r \cdot \tau} d\tau . \tag{3.6}$$

Сучасна вартість капітальних витрат проекту для обладнання старого типу при його використанні протягом T_o років визначається формулою

$$PV(C_{o,cap}(T_o)) = A_o + S_o(T_o) \cdot e^{-r \cdot T_o} . \tag{3.7}$$

Отже, сучасна вартість загальних витрат проекту придбання та використання обладнання старого типу при його використанні протягом T_o років дорівнює

$$PV\left(C_{o,total}(T_o)\right) = PV\left(C_{o,cap}(T_o)\right) + PV\left(C_{o,oper}(T_o)\right) =$$

$$= A_o + S_o(T_o)\cdot e^{-r\cdot T_o} + \int_0^{T_o} c_o(\tau)\cdot e^{-r\cdot\tau} d\tau\,. \qquad (3.8)$$

Для обґрунтування оптимальної тривалості життєвого циклу проектів придбання та використання обладнання в якості міри ефективності можна використовувати сучасну вартість загальних витрат проектів при циклічних замінах обладнання на обладнання того ж типу протягом нескінченного горизонту планування $PV\left(C^{\infty}_{o,total}(T_o)\right)$. Підсумовуючи члени геометричної прогресії, легко показати, що

$$PV\left(C^{\infty}_{o,total}(T_o)\right) = PV\left(C_{o,total}(T_o)\right)\cdot\frac{1}{1-e^{-r\cdot T_o}}\,. \qquad (3.9)$$

Для порівняння ефективності роботи обладнання на часових інтервалах різної довжини часто використовується показник EAC (Equivalent Annual Cost) (див., наприклад, [281]). EAC дорівнює сучасному значенню витрат проекту, помноженому на значення $CRF(T_o, r)$ (Capital Recovery Factor), де

$$CRF(T_o, r) = \frac{e^r - 1}{1 - e^{-r\cdot T_o}}\,. \qquad (3.10)$$

В даному випадку показник EAC, розрахований на підставі одного повного циклу використання обладнання старого типу, знаходиться за формулою

$$EAC_o(T_o) = PV\left(C_{o,total}(T_o)\right)\cdot\frac{e^r - 1}{1 - e^{-r\cdot T_o}}\,. \qquad (3.11)$$

Оптимальним можна вважати таку тривалість життєвого циклу проекту T_o^*, при якій вираз (3.9) або (3.11) буде приймати мінімальне значення. Хоча формули (3.9) і (3.11) відображають різні показники проекту, але, очевидно, що вони досягають своїх мінімальних значень при одному і тому ж значенні $T_o = T_o^*$.

Аналогічно можна встановити, що оптимальний термін служби T_n^* обладнання нового типу за умови його заміни на обладнання такого ж типу, є точкою мінімуму виразу

$$EAC_n(T_n) = PV\left(C_{n,total}(T_n)\right)\cdot\frac{e^r-1}{1-e^{-r\cdot T_n}}, \tag{3.12}$$

де

$$PV\left(C_{n,total}(T_n)\right) = A_n + S_n(T_n)\cdot e^{-r\cdot T_n} + \int_0^{T_n} c_n(\tau)\cdot e^{-r\cdot\tau}d\tau\,. \tag{3.13}$$

Якщо при такому ж рівні продуктивності має місце нерівність $EAC_n(T_n^*) < EAC_o(T_o^*)$, то це дає підставу вважати, що обладнання нового типу при його використанні в даних умовах є економічно більш ефективним, ніж обладнання старого типу.

Дослідимо питання знаходження оптимальних термінів реалізації проектів при переході від обладнання старого типу на обладнання нового типу, що можна порівняти за продуктивністю зі старим, але таким, що є більш ефективним з економічної точки зору. Для цього розглянемо дві схеми міркувань: першу схему, яка базується на аналізі скінченого часового інтервалу, що складається з двох повних циклів заміни обладнання, і другу – що заснована на нескінченному часовому інтервалі.

Спочатку розглянемо першу схему. В рамках цієї схеми планується протягом першого циклу тривалістю T_o років використовувати обладнання старого типу. Потім планується протягом другого циклу тривалістю T_n років використовувати обладнання нового типу. Легко бачити, що сучасна вартість загальних витрат протягом цих двох циклів може бути розрахована як

$$EAC_{on}(T_o, T_n) =$$

$$= \left[PV\left(C_{o,total}(T_o)\right) + PV\left(C_{n,total}(T_n)\right)\cdot e^{-r\cdot T_o}\right]\cdot\frac{e^r-1}{1-e^{-r\cdot(T_o+T_n)}}. \tag{3.14}$$

Значення EAC для двох повних циклів використання обладнання старого і нового типу є функцією двох змінних T_o та T_n. Значення $T_o = T_o^{**}$ та $T_n = T_n^{**}$, при яких вираз (3.14) досягає свого мінімуму, можна вважати оптимальними термінами служби обладнання при переході від обладнання старого типу на нове обладнання.

Знайдемо значення EAC для другої схеми міркувань. В рамках цієї схеми будемо аналізувати нескінченний горизонт планування [105, 344]. Причому, протягом першого повного циклу роботи планується використовувати обладнання старого типу. Потім протягом усіх наступних циклів однакової тривалості T_n планується використовувати обладнання нового типу. У цьому випадку, очевидно,

$$EAC_{on}^{\infty}(T_o, T_n) =$$

$$= \left[PV\left(C_{o,total}(T_o)\right) + e^{-r\cdot T_o} \cdot \sum_{k=0}^{\infty} \left(e^{-r\cdot T_n \cdot k} \cdot PV\left(C_{n,total}(T_n)\right)\right)\right] \cdot \left(e^r - 1\right) =$$

$$= \left[PV\left(C_{o,total}(T_o)\right) + PV\left(C_{n,total}(T_n)\right) \cdot \frac{e^{-r\cdot T_o}}{1 - e^{-r\cdot T_n}} \right] \cdot \left(e^r - 1\right). \qquad (3.15)$$

Позначимо $T_o = T_o^{***}$ і $T_n = T_n^{***}$, при яких вираз (3.15) досягає свого мінімуму. Нескладно перевірити, що $T_n^{***} = T_n^{*}$.

З ростом старіння обладнання у зв'язку з впливом різних випадкових факторів можливі суттєві коливання значень операційних витрат. Тому має сенс описувати динаміку зміни інтенсивності операційних витрат проектів придбання та використання обладнання за допомогою випадкових процесів $c_o(t,\omega)$ та $c_n(t,\omega)$, де $\omega \in \Omega$, а $(\Omega, \mathrm{A}, \mathrm{P})$ – ймовірнісний простір. Причому математичні сподівання цих випадкових процесів відповідно дорівнюють $c_o(t) = E(c_o(t,\omega))$ та $c_n(t) = E(c_n(t,\omega))$. В такому випадку сучасні значення операційних витрат будуть описуватися відповідними випадковими процесами

$$PV(C_{o,oper}(T_o,\omega)) = \int_0^{T_o} c_o(\tau,\omega)\cdot e^{-r\cdot\tau}d\tau\ , \tag{3.16}$$

$$PV(C_{n,oper}(T_n,\omega)) = \int_0^{T_n} c_n(\tau,\omega)\cdot e^{-r\cdot\tau}d\tau\,. \tag{3.17}$$

Отже, значення *EAC* також буде випадковою величиною.

Вивчимо вплив вибору тривалості життєвих циклів проектів придбання та використання обладнання на стійкість показника EAC для ланцюжка послідовно замінних машин старого і нового типу, а саме – на значення показника середньоквадратичного відхилення $\sigma(EAC_{on}(T_o,T_n,\omega))$. Для цього розглянемо коваріаційні функції випадкових процесів $c_o(t,\omega)$ та $c_n(t,\omega)$ відповідно:

$$K_o(t_1,t_2) = E\big((c_o(t_1,\omega)-c_o(t_1))(c_o(t_2,\omega)-c_o(t_2))\big), \tag{3.18}$$

$$K_n(t_1,t_2) = E\big((c_n(t_1,\omega)-c_n(t_1))(c_n(t_2,\omega)-c_n(t_2))\big). \tag{3.19}$$

Природно припускати, що динаміка операційних витрат кожного наступного проекту не залежить від витрат попередніх проектів [293, 344]. Тому, використовуючи (3.14) і властивості коваріаційних функцій випадкових процесів (див., наприклад, [50]), отримуємо

$$\sigma^2\left(EAC_{on}(T_o,T_n,\omega)\right)=$$

$$=\left(\frac{e^r-1}{1-e^{-r\cdot(T_o+T_n)}}\right)^2\cdot\left[\sigma^2\left(PV\left(C_{o,total}(T_o,\omega)\right)\right)+e^{-2\cdot r\cdot T_o}\cdot\sigma^2\left(PV\left(C_{n,total}(T_n,\omega)\right)\right)\right]=$$

$$=\left(\frac{e^r-1}{1-e^{-r\cdot(T_o+T_n)}}\right)^2\cdot\left[\int_0^{T_o}\int_0^{T_o}K_o(t_1,t_2)\cdot e^{-r\cdot(t_1+t_2)}dt_1dt_2+\right.$$

$$\left.+e^{-2\cdot r\cdot T_o}\cdot\int_0^{T_n}\int_0^{T_n}K_n(t_1,t_2)\cdot e^{-r\cdot(t_1+t_2)}dt_1dt_2\right]. \tag{3.20}$$

Аналогічно, з рівності (3.15) для другої схеми міркувань отримуємо

$$\sigma^2\left(EAC^{\infty}_{on}(T_o,T_n,\omega)\right)=$$

$$=\left(e^r-1\right)^2\cdot\left[\sigma^2\left(PV\left(C_{o,total}(T_o,\omega)\right)\right)+e^{-2\cdot r\cdot T_o}\cdot\sigma^2\left(\sum_{k=0}^{\infty}\left(e^{-r\cdot T_n\cdot k}\cdot PV\left(C_{n,total}(T_n,\omega)\right)\right)\right)\right]=$$

$$= \left(e^{r} - 1\right)^2 \cdot \left[\sigma^2 \left(PV\left(C_{o,total}(T_o, \omega)\right)\right) + \frac{e^{-2 \cdot r \cdot T_o}}{1 - e^{-2 \cdot r \cdot T_n}} \cdot \sigma^2 \left(PV\left(C_{n,total}(T_n, \omega)\right)\right)\right] =$$

$$= \left(e^{r} - 1\right)^2 \cdot \left[\int_0^{T_o} \int_0^{T_o} K_o(t_1, t_2) \cdot e^{-r \cdot (t_1 + t_2)} dt_1 dt_2 + \right.$$

$$\left. + \frac{e^{-2 \cdot r \cdot T_o}}{1 - e^{-2 \cdot r \cdot T_n}} \cdot \int_0^{T_n} \int_0^{T_n} K_n(t_1, t_2) \cdot e^{-r \cdot (t_1 + t_2)} dt_1 dt_2 \right]. \quad (3.21)$$

На практиці, крім оптимізації показників ефективності проектів придбання та використання обладнання, велике значення має стійкість цих показників. Ґрунтуючись на запропонованих вище методах оцінки середніх очікуваних показників коливань *EAC*, можна розглядати двохкрітеріальну задачу мінімізації

$$\min_{T_o, T_n} \left(E(EAC_{on}(T_o, T_n, \omega)), \sigma(EAC_{on}(T_o, T_n, \omega)) \right). \quad (3.22)$$

В (3.22) здійснюється пошук тривалостей проектів T_o и T_n, при яких досягаються збалансовано мінімальні значення $E(EAC_{on}^{\infty}(T_o, T_n, \omega))$ та $\sigma(EAC_{on}^{\infty}(T_o, T_n, \omega))$. Аналогічно можна досліджувати задачу

$$\min_{T_o, T_n} \left(E(EAC_{on}^{\infty}(T_o, T_n, \omega)), \sigma(EAC_{on}^{\infty}(T_o, T_n, \omega)) \right). \quad (3.23)$$

Дослідимо оптимальні терміни для реалізації проектів придбання та використання портових контейнерних перевантажувачів. Ціни обладнання старого і нового типу, відповідно, дорівнюють A_o=240 тис. дол. та A_n=195 тис. дол. Середня динаміка операційних витрат описується за допомогою функцій $c_o(t) = 75{,}07 + 0{,}21 \cdot t^{2{,}11}$, тис. дол./рік та $c_n(t) = 60{,}52 + 0{,}22 \cdot x^{2{,}52}$, тис. дол./рік, отриманих за допомогою регресійного аналізу за фактичними даними використання обладнання. Ціна демонтажу та продажу обладнання в залежності від терміну служби описується функцією $S_o(t) = -5{,}15 - 140{,}01 \cdot (1{,}14 \cdot t + 1)^{-1{,}32}$, тис. дол. для старого обладнання і

$S_n(t) = -1{,}50 - 159{,}99 \cdot (0{,}51 \cdot t + 1)^{-2{,}02}$ тис. дол. – для нового. Річна процентна ставка, наведена в частках, прийнята рівною $r = 0{,}10$.

Всі чисельні розрахунки за формулами (3.6) – (3.23), що необхідні для побудови графіків і знаходження оптимальних значень, наведених в цьому підрозділі, реалізовані в середовищі математичних обчислень Maple (додаток Б). Графіки змінення $EAC_o(T)$ та $EAC_n(T)$ представлені на рис. 3.3. Вираз (3.11) досягає мінімуму при $T_o^* = 12{,}28$, а вираз (3.12) – при $T_n^* = 8{,}05$.

На рис. 3.4, 3.5 представлені поверхні змінення значень EAC при двох циклах замін і при нескінченному числі циклів змінення обладнання в залежності від тривалості проектів придбання та використання обладнання.

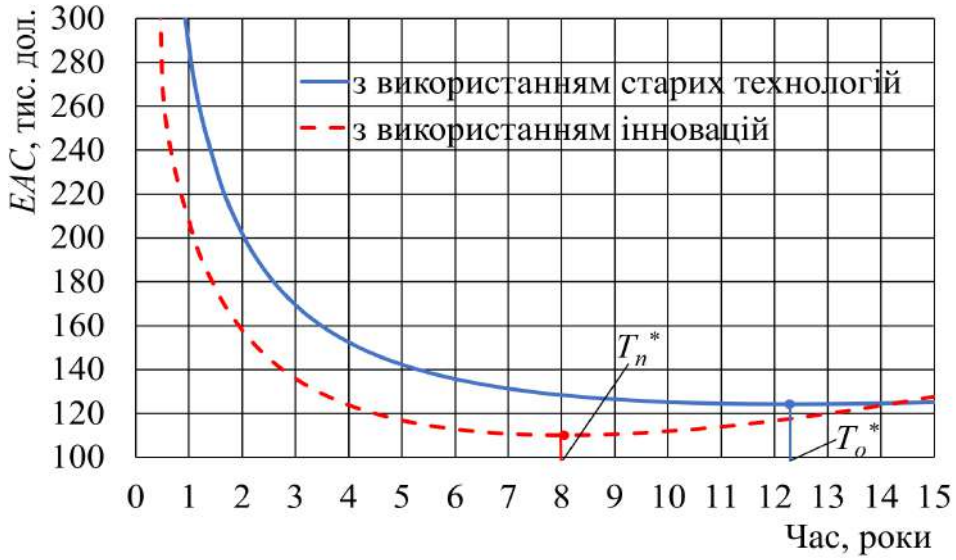


Рисунок 3.3 – Графік змінення EAC для проектів придбання та використання обладнання старого і нового типу в залежності від термінів їх реалізації

Мінімальне значення $EAC_{on}(T_o, T_n)$ досягається при $(T_o^{**}, T_n^{**}) = (10{,}93,\ 8{,}83)$ та становить 121,29 тис. дол. А мінімальне значення $EAC_{on}^{\infty}(T_o, T_n)$ досягається при $(T_o^{***}, T_n^{***}) = (10{,}15,\ 8{,}05)$ і становить 119,60 тис. дол.

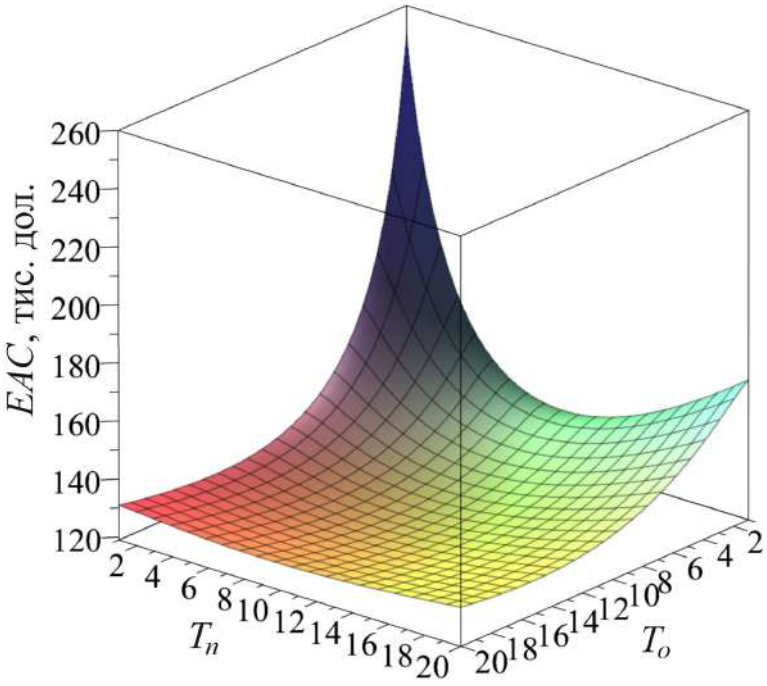


Рисунок 3.4 – Змінення значень $EAC_{on}(T_o, T_n)$ при двох циклах замін обладнання

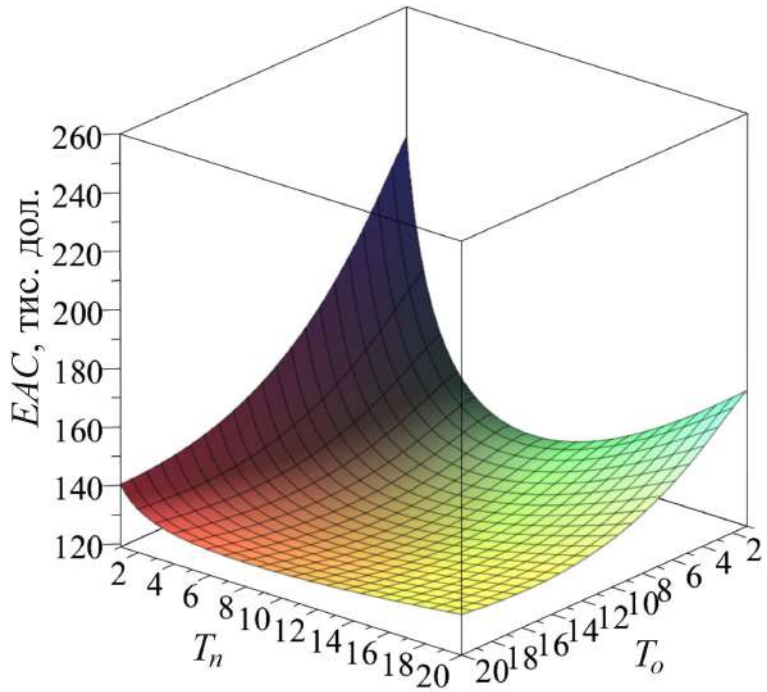


Рисунок 3.5 – Змінення значень $EAC^{\infty}_{on}(T_o, T_n)$ при нескінченному числі циклів замін обладнання

На рис. 3.6 представлені графіки змінення значень *EAC* для кожного окремо взятого проекту при заміні обладнання старого типу на нове обладнання. На рис. 3.7 представлені графіки змінення *EAC* для кожного

окремо взятого проекту при одному циклі роботи обладнання старого типу і нескінченній кількості наступних циклів роботи обладнання нового типу. На рис. 3.6 і 3.7 синьою суцільною лінією представлена крива змінення значень *EAC* для обладнання старого типу, а червоною пунктирною – криві значень *EAC* для обладнання нового типу. Розрахунки показали, що значення T_o^* помітно перевищує значення T_o^{**}, а T_n^{**} перевищує T_n^*. При цьому очевидно, що чим більш ефективним буде нове обладнання, тим більше буде різниця між T_o^* та T_o^{**}.

Дослідимо стійкість значень *EAC* в залежності від вибору тривалостей життєвих циклів проектів при можливих випадкових змінах величин операційних витрат. Оцінка функції операційних витрат $c_o(t)$ і коваріаційної функції $K_o(t_1,t_2)$ для обладнання старого типу, як правило, не представляє значних проблем, так як в більшості випадків для обладнання старого типу є досить статистичних даних. Але для обладнання нового типу іноді буває недостатньо інформації для надійних статистичних оцінок показників використання обладнання в даних конкретних умовах.

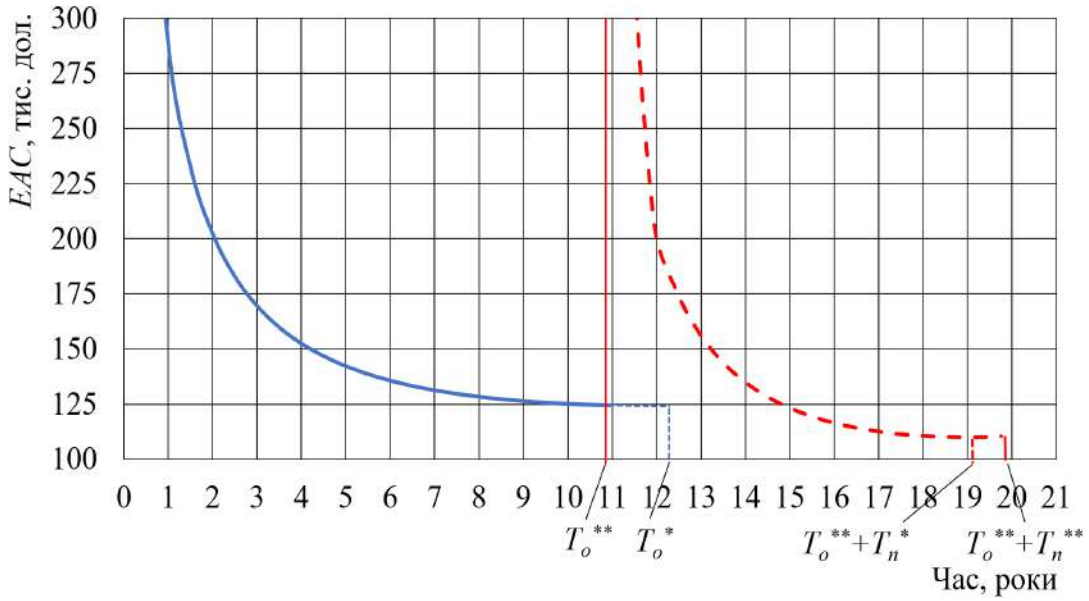


Рисунок 3.6 – Графік змінення *EAC* при двох проектних циклах

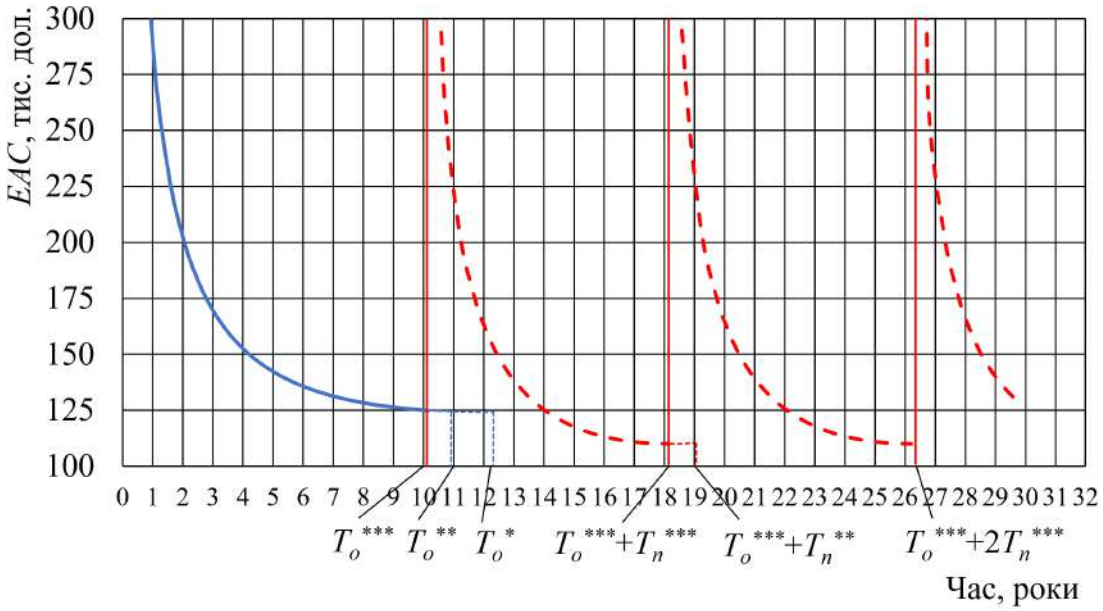


Рисунок 3.7 – Графіки змінення *EAC* при нескінченній кількості проектних циклів

В цьому випадку оцінка динаміки середнього рівня операційних витрат і коваріаційної функції $K_n(t_1,t_2)$ може бути отримана на підставі технічної документації та експертних оцінок фахівців. Найчастіше впровадження і перший досвід використання інноваційного обладнання пов'язаний з підвищеними ризиками. І ці ризики слід враховувати при обґрунтуванні значень коваріаційної функції $K_n(t_1,t_2)$.

Далі, при описі коваріаційних функцій для проектів використання обладнання старого і нового типу, будемо використовувати вираз такого вигляду

$$K(t_1,t_2)=(a_1\cdot(t_1+t_2)^{a_2}+a_3)\cdot\exp\left(\frac{-(t_1-t_2)^2}{a_4\cdot(t_1+t_2)^{a_5}+a_6}\right), \qquad (3.24)$$

де набір постійних коефіцієнтів $a=(a_1,...,a_6)$ визначається методами регресійного аналізу, окремого для кожного типу обладнання. Такий вибір виду коваріаційної функції дозволяє легко інтерпретувати вплив кожного з постійних коефіцієнтів на властивості досліджуваного випадкового процесу зміни поточних витрат обладнання [152]. Так, коефіцієнти a_1, a_2 и a_3 визначають, відповідно, швидкість росту, форму кривої і початкове значення

функції дисперсії для досліджуваного випадкового процесу, а коефіцієнти a_4, a_5 та a_6 відображають те, як з плином часу змінюється ступінь взаємозв'язку між значеннями поточних витрат обладнання в різні моменти часу. Використання коваріаційних функцій виду (3.24) дозволило досить точно описати процес зміни рівня поточних витрат для проектів придбання та використання контейнерних перевантажувачів. Однак дана форма коваріаційних функцій не є універсальною. Форму функції $K(t_1,t_2)$ слід підбирати і обґрунтовувати індивідуально для різних видів обладнання і різних умов експлуатації.

Для розглянутих контейнерних перевантажувачів старого типу на основі регресійного аналізу було визначено набір значень постійних коефіцієнтів $a_o = (0{,}3501; 2{,}21; 35{,}21; 0{,}002; 2{,}50; 15{,}40)$ у функції (3.24) [293]. Відповідно, для контейнерних перевантажувачів нового типу були отримані значення коефіцієнтів $a_n = (0{,}0075; 3{,}50; 105{,}21; 0{,}015; 3{,}01; 5{,}61)$.

На рис. 3.8, 3.9 представлені графіки коваріаційних функцій $K_o(t_1,t_2)$ та $K_n(t_1,t_2)$ для обладнання старого і нового типу відповідно, що визначаються функцією виду (3.24) з зазначеними вище значеннями коефіцієнтів.

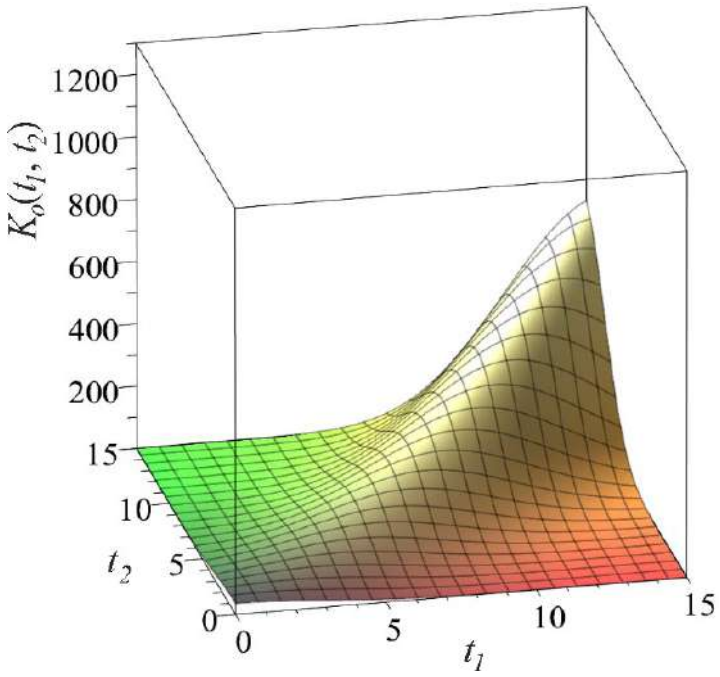


Рисунок 3.8 – Графік коваріаційної функції $K_o(t_1,t_2)$

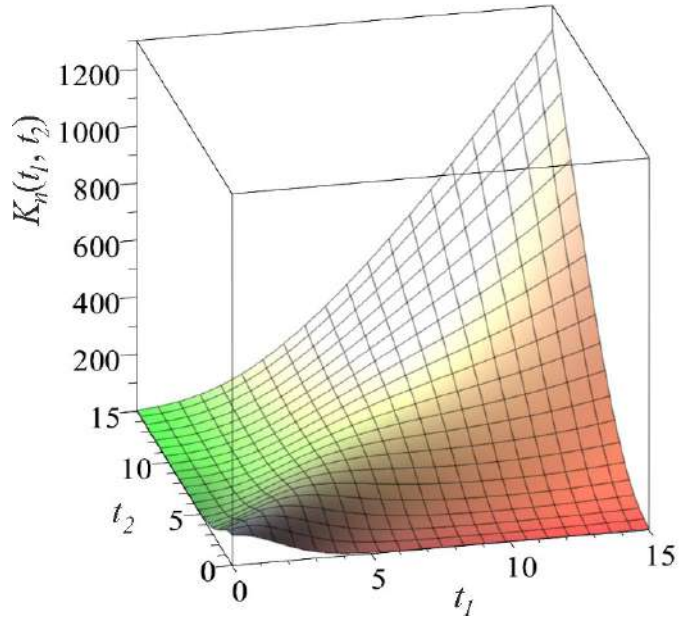


Рисунок 3.9 – Графік коваріаційоної функції $K_n(t_1,t_2)$

З рис. 3.8, 3.9 видно, що дисперсія значень поточних витрат для обладнання нового типу значно вище, ніж для обладнання старого типу [152]. При цьому для обладнання нового типу також спостерігається більший взаємозв'язок між значеннями поточних витрат в різні моменти часу, ніж для старого. На рис. 3.10 представлено графік змінення середньоквадратичного відхилення значень *EAC* в залежності від термінів заміни обладнання при двох циклах замін. Аналогічний графік змінення середньоквадратичного відхилення значень *EAC* при нескінченній кількості циклів замін представлено на рис. 3.11.

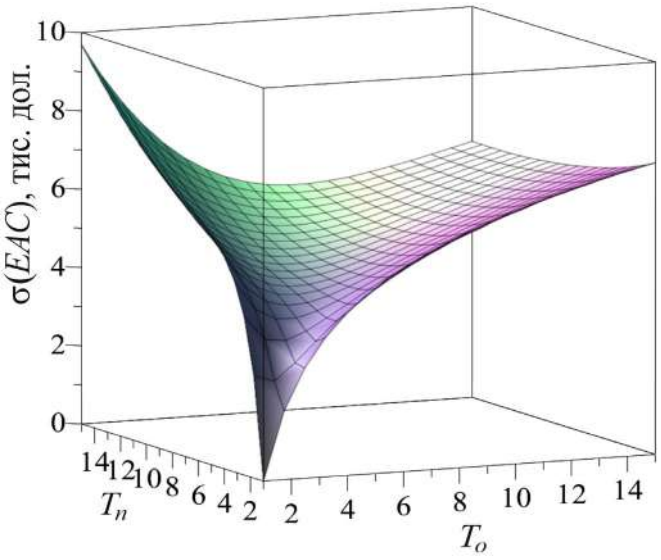


Рисунок 3.10 – Графік функції $\sigma(EAC_{on}(T_o, T_n, \omega))$

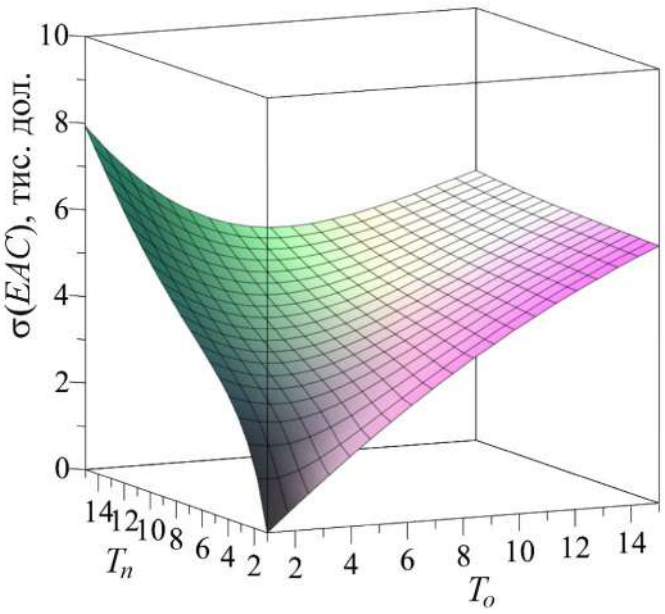


Рисунок 3.11 – Графік функції $\sigma(EAC_{on}^{\infty}(T_o, T_n, \omega))$

Зіставляючи рис. 3.4 і рис. 3.10, а також рис. 3.5 і рис. 3.11, можна помітити, що значення T_o та T_n, які є оптимальними з точки зору математичного сподівання *EAC*, не відповідатимуть мінімальним значенням середньоквадратичних відхилень *EAC*. Тому для того, щоб обґрунтувати такий вибір тривалостей життєвих циклів проектів, при якому був би досягнутий баланс між мінімальністю і стійкістю значень *EAC*, потрібно досліджувати задачі багатокритеріальної оптимізації (3.22) і (3.23) [152]. Проаналізуємо взаємозв'язок між значеннями $E(EAC_{on}(T_o, T_n, \omega))$ та $\sigma(EAC_{on}(T_o, T_n, \omega))$. На рис. 3.12 [139] представлено множину точок, координати кожної з яких відповідно дорівнюють $E(EAC_{on}(T_o, T_n, \omega))$ та $\sigma(EAC_{on}(T_o, T_n, \omega))$ і визначаються вибором значень T_o і T_n. Червоним кольором виділені непокращувані точки, що лежать на паретовій межі задачі багатокритеріальної оптимізації (3.22). Координати деяких непокращуваних рішень, а також відповідні їм значення часу заміни обладнання T_o та T_n представлені в табл. 3.1.

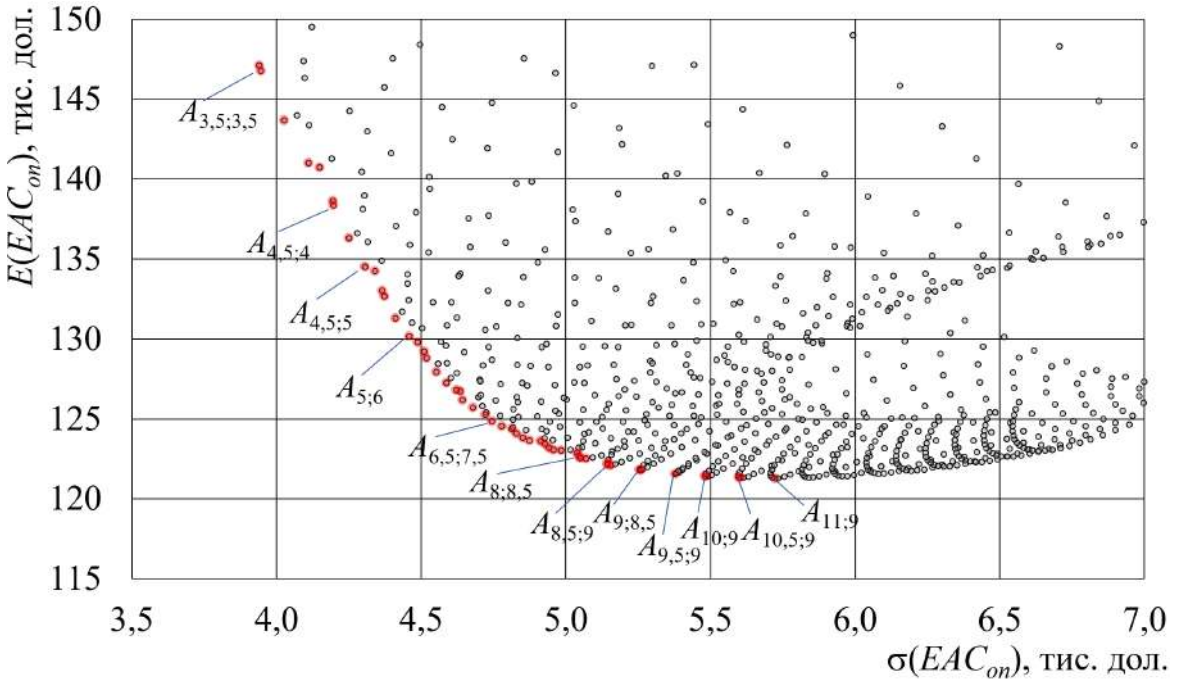


Рисунок 3.12 – Співвідношення значень $E(EAC_{on}(T_o, T_n, \omega))$ та $\sigma(EAC_{on}(T_o, T_n, \omega))$ при різних значеннях T_o та T_n

Таблиця 3.1 – Деякі непокращувані рішення задачі двухкрітеріальної оптимізації (3.22)

Позначення точки на паретовій межі, $A_{T_o;T_n}$	$E(EAC_{on}(T_o, T_n, \omega))$	$\sigma(EAC_{on}(T_o, T_n, \omega))$
$A_{3,5;3,5}$	147,10	3,94
$A_{4,5;4}$	138,37	4,20
$A_{4,5;5}$	134,52	4,31
$A_{5;6}$	130,16	4,46
$A_{6,5;7,5}$	124,84	4,74
$A_{8;8,5}$	122,56	5,05
$A_{8,5;9}$	122,12	5,16
$A_{9;8,5}$	121,82	5,25
$A_{9,5;9}$	121,57	5,38
$A_{10;9}$	121,40	5,48
$A_{10,5;9}$	121,31	5,60
$A_{11;9}$	121,29	5,72

Червоним кольором на рис. 3.13 зображено точки, що лежать на паретовій межі задачі багатокритеріальної оптимізації (3.23). Координати деяких з цих точок представлені в табл. 3.2.

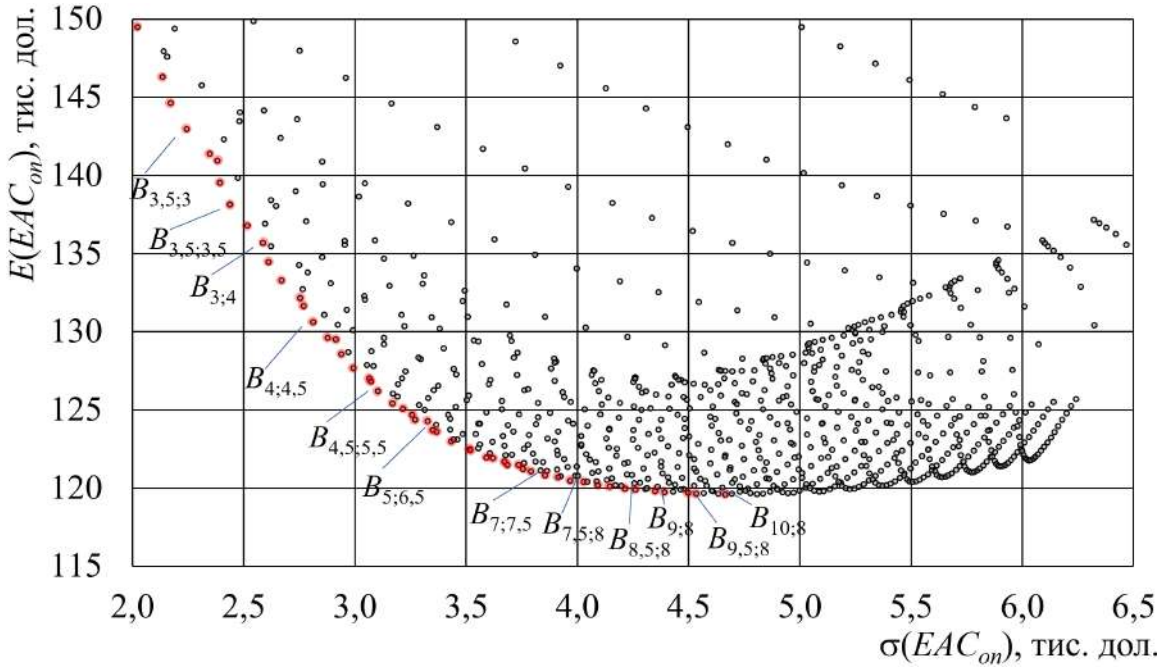


Рисунок 3.13 – Співвідношення значень $E(EAC_{on}^{\infty}(T_o, T_n, \omega))$ та $\sigma(EAC_{on}^{\infty}(T_o, T_n, \omega))$ при різних значеннях T_o та T_n

Таблиця 3.2 – Деякі непокращувані рішення задачі двухкрітеріальної оптимізації (3.23)

Позначення точки на паретовій межі, $B_{T_o;T_n}$	$E(EAC_{on}^{\infty}(T_o, T_n, \omega))$	$\sigma(EAC_{on}^{\infty}(T_o, T_n, \omega))$
$B_{3;4}$	135,69	2,59
$B_{3,5;3}$	142,98	2,25
$B_{3,5;3,5}$	138,14	2,44
$B_{4;4,5}$	130,62	2,81
$B_{4,5;5,5}$	126,19	3,11
$B_{5;6,5}$	123,61	3,37
$B_{7;7,5}$	120,82	3,86
$B_{7,5;8}$	120,40	4,03
$B_{8,5;8}$	119,90	4,26
$B_{9;8}$	119,74	4,39
$B_{9,5;8}$	119,64	4,54
$B_{10;8}$	119,60	4,67

Очевидно, що точки, які не потрапили на паретову межу, не становлять практичного інтересу. Для пошуку оптимальних тривалостей життєвих циклів проектів придбання та використання обладнання доцільно розглядати тільки непокращувані рішення задач (3.22), (3.23).

Форма поверхонь $\sigma(EAC_{on}(T_o, T_n, \omega))$ і $\sigma(EAC^{\infty}_{on}(T_o, T_n, \omega))$ пояснюється впливом ряду факторів. Порівнюючи рис. 3.10 і 3.11, можна помітити, що значення середньоквадратичних відхилень для показника $EAC_{on}(T_o, T_n, \omega)$ більше, ніж для $EAC^{\infty}_{on}(T_o, T_n, \omega)$. І особливо сильно ця відмінність виявляється у випадках, коли T_n значно перевищує T_o. Це пояснюється ефектом накладення і взаємної компенсації випадкових різноспрямованих коливань незалежних випадкових величин, що складають нескінченну суму при оцінці $\sigma(EAC^{\infty}_{on}(T_o, T_n, \omega))$. Таким чином, показники ланцюжка послідовно виконаних проектів на тривалому горизонті планування виявляються більш стійкими. Також слід мати на увазі, що рівень коливань поточних витрат проектів, що стоять першими в цьому ланцюжку, мають більший вплив на значення показників $\sigma(EAC_{on}(T_o, T_n, \omega))$ та $\sigma(EAC^{\infty}_{on}(T_o, T_n, \omega))$ через дисконтування.

Зіставляючи паретові межі, що представлені на рис. 3.12, 3.13 і в табл. 3.1, 3.2, стає очевидним, що непокращуваним рішенням задачі багатокритеріальної оптимізації (3.22) відповідають довші терміни використання обладнання, ніж ті терміни, які відповідають непокращуваним рішенням задачі (3.23).

Дослідження показали, що мінімальне значення $E(EAC_{on}(T_o, T_n, \omega))$ дорівнює 121,29 тис. дол. і досягається в разі, коли строки експлуатації обладнання старого і нового типу відповідно дорівнюють 11 і 9 років. При цьому значення $\sigma(EAC_{on}(T_o, T_n, \omega))$ складе 5,72 тис. дол. На рис. 3.12 цьому рішенню відповідає точка $A_{11;9}$. Порівняємо точки $A_{11;9}$ та $A_{9;8,5}$ на рис. 3.12. Як видно, скоротивши терміни служби старого і нового обладнання до 9 і 8,5 років відповідно, можна помітно зменшити значення $\sigma(EAC_{on}(T_o, T_n, \omega))$, при цьому незначно погіршуючи $E(EAC_{on}(T_o, T_n, \omega))$. Аналогічний ефект можна спостерігати на рис. 3.11, аналізуючи паретову межу рішень задачі (3.23).

Так як $T_o^{***} < T_o^{**} < T_o^{*}$ і $T_n^{**} > T_n^{***} = T_n^{*}$, то слід уточнити, в яких ситуаціях доцільно використовувати кожне з цих значень. Значення T_o^{*} та T_n^{*} визначають оптимальний час заміни обладнання, обумовлене тільки його фізичним зносом. Оптимальний час заміни обладнання з урахуванням як фізичного, так і морального зносу, визначається значеннями T_o^{**}, T_n^{**}, T_o^{***} та T_n^{***}. При цьому, в разі, якщо не стоїть питання врахування ризиків, то вибір значень T_o^{***} та T_n^{***} в якості оптимальних термінів служби обладнання можна вважати найбільш обґрунтованим, оскільки при цьому враховується максимальний горизонт планування. Однак, на максимальному горизонті планування оцінки коливань показників ефективності проектів придбання та використання обладнання можуть бути розмитими і відчутно заниженими. Тому при вивченні стійкості показників ефективності таких проектів в ряді випадків може виявитися більш доцільним розгляд горизонту планування, що складається з двох проектних циклів.

3.3. Визначення термінів заміни обладнання з урахуванням зносу і змін його ринкової вартості

В даний час ряд українських підприємств, і в тому числі багато підприємств транспортної галузі, потребують модернізації обладнання. Тому велику актуальність мають питання розвитку теоретичних методів, що дозволяють ефективно досліджувати практичні задачі, що пов'язані з обґрунтуванням оптимальних термінів реалізації проектів інноваційного розвитку об’єктів транспортної інфраструктури. Вивченню цих питань присвячений ряд робіт різних авторів. Дослідження в цьому напрямку продовжують активно розвиватися. В роботі [13, с.156–168] для знаходження оптимальних термінів заміни обладнання використовується метод динамічного програмування. У статтях [131, 293, 315] досліджено задачі

визначення оптимальних термінів ремонтів складного портового обладнання. Питання прискореного визначення межі витривалості деталей машин і елементів конструкцій, а також питання оперативної оцінки довговічності нових і відновлених деталей вивчені в роботах [84, 85]. Проблеми оптимізації системи технічного обслуговування і ремонту засобів механізації досліджені в [169]. Питання сталого функціонування транспортних систем в умовах нерівномірного вантажопотоку і обґрунтування вибору структури парку обладнання вивчені в публікаціях [271, 298]. В [315] вивчена задача визначення оптимальних термінів служби обладнання з урахуванням можливості його реставрації. Оптимізації резерву парку портових перевантажувальних машин і визначенню залишкового ресурсу обладнання присвячені роботи [162, 163]. У роботах [102, 294, 323] досліджені оптимальні терміни заміни устаткування в умовах невизначеності. В роботі [119] використані багатокритеріальні оцінки для зменшення ризиків при плануванні ремонтів і замін складного портового обладнання, яке функціонує в умовах неповністю передбачуваного вантажопотоку. У статті [293] обґрунтовано терміни переходу на обладнання нового типу з урахуванням фізичного та морального зносу, проте не були враховані зміни ринкової вартості обладнання.

Метою даного підрозділу є розробка методу обґрунтування оптимальної тривалості проектів придбання та використання обладнання з урахуванням фізичного і морального зносу, а також з урахуванням змін його ринкової вартості.

Будемо враховувати не тільки те, що ринкова вартість обладнання залежить від його віку T, але і те, що навіть для однотипного обладнання одного і того ж віку T його ринкова вартість в різні моменти часу t може відрізнятися. Позначимо через $A_o(T,t)$ вартість обладнання старого типу, що було у використанні протягом T років, в момент часу t, дол., а через $A_n(T,t)$ – вартість обладнання нового типу, що було у використанні протягом T років,

в момент часу t, дол. Будемо вважати, що інтенсивність операційних витрат, а також вартість монтажу і демонтажу обладнання залежать тільки від поточного віку обладнання. Нехай $c_o(T)$ – середня інтенсивність операційних витрат обладнання старого типу після його експлуатації протягом T років, дол./рік, а $c_n(T)$ – середня інтенсивність операційних витрат обладнання нового типу, яке використовувалося протягом T років, дол./рік. Для позначення вартості монтажу і демонтажу будемо використовувати такі позначення:

$S_{o,m}$ – вартість монтажу та супутні витрати для обладнання старого типу, дол.;

$S_{n,m}$ – вартість монтажу та супутні витрати для обладнання нового типу, дол.;

$S_{o,d}$ – вартість демонтажу та супутні витрати для обладнання старого типу, дол.;

$S_{n,d}$ – вартість демонтажу та супутні витрати для обладнання нового типу, дол.

Позначимо r – річну ставку відсотка при неперервному нарощенні. Тоді сучасна вартість капітальних витрат, приведених до моменту часу t_1, для обладнання старого типу, що вже було у використанні протягом T років, при його використанні від моменту часу t_1 до моменту часу t_2 знаходиться за формулою

$$PV(C_{o,cap}(T,t_1,t_2)) = A_o(T,t_1) + S_{o,m} -$$
$$- A_o(T+t_2-t_1,t_2)\cdot e^{-r\cdot(t_2-t_1)} + S_{o,d}\cdot e^{-r\cdot(t_2-t_1)}. \quad (3.25)$$

Сучасна вартість операційних витрат, приведених до моменту часу t_1, для обладнання старого типу, що вже було у використанні протягом T років, при його використанні від моменту часу t_1 до моменту часу t_2 дорівнює

$$PV(C_{o,oper}(T,t_1,t_2)) = \int_0^{t_2-t_1} c_o(\tau+T)\cdot e^{-r\cdot\tau}\,d\tau. \quad (3.26)$$

Отже, сучасна вартість загальних витрат проекту, приведених до моменту часу t_1, для обладнання старого типу, що вже було у використанні

протягом T років, при його використанні від моменту часу t_1 до моменту часу t_2 дорівнює [107]

$$PV(C_{o,total}(T,t_1,t_2)) = PV(C_{o,cap}(T,t_1,t_2)) + PV(C_{o,oper}(T,t_1,t_2)) =$$

$$= A_o(T,t_1) + S_{o,m} - A_o(T+t_2-t_1,t_2)\cdot e^{-r\cdot(t_2-t_1)} +$$

$$+ S_{o,d}\cdot e^{-r\cdot(t_2-t_1)} + \int_0^{t_2-t_1} c_o(\tau+T)\cdot e^{-r\cdot\tau}d\tau\,. \qquad (3.27)$$

Для порівняння ефективності роботи обладнання на часових інтервалах різної довжини використовуємо показник EAC. Значення EAC для обладнання старого типу, що вже було у використанні протягом T років, при його використанні від моменту часу t_1 до моменту часу t_2 знаходиться за формулою

$$EAC_o(T,t_1,t_2) = PV(C_{o,total}(T,t_1,t_2))\cdot\frac{e^r-1}{1-e^{-r\cdot(t_2-t_1)}}. \qquad (3.28)$$

Аналогічно, значення EAC для проекту використання обладнання нового типу, що вже було у використанні протягом T років, при його використанні від моменту часу t_1 до моменту часу t_2 дорівнює

$$EAC_n(T,t_1,t_2) = PV(C_{n,total}(T,t_1,t_2))\cdot\frac{e^r-1}{1-e^{-r\cdot(t_2-t_1)}}, \qquad (3.29)$$

де

$$PV(C_{n,total}(T,t_1,t_2)) =$$

$$= A_n(T,t_1) + S_{n,m} - A_n(T+t_2-t_1,t_2)\cdot e^{-r\cdot(t_2-t_1)} +$$

$$+ S_{n,d}\cdot e^{-r\cdot(t_2-t_1)} + \int_0^{t_2-t_1} c_n(\tau+T)\cdot e^{-r\cdot\tau}d\tau\,. \qquad (3.30)$$

Нульовою точкою відліку часу може бути обрано будь-який фіксований момент часу. Функції змінення вартості обладнання в залежності від його віку можуть бути отримані на підставі регресійного аналізу наявних даних та експертних оцінок. Розглянемо проекти придбання та використання портових контейнерних перевантажувачів старого і нового типу, для яких функції змінення вартості відповідно дорівнюють

$A_o(T,t) = 240 \cdot (1 - 0{,}01 \cdot T^{0{,}69}) \cdot (1 - 0{,}81 \cdot T^{0{,}06})$, тис. дол., та $A_n(T,t) = 195 \cdot (1 - 0{,}06 \cdot T^{0{,}48}) \cdot (1 - 0{,}63 \cdot T^{0{,}16})$, тис. дол. Середня динаміка операційних витрат описується за допомогою функцій $c_o(t) = 75{,}07 + 0{,}21 \cdot t^{2{,}11}$, тис. дол./рік, та $c_n(t) = 60{,}52 + 0{,}22 \cdot t^{2{,}52}$, тис. дол./рік, отриманих за допомогою регресійного аналізу за фактичними даними використання обладнання. Витрати, що пов'язані з транспортуванням, монтажем і введенням в експлуатацію, а також з демонтажем і виведенням з експлуатації для обладнання старого і нового типу відповідно дорівнюють $S_{o,m} = 19{,}1$ тис. дол., $S_{o,d} = 12{,}8$ тис. дол., $S_{n,m} = 9{,}5$ тис. дол. і $S_{n,d} = 3{,}5$ тис. дол. Річна процентна ставка, яка наведена в частках, прийнята рівною $r = 0{,}10$.

На рис. 3.14 представлені графіки змінення $EAC_o(0,0,t_2)$ та $EAC_n(0,0,t_2)$, що показують динаміку змінення значень EAC проектів в залежності від часу закінчення терміну служби t_2 для обладнання старого і нового типу за умови, що це обладнання було придбано в момент часу $t_1 = 0$ і до цього не використовувалося ($T = 0$). При цьому мінімальні значення EAC для обладнання старого і нового типу досягаються при $t_2^{o*} = 12{,}73$ та $t_2^{n*} = 7{,}91$ і відповідно дорівнюють $EAC_o(0,0,t_2^{o*}) = 127{,}40$ та $EAC_n(0,0,t_2^{o*}) = 111{,}07$. Всі чисельні розрахунки за формулами (3.25)–(3.30), що необхідні для побудови графіків і знаходження оптимальних значень, були реалізовані в середовищі математичних обчислень Maple [107].

Розглянемо динаміку змінення показників EAC для проектів використання обладнання старого і нового типу за умови, що придбані машини раніше вже були в експлуатації.

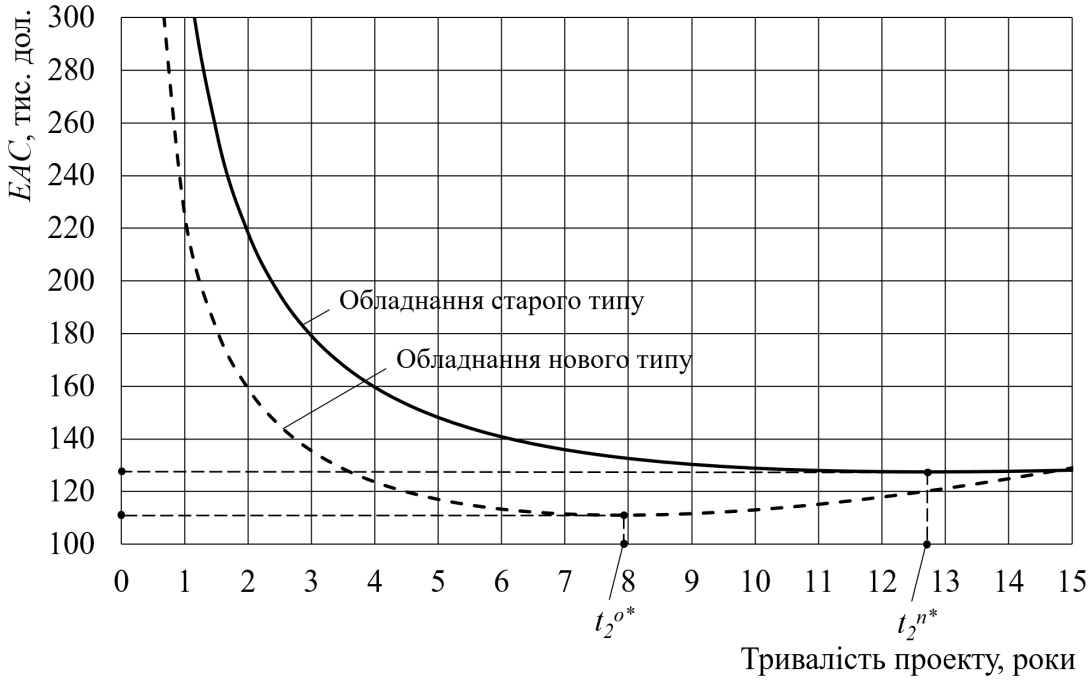


Рисунок 3.14 – Графіки змінення EAC для обладнання старого і нового типу в залежності від тривалості проекту використання

На рис. 3.15, 3.16, а також в табл. 3.3, 3.4 [107] представлені результати обчислень EAC при різних віках придбаного обладнання T і різних значеннях часу закінчення терміну служби обладнання t_2. При цьому передбачається, що час початку використання обладнання $t_1 = 0$.

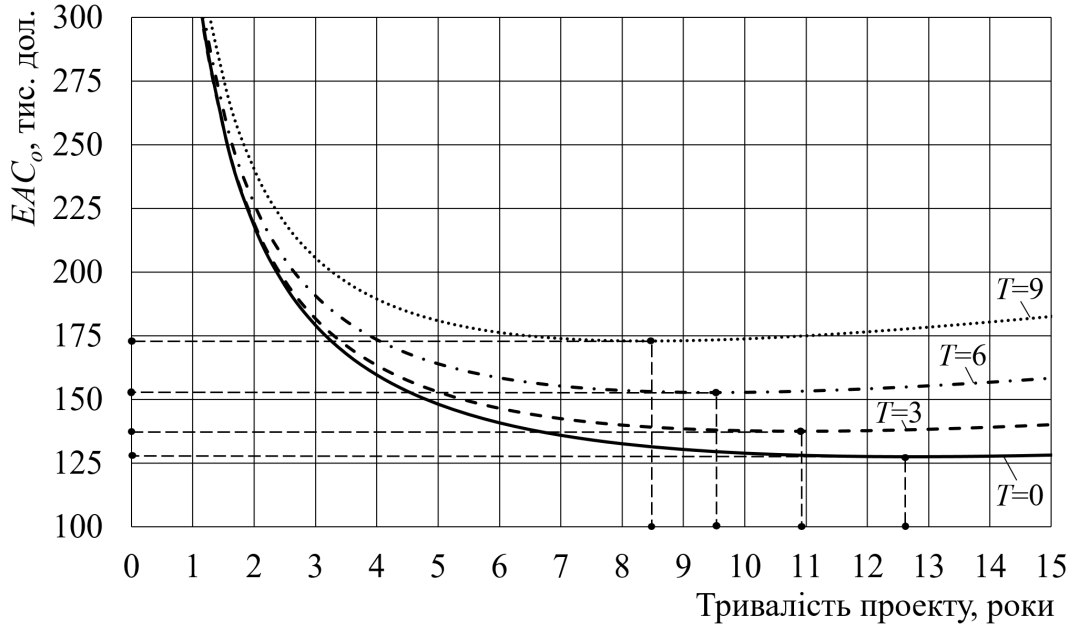


Рисунок 3.15 – Графіки змінення EAC для обладнання старого типу в залежності від його віку в момент придбання і тривалості експлуатації

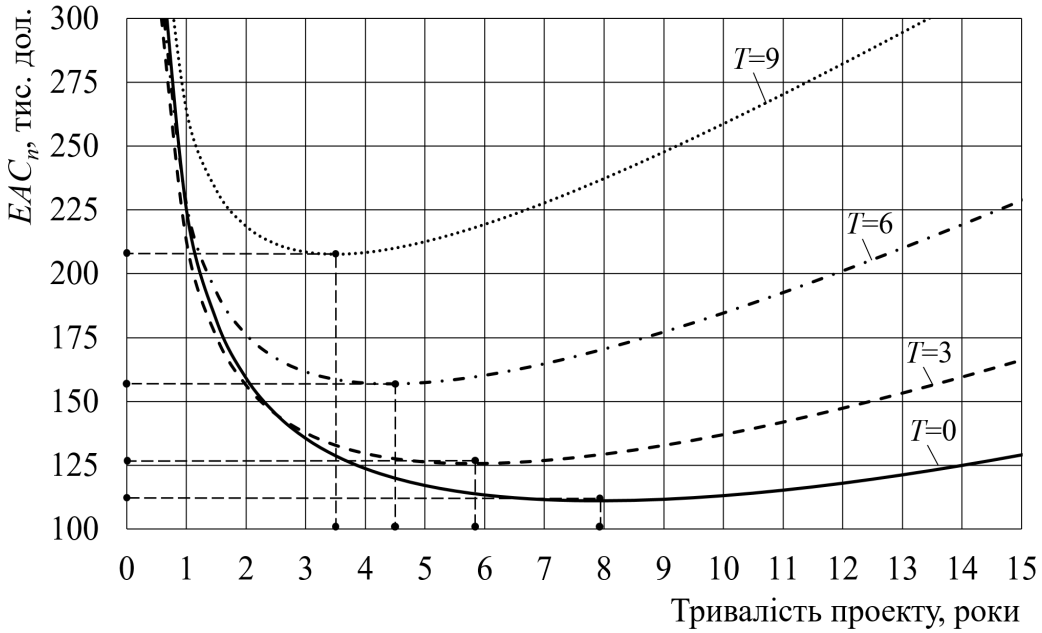


Рисунок 3.16 – Графіки змінення EAC для обладнання нового типу в залежності від його віку в момент придбання і тривалості експлуатації

Дослідимо оптимальні терміни служби при переході від обладнання старого типу на обладнання нового типу, яке можна порівняти за продуктивністю зі старим, а також вивчимо питання доцільності придбання вживаного обладнання та його оптимальний вік в момент придбання.

Таблиця 3.3 – Значення $EAC_o(T,0,t_2)$ для обладнання старого типу в залежності від його віку в момент придбання і часу закінчення терміну служби

Вік обладнання в момент його придбання (T), років	Час закінчення терміну служби обладнання (t_2), років							
	1	3	5	7	9	11	13	15
0	333,03	179,09	148,07	135,82	130,25	127,91	127,41	128,05
3	331,14	181,79	152,96	142,48	138,47	137,53	138,31	140,12
6	336,58	190,72	163,93	155,19	152,73	153,21	155,29	158,28
9	348,17	205,63	180,89	173,90	173,03	174,97	178,37	182,56

У табл. 3.5 представлено значення t_2^{o*}, що є рішенням задачі оптимізації

$$EAC_o(T,0,t_2) \xrightarrow[t_2]{} \min, \tag{3.31}$$

а також значення t_2^{o*}, що є рішенням задачі оптимізації

$$EAC_n(T,0,t_2) \xrightarrow[t_2]{} \min \tag{3.32}$$

при $t_1 = 0$ і різних фіксованих значеннях T.

Таблиця 3.4 – Значення $EAC_n(T,0,t_2)$ для обладнання нового типу в залежності від його віку в момент придбання і часу закінчення терміну служби

Вік обладнання в момент його придбання (T), років	Час закінчення терміну служби обладнання (t_2), років							
	1	3	5	7	9	11	13	15
0	225,40	135,54	117,07	111,54	111,65	115,21	121,21	129,03
3	212,99	137,65	126,28	126,84	132,73	141,85	153,20	166,14
6	227,35	161,51	157,30	164,64	177,09	192,53	209,94	228,64
9	264,25	208,56	212,60	227,76	247,68	270,28	294,47	319,56

Таблиця 3.5 – Оптимальні значення часу закінчення терміну служби і відповідні їм значення EAC для проектів придбання та використання обладнання старого і нового типу в залежності від віку машин

Вік обладнання в момент його придбання (T), роки	Оптимальні значення для обладнання старого типу		Оптимальні значення для обладнання нового типу	
	Час закінчення терміну служби (t_2^{o*}), роки	Значення $EAC_o(T,0,t_2^{o*})$, тис. дол.	Час закінчення терміну служби (t_2^{n*}), роки	Значення $EAC_n(T,0,t_2^{n*})$, тис. дол.
0	12,73	127,40	7,91	111,07
3	10,91	137,53	5,79	125,63
6	9,52	152,64	4,42	156,77
9	8,43	172,91	3,50	207,70

Припустимо, що протягом першого проектного циклу, що триває від моменту часу t_1 до моменту часу t_2, планується використовувати обладнання старого типу. При цьому передбачається, що в момент часу t_1 це обладнання вже було у вжитку протягом T_1 років. Потім протягом другого проектного циклу, що триває від моменту часу t_2 до моменту часу t_3, планується використовувати обладнання нового типу. При цьому допускається, що купується обладнання нового типу, яке раніше вже було у вжитку, і його вік в момент часу t_1 становив T_2 років. В такому випадку сучасна вартість

загальних витрат протягом цих двох проектних циклів знаходиться за формулою

$$EAC_{on}(T_1,T_2,t_1,t_2,t_3) =$$

$$= \left[PV(C_{o,total}(T_1,t_1,t_2)) + PV(C_{n,total}(T_2,t_2,t_3))\cdot e^{-r\cdot(t_2-t_1)}\right]\cdot\frac{e^r-1}{1-e^{-r\cdot(t_3-t_1)}}. \quad (3.33)$$

Отже, значення EAC для двох повних проектних циклів використання обладнання старого і нового типу залежить від віку придбаного обладнання T_1 і T_2, а також від вибору моментів часу початку і закінчення проектів використання цього обладнання t_1, t_2 і t_3.

Припустимо, що обладнання старого типу вже знаходиться в експлуатації, починаючи з моменту часу $t_1 = t_1^0$. Таким чином, задача обґрунтування вибору часу переходу на обладнання нового типу зводиться до задачі знаходження таких T_2, t_2 і t_3, при яких вираз (3.33) досягає мінімуму за умови, що значення $T_1 = T_1^0$ і $t_1 = t_1^0$ фіксовані:

$$EAC_{on}(T_1^0,T_2,t_1^0,t_2,t_3) \xrightarrow[T_2,t_2,t_3]{} \min. \quad (3.34)$$

Покладемо $t_1 = t_1^0 = 0$ і розглянемо ситуацію, коли обладнання старого типу, придбане в момент часу t_1^0, раніше не використовувалося (тобто $T_1^0 = 0$), а також ситуації, коли це обладнання до моменту часу t_1 вже було в експлуатації протягом $T_1^0 = 3$, $T_1^0 = 6$ або $T_1^0 = 9$ років. Для розв'язання задачі оптимізації (3.35) використано чисельні методи, що реалізовані в середовищі Maple. Результати обчислень представлені в табл. 3.6.

Як видно з табл. 3.6, оптимальний час переходу на обладнання нового типу t_2^{**}, а також його оптимальний вік T_2^{**} в момент його придбання і дата закінчення використання t_3^{**} істотно залежать від стану того обладнання старого типу, на зміну якому воно приходить. Розрахунки показали, що для всіх розглянутих випадків оптимальний вік обладнання нового типу в момент його придбання $T_2^{**} = 0$. На рис. 3.17 представлені графіки змінення значень

EAC при переході від обладнання старого типу до обладнання нового типу. Суцільною лінією представлена крива змінення значень EAC для обладнання старого типу, а пунктирною – крива значень EAC проекту для обладнання нового типу.

Таблиця 3.6 – Оптимальний вік обладнання нового типу в момент його придбання і дати початку і закінчення його використання при переході від обладнання старого типу до обладнання нового типу

Вік обладнання старого типу в момент часу t_1^0, (T_1^0), роки	T_2^{**}	t_2^{**}	t_3^{**}	Термін служби старого обладнання, $t_2^{**} - t_1^0$, роки	Термін служби нового обладнання, $t_3^{**} - t_1^0$, роки	$EAC_{on}(T_1^0, T_2^{**}, t_1^0, t_2^{**}, t_3^{**})$ тис. дол.
0	0,00	7,96	16,47	7,96	8,50	116,11
3	0,00	5,50	14,21	5,50	8,72	120,06
5	0,00	3,20	12,18	3,20	8,98	124,94
7	0,00	1,25	10,41	1,25	9,17	128,83

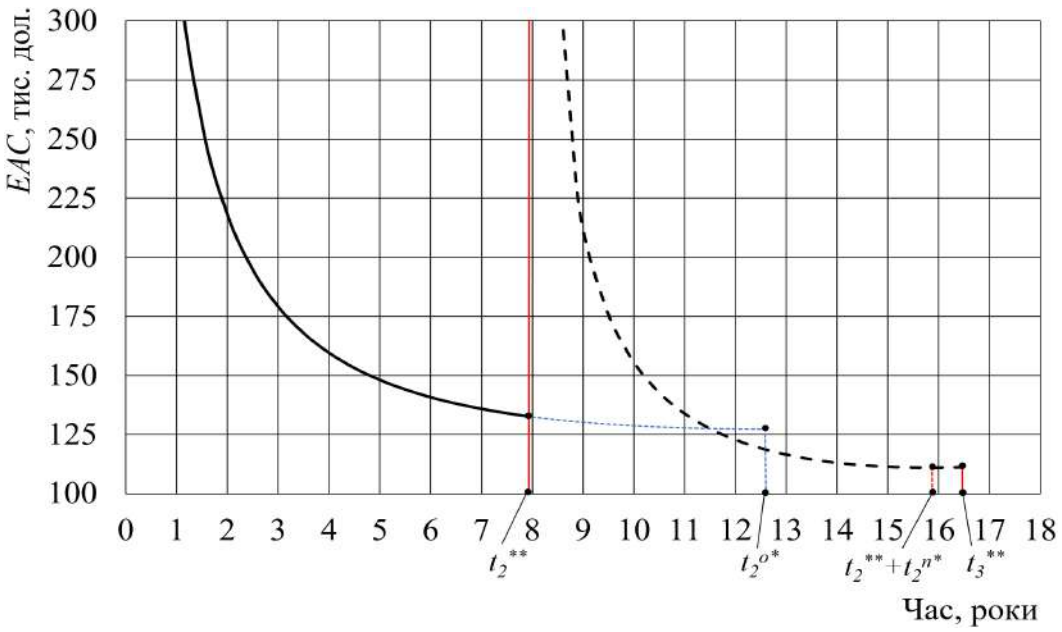


Рисунок 3.17 – Графіки змінення EAC проектів при переході від обладнання старого типу до обладнання нового типу

З рис. 3.17 видно, що значення t_2^{o*} істотно перевищує значення t_2^{**}, а t_3^{**} перевищує $t_2^{**} + t_2^{n*}$. Зіставляючи значення в табл. 3 і 4, можна побачити,

що при покупці нового обладнання ($T_1^0 = 0$) старого типу його оптимальний термін служби за умови заміни на обладнання такого ж типу становить 12,76 років, але якщо це обладнання планується замінити на обладнання нового типу, то оптимальна тривалість проекту придбання та використання старого обладнання скорочується до 7,96 років.

3.4. Оцінка коливань показників ефективності проектів інноваційного розвитку транспортної інфраструктури, що функціонує в умовах мінливого зовнішнього оточення

При виборі оптимальної стратегії управління замінами складного портового обладнання необхідно брати до уваги те, що, як правило, таке обладнання має тривалий термін служби, протягом якого можуть відбуватися істотні коливання рівня завантаження. Тому при плануванні термінів замін складного портового обладнання необхідно враховувати не тільки середні очікувані показники ефективності його функціонування, а й оцінювати рівень стійкості цих показників до можливих коливань значень зовнішніх факторів. Є ряд публікацій, що присвячені вивченню цих питань. Так, в роботах [86, 190] розглянуто моделі старіння обладнання, що функціонує в умовах постійного завантаження. Моделі управління функціонуванням технічних систем, в тому числі імовірнісні моделі управління відтворенням и управлінням надійністю транспортного обладнання, були запропоновані в [87, 215, 220]. Задача оптимального управління транспортними системами, що працюють в умовах нерівномірного завантаження, а також задача вибору оптимальних стратегій ремонтів и замін складного портового обладнання були розглянуті в роботах [119, 124, 131, 297, 298]. Втім ряд практично важливих питань все ще залишається дослідженим недостатньо и потребує подальшого вивчення.

Вивчення питань оптимальних термінів замін обладнання часто засновані на використанні складних аналітичних методів теорії динамічних

систем, методів оптимального управління або імітаційного моделювання (див., наприклад, [119, 124, 131]). Ці методи допомагають більш точно описувати процеси старіння обладнання. Подібні дослідження відіграють важливу роль у розвитку теорії, однак, далеко не завжди вони можуть бути легко реалізовані на практиці для проведення поточних інженерних розрахунків. Універсальних методів планування термінів замін обладнання, які враховують всю специфіку роботи обладнання будь-якого типу, не існує. Для кожної конкретної виробничої задачі, як правило, необхідно індивідуально підбирати математичну модель, складати і досліджувати системи диференціальних рівнянь, обґрунтовувати параметри, підбирати чисельні методи дослідження і т.д. Найчастіше використання складних сучасних моделей вимагає високої теоретичної підготовки інженерів, що реалізують ці методи на практиці, наявність спеціального програмного забезпечення та ефективної системи моніторингу за параметрами системи, що вивчається. Всі ці вимоги істотно гальмують впровадження передових досліджень на практиці.

Метою даного підрозділу є обґрунтування методу визначення тривалості життєвого циклу проектів придбання та використання складного обладнання, заснованого на використанні статистичних даних експлуатації аналогічного обладнання за минулі роки, що враховує як середні значення показників ефективності використання обладнання, так і стійкість цих показників до можливих впливів випадкових факторів. При цьому пропонований метод повинен бути не дуже вимогливим до повноти використовуваних статистичних даних і дозволяв би давати задовільні прогнози навіть для випадку малої вибірки або неповних даних.

У багатьох випадках в якості основного показника ефективності проекту використання обладнання природно розглядати середню питому собівартість одиниці напрацювання обладнання, яка може виражати як собівартість години роботи обладнання (дол./год.), так і собівартість виробництва одиниці продукції за допомогою даного обладнання (дол./т , дол./км, і т.п.).

Собівартість одиниці напрацювання обладнання складається з капітальних і поточних витрат. У свою чергу, капітальні витрати включають в себе витрати на придбання та монтаж обладнання, а також можливі витрати на капітальні ремонти. Поточні витрати складаються з витрат на поточні ремонти, технічне обслуговування, енергоносії та мастильні матеріали. З одного боку, чим довше обладнання буде використовуватися, тим менше капітальних витрат припадатиме на одиницю його напрацювання. З іншого боку, якщо обладнання буде використовуватися занадто довго, через фізичний знос поточні витрати можуть істотно вирости і досягти неприпустимо великих значень. Таким чином, необхідно визначити тривалість життєвого циклу проєкту використання обладнання так, щоб досягався баланс між питомими капітальними і поточними витратами.

Позначимо $R_c(t)$ – функцію кумулятивних капітальних витрат проекту, а $R_o(t)$ – функцію кумулятивних поточних витрат проекту, що накопичені за t років від моменту його початку. Тоді загальні сумарні витрати проекту за час t дорівнюють

$$R(t) = R_c(t) + R_o(t). \tag{3.35}$$

Розглянемо питомі витрати, які будуть припадати на одиницю напрацювання обладнання, якщо обладнання буде працювати протягом t років. Розглянемо функцію питомих капітальних витрат $r_c(t)$, функцію питомих поточних витрат $r_o(t)$ і функцію загальних питомих витрат $r(t)$, які визначаються відповідно за формулами

$$r_c(t) = \frac{R_c(t)}{t}, \quad r_o(t) = \frac{R_o(t)}{t}, \quad r(t) = r_c(t) + r_o(t). \tag{3.36}$$

На рис. 3.18 представлена типова динаміка змінення значень питомих витрат. На всіх графіках, що наведені в цьому підрозділі, по осі абсцис представлено час в роках, а по осі ординат – витрати, що вимірюються або в тис. дол, або в тис.дол./рік в залежності від контексту [153].

Оскільки складне обладнання, як правило, розраховане на довгострокове використання, то при аналізі фінансових потоків, що пов'язані з проектом використання цього обладнання, необхідно використовувати дисконтування.

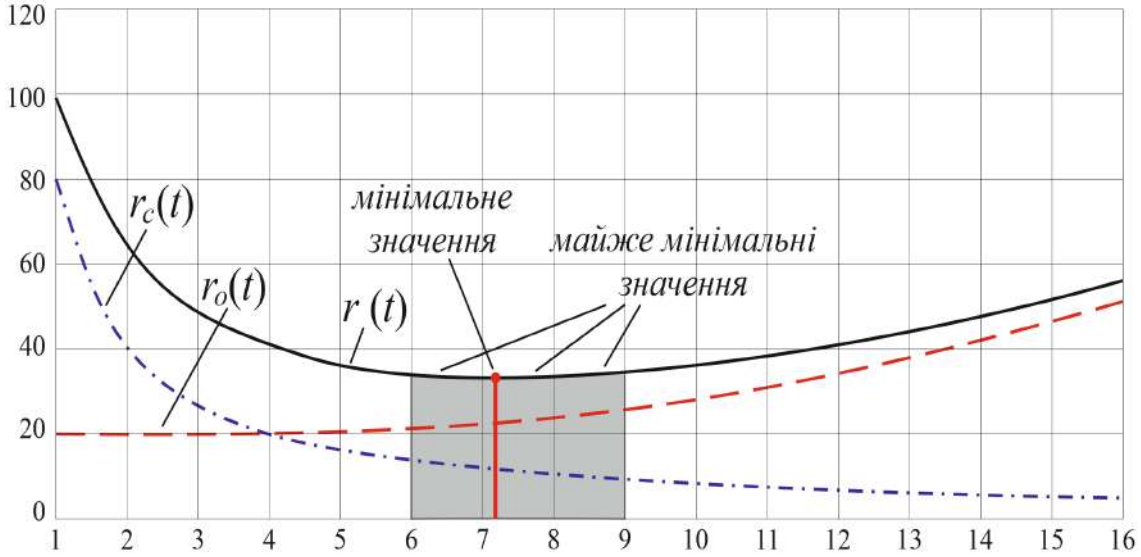


Рисунок 3.18 – Криві змінення питомих витрат без дисконтування

З рис. 3.18 видно, що проект використання обладнання доцільно завершити через 7 років, коли значення питомих витрат буде мінімальним.

Припускаючи, що функція питомих поточних витрат неперервно диференційована, можна знайти сучасне значення поточних витрат за будь-який проміжок часу:

$$r_o^d(t) = \frac{1}{t}\int_0^t R_o'(t)\cdot e^{-\frac{\delta\tau}{100}} d\tau, \qquad (3.37)$$

де $r_o^d(t)$ – середні поточні питомі витрати за перші t років реалізації проекту використання обладнання з урахуванням дисконтування,

$R_o'(t)$ – похідна функції $R_o(t)$, яка показує інтенсивність поточних витрат в кожен момент часу t,

δ – річна процентна ставка при неперервному нарахуванні відсотків.

Аналогічно можна провести дисконтування для будь-якої кумулятивної функції витрат і функції середніх поточних питомих витрат. На рис. 3.19 представлена крива питомих капітальних витрат $r_c^d(t)$, крива питомих операційних витрат $r_o^d(t)$, а також крива загальних питомих витрат $r^d(t)$ з

урахуванням дисконтування. Як можна бачити, після дисконтування швидкість росту загальних питомих витрат помітно зменшилася, а точка мінімуму змістилася вправо майже на 2 роки і склала приблизно 9 років. Також слід зазначити, що після дисконтування помітно збільшився діапазон значень, при яких досягаються майже оптимальні значення загальних питомих витрат (див. рис. 3.20).

Для того, щоб визначити найменший рівень загальних питомих витрат і, відповідно, оптимальний термін завершення проекту, досить мати прогноз змінення $r_c^d(t)$ та $r_o^d(t)$. На практиці прогнозування майбутніх значень функції $r_c^d(t)$ не представляє суттєвих проблем, тому що найчастіше капітальні витрати на покупку устаткування вносяться на початковому етапі проекту, розміри капітальних витрат зазвичай відомі заздалегідь і не схильні до будь-яких випадкових коливань. З прогнозуванням значень $r_o^d(t)$, як правило, ситуація значно складніша. По перше, $r_o(t)$ може змінюватися стрибками. Це пов'язано з тим, що, хоча знос устаткування може накопичуватися неперервно, фінансування поточних ремонтів обладнання зазвичай здійснюється дискретно.

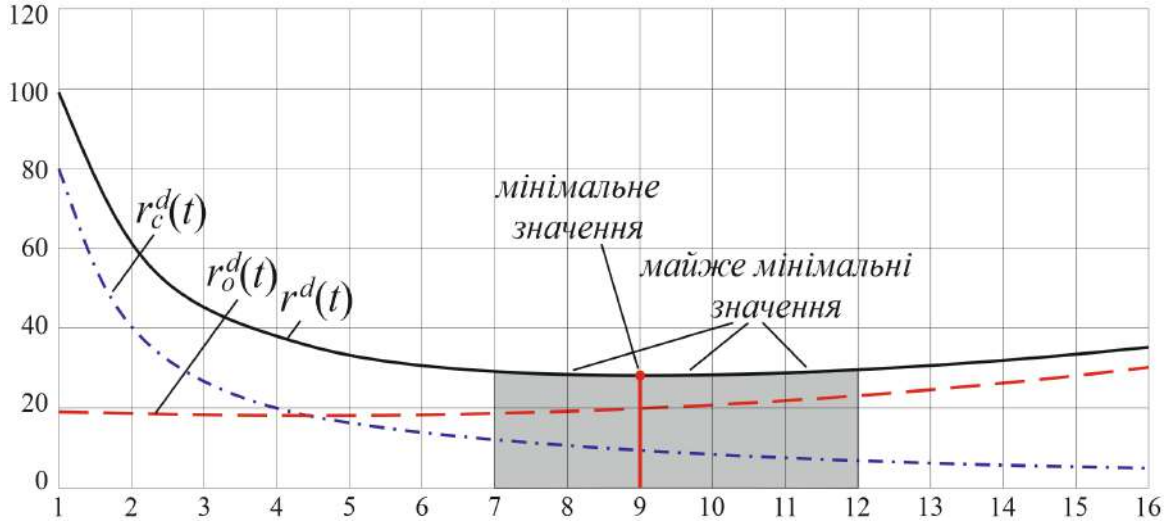


Рисунок 3.19 – Криві змінення питомих витрат з дисконтуванням

По-друге, через різні випадкові чинники точно передбачити майбутні значення функцій $R_o(t)$ та $r_o^d(t)$, як правило, неможливо. Так, маючи дві

однакові машини і використовуючи їх в ідентичних умовах, для них можна мати абсолютно різні криві поточних витрат. Тому, кажучи про планування майбутніх значень поточних витрат, коректніше говорити не про точні значення, а про їх закони розподілів в кожен момент часу *t*. Маючи достатню базу статистичних спостережень за поточними витратами машин даного типу, на практиці не представляє складності оцінити ці закони розподілів. На рис. 3.20 суцільними ламаними лініями представлені типові криві змінення значень $R_o(t)$ для декількох однотипних машин, які отримані в результаті спостережень. Маючи достатню кількість таких спостережень, можна оцінити середні значення $\overline{R}_o(t)$, ступінь розкиду та інші параметри законів розподілу цих значень в кожен момент часу *t*. На рис. 3.21 представлені криві $q_{0,1}^{R_o(t)}(t)$ та $q_{0,9}^{R_o(t)}(t)$, що показують змінення 10% і 90% квантилів розподілів значень $R_o(t)$ в різні моменти часу t, а також зображена діаграма «ящик з вусами», що ілюструє зміну закону розподілу сумарних поточних витрат $R_o(t)$ з плином часу [153].

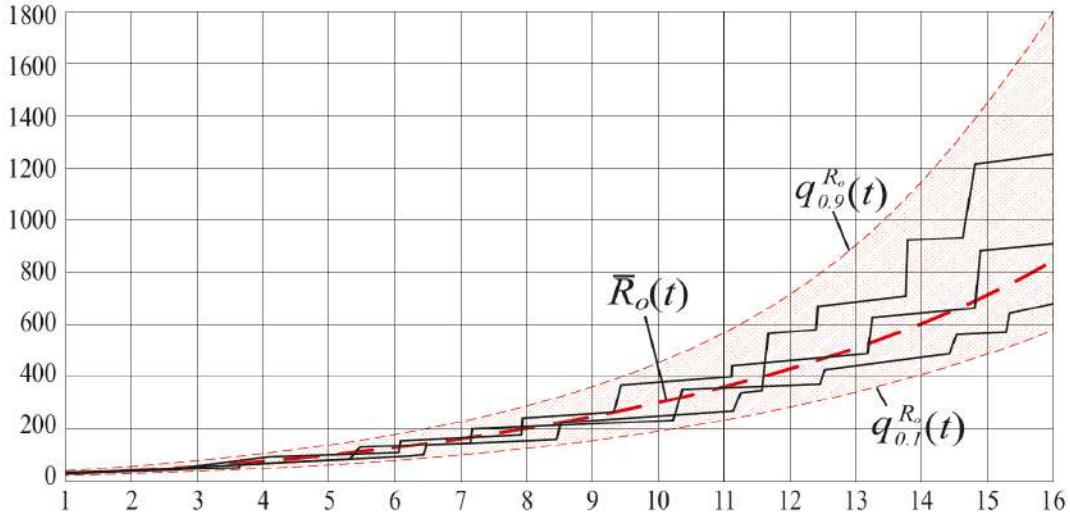


Рисунок 3.20 – Приклади змінення $R_o(t)$ з ростом t для різних машин одного і того ж типу

За допомогою такої діаграми можна простежити, як згодом збільшується розкид можливих значень $R_o(t)$. Це говорить про те, що чим пізніше планується завершувати проект використання обладнання, тим стає складніше

спрогнозувати рівень загальних поточних витрат [102]. Також з діаграми «ящик з вусами» можна помітити, що розподіл значень $R_o(t)$ має спочатку симетричну форму, але з ростом t розподіл стає все більш асиметричним. Це можна пояснити тим, що, як правило, спочатку коливання поточних витрат пояснюються дрібними випадковими поломками, в результаті чого розподіл значень $R_o(t)$ при малих t близький до нормального.

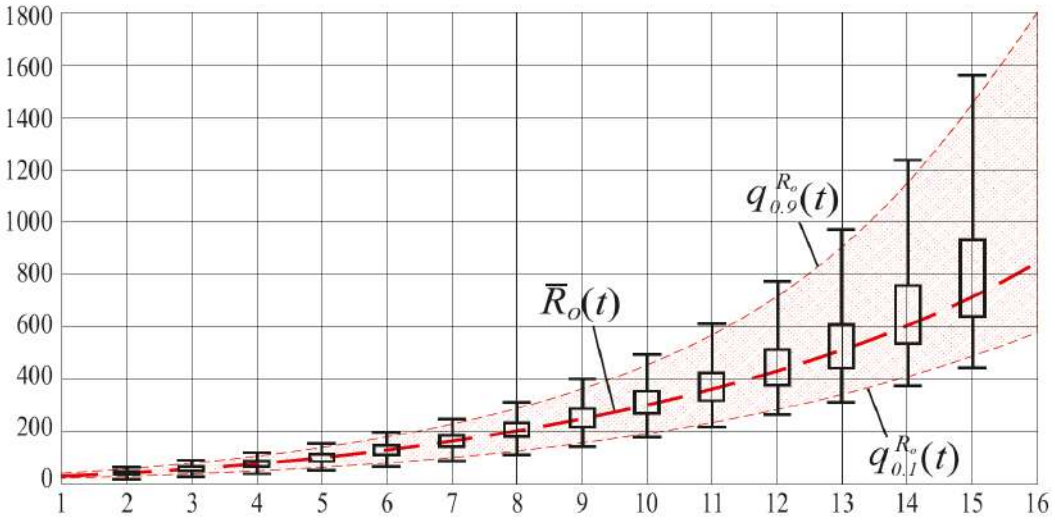


Рисунок 3.21 – Діаграма "ящик з вусами", що ілюструє розподіл значень $R_o(t)$ для різних машин при різних фіксованих значеннях t

З плином часу зростає ймовірність нечастих, але сильних негативних викидів значень $R_o(t)$, в результаті чого розподіл значень $R_o(t)$ з часом зазвичай має все більш "товстий хвіст". Використовуючи наявні дані аналізу тенденцій змінення $R_o(t)$, далі можна спрогнозувати тенденції змінення $r_o^d(t)$ та $r^d(t)$, а також рівні їх можливих коливань. На рис. 3.22 представлена крива $\overline{r}_o^d(t) = \frac{1}{t}\overline{R}_o(t)$ разом з відповідними лініями квантилів $q_{0,1}^{r_o^d}(t) = \frac{1}{t}q_{0,1}^{R_o^d}(t)$ та $q_{0,9}^{r_o^d}(t) = \frac{1}{t}q_{0,9}^{R_o^d}(t)$ показують межі, в яких з ймовірністю 80% будуть знаходитися значення $r_o^d(t)$. Також зображено криву $\overline{r}^d(t) = r_c^d(t) + \overline{r}_o^d(t)$ разом з відповідними лініями квантилів $q_{0,1}^{r^d}(t) = r_c^d(t) + q_{0,1}^{r_o^d}(t)$ та $q_{0,9}^{r^d}(t) = r_c^d(t) + q_{0,9}^{r_o^d}(t)$.

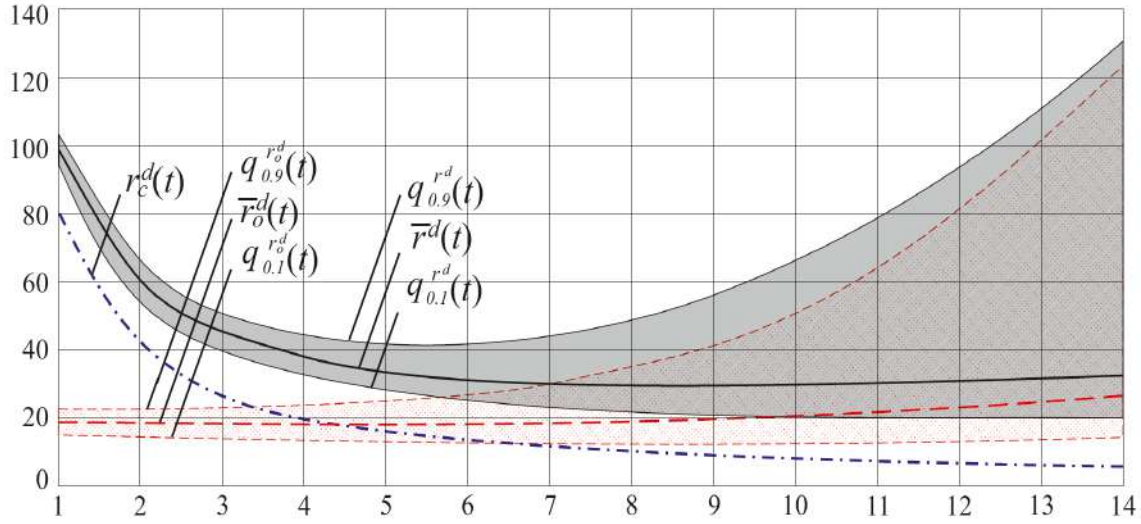


Рисунок 3.22 – Лінії змінення середніх питомих витрат обладнання та їх 10% і 90% квантилі

Лінії квантилів $q_{0,1}^{r^d}(t)$ та $q_{0,9}^{r^d}(t)$ показують межі, в яких з ймовірністю 80% можуть знаходитися майбутні значення $r^d(t)$ (рис. 3.22, 3.23). Також на рис. 3.23 пунктиром представлені криві для квартилів $q_{0,25}^{r^d}(t)$ та $q_{0,75}^{r^d}(t)$.

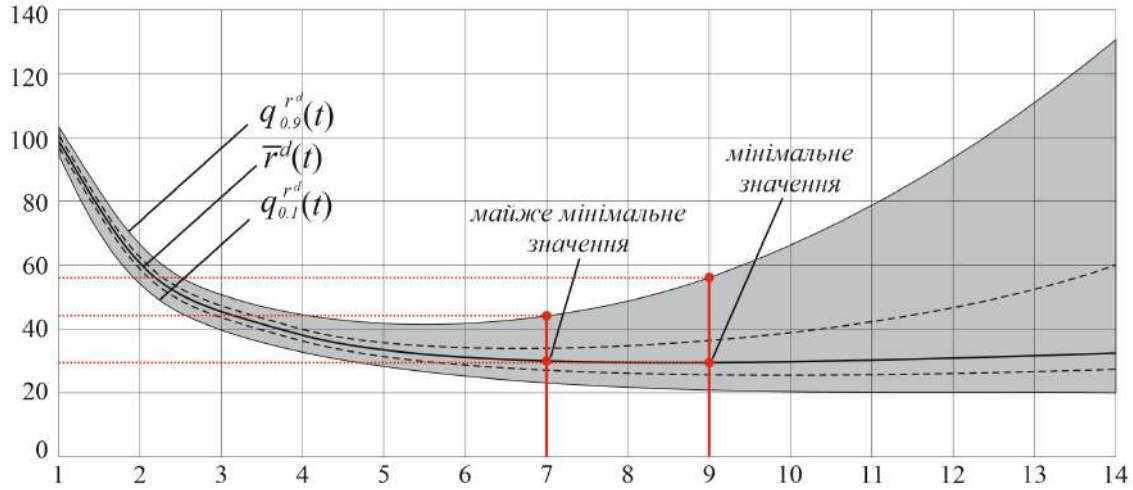


Рисунок 3.23 – Змінення загальних середніх питомих витрат і їх квантилів

З рис. 3.23 видно, що в проміжку часу від 7 до 12 років значення $\overline{r}^d(t)$ майже однакові. Втім на цьому самому проміжку часу спостерігається суттєве зростання функції $q_{0,9}^{r^d}(t)$. Тобто, при практично незмінних середніх очікуваних значеннях питомих витрат спостерігається істотне збільшення невизначеності. Наприклад, якщо планувати заміну обладнання не через 9

років, а через 7 років, то середні питомі витрати практично не зміняться і складуть приблизно 30 тис. дол./рік, але при цьому ступінь невизначеності помітно скоротиться.

Так, при плануванні оновлення обладнання через 9 років середні питомі витрати не перевищать 55 тис. дол./рік з ймовірністю 90%, в той час як при плануванні заміни обладнання через 7 років середні питомі витрати з тією ж ймовірністю не перевищать 45 тис. дол./рік [153].

Чим довшою планується тривалість життєвого циклу проекту використання обладнання, тим, як правило, сильніше зростає невизначеність показників ефективності його використання. Навіть при тому, що середні значення питомих витрат з плином часу можуть змінюватися незначно, в той же час форма закону розподілу може істотно змінюватися. При цьому найчастіше спостерігається збільшення діапазону розкиду можливих значень питомих витрат. При збільшенні тривалості життєвого циклу проекту використання обладнання у розподілі значень питомих витрат часто з'являється "товстий хвіст", який свідчить про збільшення ймовірності небажаних викидів в сторону збільшення витрат.

3.5. Висновки до третього розділу

1. Запропоновано метод оцінки показників ефективності проектів оновлення об’єктів транспортної інфраструктури з урахуванням впровадження нових технологій.

2. Отримано кількісну оцінку стійкості значень показника *EAC* в залежності від вибору тривалості проектів використання обладнання старого і нового типу в умовах, коли динаміка операційних витрат схильна до випадкових коливань. Для цього були використані коваріаційні функції для випадкових процесів, що описують динаміку операційних витрат обладнання старого і нового типу.

3. На підставі отриманої оцінки стійкості показників ефективності проектів використання обладнання запропоновано метод планування термінів заміни обладнання. Цей метод дозволяє обґрунтовувати оптимальні строки замін обладнання старого типу, схильного до фізичного і морального зносу, на обладнання нового типу, беручи до уваги як середні очікувані показники *EAC*, так і рівень можливих коливань *EAC*.

4. Дослідження показали, що за рахунок вибору часу оновлення обладнання можна помітно збільшити ступінь стійкості показника ефективності експлуатації обладнання, незначно пожертвувавши його середнім очікуваним значенням.

5. В результаті дослідження було показано, що при плануванні часу початку інноваційних проектів доцільно скоротити тривалість операційної фази старого об'єкта транспортної інфраструктури в порівнянні з тими термінами, які були б оптимальними без урахування впроваджуваних інновацій.

Основні положення розділу розкриті в публікаціях автора [102, 103, 105, 107, 137, 139, 151, 152, 293, 344].

РОЗДІЛ 4
РОЗРОБКА МЕТОДІВ УПРАВЛІННЯ ПРОЕКТАМИ РОЗВИТКУ ТРАНСПОРТНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ В УМОВАХ МІНЛИВОГО ЗОВНІШНЬОГО ОТОЧЕННЯ

4.1. Вплив рівня зайнятості об’єктів морської транспортної інфраструктури на динаміку показників проектів його будівництва та використання

Для багатьох проектів будівництва та використання об’єктів транспортної інфраструктури значну частину витрат складають витрати на обладнання. Тому великий практичний інтерес представляє розвиток точних кількісних моделей динаміки зносу обладнання, на підставі яких можна було б створювати методи управління проектами розвитку транспортної інфраструктури. Однак це питання є досить складним. На даний момент не існує єдиного наукового підходу до кількісного опису фізичного зносу обладнання. Багато авторів обґрунтовано вважають (див., наприклад, [79]), що знос складного обладнання є більшою мірою не технічним, а техніко-економічним поняттям. Це пов'язано з тим, що для ряду практичних завдань більш змістовним показником динаміки експлуатаційних якостей обладнання є динаміка його потенційної ефективності використання, виражена в грошовому еквіваленті, ніж перерахування його показників надійності відповідно до ДСТ 27.002-89 [161]. Перевага техніко-економічного підходу до дослідження зносу об’єктів транспортної інфраструктури у багатьох випадках обумовлена тим, що основними критеріями в питаннях оптимальної заміни або модернізації найчастіше є не технічні, а саме економічні показники. Однак цей підхід має і свої суттєві труднощі, які пов'язані з тим, що при такому підході знос доводиться визначати, не розглядаючи обладнання ізольовано в статичному положенні, а аналізуючи зміни показників ефективності проектів,

в рамках яких це обладнання використовувалося при непостійних зовнішніх умовах, що є складним завданням.

З часом експлуатаційні характеристики об’єктів транспортної інфраструктури погіршуються. Це може проявлятися в збільшенні поточних витрат, зменшенні надійності або продуктивності, а в деяких випадках використання старого обладнання може навіть стати джерелом зростаючої небезпеки для життя людей і навколишнього середовища. Причинами таких негативних змін можуть бути як активне використання обладнання (так званий знос першого роду [86]), так і руйнівний вплив зовнішніх факторів, що діють незалежно від того, працює обладнання чи ні (знос другого роду). Основними проявами зносу першого роду є стирання деталей, деформація і втома матеріалів. Знос другого роду проявляється в іржавінні, окисленні, руйнуванні під дією атмосферної вологості, перепадів температури, сонячного світла та інших чинників. Навіть при належному технічному обслуговуванні повністю усунути наслідки фізичного зносу неможливо, і з часом подальше використання обладнання стає недоцільним або навіть небезпечним.

В даний час вдалося досягти значних результатів у дослідженні показників роботи транспортних вузлів в умовах невизначеного вантажопотоку [48, 87, 159, 173, 175], і окремо – в дослідженні процесів старіння обладнання, в тому числі портового, його ремонтів і замін [69, 214, 215, 179, 190, 205, 220,]. Кожна з цих задач є складною сама по собі і до кінця не вивчена. Багато авторів відзначають тісний взаємозв'язок між ними, проте економіко-математичні моделі, що дозволяють зв'язати ці дві задачі та подати в комплексному вирішенні, до сих пір досліджені недостатньо. Метою даного підрозділу є аналіз впливу динаміки вантажопотоку на процес фізичного старіння складного портового обладнання в рамках проекту його придбання та використання.

Для подальшого аналізу розглянемо спрощену модель фізичного старіння складного обладнання, в рамках якої будемо враховувати наступні показники:

1) збільшення поточних витрат на одиницю продукції даного обладнання (включаючи збільшення витрат на витратні матеріали, електроенергію, паливно-мастильні матеріали, оплату праці обслуговуючого персоналу, технічне обслуговування, і не включаючи ні прямі, ні непрямі втрати, пов'язані з виникаючими відмовами);

2) інтенсивність некритичних деградаційних відмов (відмов, що тягнуть за собою прямі і непрямі втрати, але не несуть загрози життю людей);

3) інтенсивність критичних деградаційних відмов (відмов, які можуть призвести до неприпустимо великих втрат, становлять загрозу для життя людей або для довкілля).

При вивченні цієї моделі старіння обладнання будемо розглядати комплексний показник зносу $u=(u_1,u_2,u_3)$, компоненти якого u_1, u_2 та u_3 ($u_i \in [0,1]$, $i=1,2,3$) описують відповідно рівень поточних витрат, рівні інтенсивності некритичних і критичних відмов. Причому рівню $u_i=1$ ($i=1,2,3$) відповідає максимально допустиме (з технічних або виробничих нормативів) значення відповідного показника зносу.

Залежно від цілей і умов, в яких реалізується проект, значення кожного з показників u_1, u_2 або u_3 може набувати або втрачати ключове значення. Так, при великому завантаженні і високому рівні штрафів за зрив плану робіт величина параметра u_2 набуває ключового значення, але якщо для даного обладнання можливо організувати резерв, то можна істотно послабити вплив цього параметра на економічні показники роботи обладнання або навіть звести його до мінімуму. Якщо технологія використання обладнання виключає можливість загрози для життя людини, то параметри u_2 і u_3 можна об'єднати в один. У деяких випадках можна вважати, що значення u_1, u_2 та u_3 змінюються однаково, проте в загальному випадку жоден з наведених показників не може бути точно виражений через інші.

Для прикладу розглянемо проект придбання та використання портального крана. Основним фактором зносу металоконструкції портального

крана є процес іржавіння під дією атмосферних явищ, інтенсивність якого не залежить від того, чи працює кран або простоює. При цьому технічний стан металоконструкції практично не впливає на значення u_1 та u_2, але є визначальним фактором для значення u_3. У свою чергу, рівень завантаження портального крана значно впливає на технічний стан механізмів і електроустаткування, що значною мірою визначає значення u_1 та u_2, при цьому не маючи істотного впливу на u_3.

Різні види технічного обслуговування і ремонтів можуть зменшити всі або деякі показники зносу обладнання. Наприклад, ремонт або заміна механізмів і електрообладнання портального крана може зменшити u_1 та u_2 аж до їх мінімальних значень, проте u_3 при цьому може не змінитися.

Статистичні дані показують значні коливання коефіцієнта зайнятості портового обладнання [133, 180]. Тому при моделюванні динаміки показників зносу необхідно розрізняти внесок зносів першого і другого роду. Позначимо φ_1 – швидкість росту зносу першого роду, де $\varphi_1 = \varphi_1(t,u,s,\alpha)$ може залежати від моменту часу t, поточного стану зносу обладнання u, коефіцієнта зайнятості $s = s(t)$, $s \in [0,1]$ в даний момент часу і від вектора параметрів $\alpha = (\alpha_1; \alpha_2; ...; \alpha_k)$, що характеризують конструктивні особливості обладнання. Через $\varphi_2 = \varphi_2(t,u,\alpha)$ позначимо швидкість росту зносу другого роду в момент часу t, яка, на відміну від φ_1, не залежить від коефіцієнта зайнятості [123]. Тоді швидкість зміни показника зносу обладнання можна записати як суму впливу зносів першого і другого роду

$$u' = \varphi_1(t,u,s,\alpha) + \varphi_2(t,u,\alpha). \qquad (4.1)$$

Вигляд функцій φ_1 і φ_2 слід обирати, виходячи з фактично спостережуваних даних про функціонування обладнання. Як приклад розглянемо випадок, коли φ_1 і φ_2 мають найбільш просту структуру. Припустимо, що динаміка зносу, що обумовлюється активним використанням цього обладнання, має вигляд

$$\varphi_1 = \alpha_1 \cdot s(t) \cdot u + \alpha_2 \cdot s(t), \tag{4.2}$$

де другий доданок не залежить від стану обладнання і виражає знос, який обумовлений тільки його роботою, а перший доданок, крім того, ще залежить від показника зносу $u = u(t)$ і відображає той факт, що при одній і тій же мірі зайнятості нове і старе обладнання може мати неоднакові темпи старіння [123]. Параметри α_1 і α_2 визначають внесок кожного з цих доданків в швидкість росту зносу першого роду і обумовлюють специфіку динаміки старіння для кожного заданого типу обладнання. Для опису динаміки зносу другого роду можна розглянути функцію з аналогічною структурою

$$\varphi_2 = \alpha_3 \cdot u + \alpha_4. \tag{4.3}$$

Таким чином, диференціальне рівняння (4.1) набуде вигляду

$$u' = (\alpha_1 \cdot s(t) + \alpha_3) \cdot u + \alpha_2 \cdot s(t) + \alpha_4. \tag{4.4}$$

Рішення цього диференціального рівняння можна виразити в явному вигляді:

$$u(t) = e^{\int (\alpha_1 \cdot s(t) + \alpha_3) dt} \left[C + \int (\alpha_2 \cdot s(t) + \alpha_4) \cdot e^{-\int (\alpha_1 \cdot s(t) + \alpha_3) dt} dt \right]. \tag{4.5}$$

На рис. 4.1 наведені криві 1, 2, 3 і 4 змінення показника зносу, що отримані за допомогою даної моделі для коефіцієнта зайнятості, графік якого зображено на рис. 4.2, векторів параметрів $\alpha = (0{,}45;\ 0;\ 0;\ 0)$, $\alpha = (0;\ 0{,}1;\ 0;\ 0)$, $\alpha = (0;\ 0;\ 0{,}2;\ 0)$ і $\alpha = (0;\ 0;\ 0;\ 0{,}04)$ відповідно і початкової умови $u(0) = 0{,}05$. Якщо значення обох параметрів α_1 і α_3 малі в порівнянні зі значеннями α_2 або α_4, то крива показника зносу змінюється майже лінійно (при постійному коефіцієнті зайнятості), в той час як при збільшенні α_1 або α_3 динаміка показника зносу збільшується, проявляючи експоненціальне зростання [121]. Якщо хоча б один з параметрів α_3 або α_4 значно більше, ніж обидва α_1 і α_2, то знос обладнання мало залежить від коефіцієнта зайнятості, а це означає, що обладнання більшою мірою схильне до зносу другого роду. Якщо ж хоча б один з параметрів α_1 і α_2 значно більше, ніж обидва α_3 або α_4, то обладнання більшою мірою схильне до зносу першого роду.

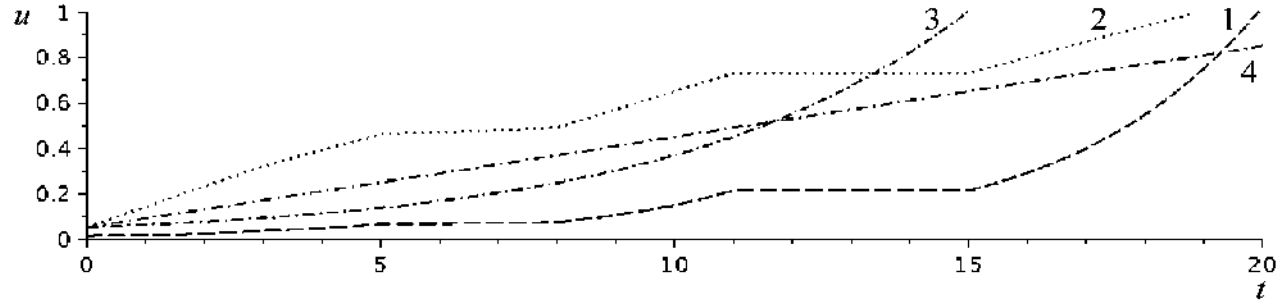


Рисунок 4.1 – Криві змінення показника зносу

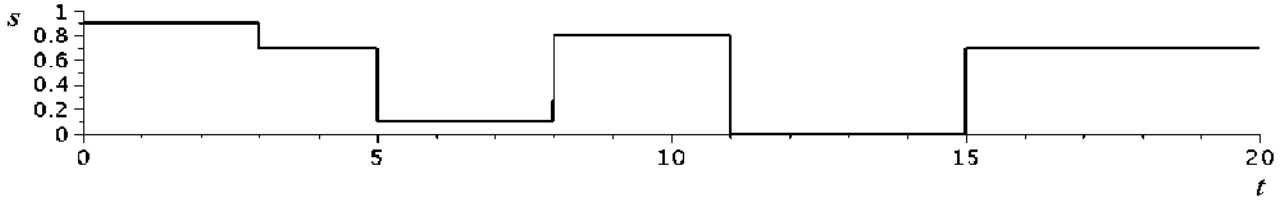


Рисунок 4.2 – Крива змінення коефіцієнта зайнятості

Вибираючи більш складну структуру функцій φ_1 і φ_2, можна добитися значної гнучкості і точності даної моделі. Так, використовуючи сігмоідні функції, які є рішеннями відомих диференціальних рівнянь Ферхюлста або Річардса, можна описувати процес старіння машин, у яких спостерігаються такі три умовні стадії старіння (рис. 4.3):

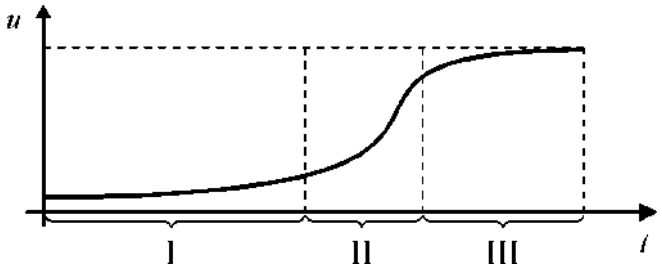


Рисунок 4.3 – Сігмоідна форма кривої змінення зносу обладнання

I стадія – нове обладнання працює справно, показник зносу зростає незначно;

II стадія – обладнання досягає свого нормативного терміну служби, ресурс більшості механізмів вичерпаний, показник зносу різко зростає (як кажуть автомобілісти, машина починає «сипатися»);

III стадія – старе обладнання, його все ще можна експлуатувати, показник зносу після досягнення певного рівня стабілізується і уповільнює своє подальше зростання.

Після вибору підходящого вигляду функцій φ_1 і φ_2 для подальшого практичного використання описаної моделі слід з'ясувати значення параметрів

$\alpha_1, \alpha_2, \ldots, \alpha_k$. Навіть якщо диференціальне рівняння (4.1) не вдасться розв'язати в явному вигляді, вектор параметрів α можна визначити статистичними методами, спираючись на відомі траєкторії показника зносу і коефіцієнта зайнятості для аналогічного обладнання.

Розглянемо проект використання обладнання, для якого зростання інтенсивності критичних деградаційних відмов обумовлено головним чином зносом другого роду, а зростання інтенсивності некритичних деградаційних відмов і збільшення поточних витрат на одиницю продукції в основному є наслідком зносу першого роду. Такі властивості має, наприклад, обладнання, у якого компоненти зносу u_1, u_2 і u_3 описуються рівнянням (4.3) з векторами параметрів $(0{,}2;\ 0;\ 0{,}1;\ 0)$, $(0{,}39;\ 0{,}05;\ 0;\ 0)$ і $(0;\ 0;\ 0{,}1;\ 0{,}02)$ відповідно. Розглянемо залежність динаміки компонент зносу цього обладнання від зміни його коефіцієнта зайнятості. На рис. 4.4 наведені графіки динаміки компонент зносу u_1, u_2 і u_3, що отримані за допомогою моделі, яка описана диференціальним рівнянням (4.4) для коефіцієнта зайнятості, графік якого зображено на рис. 4.5. На рис. 4.6 представлено графіки динаміки компонент зносу u_1, u_2 і u_3 того ж самого обладнання, але за умови, що коефіцієнт зайнятості змінюється так, як показано на рис. 4.7 [121].

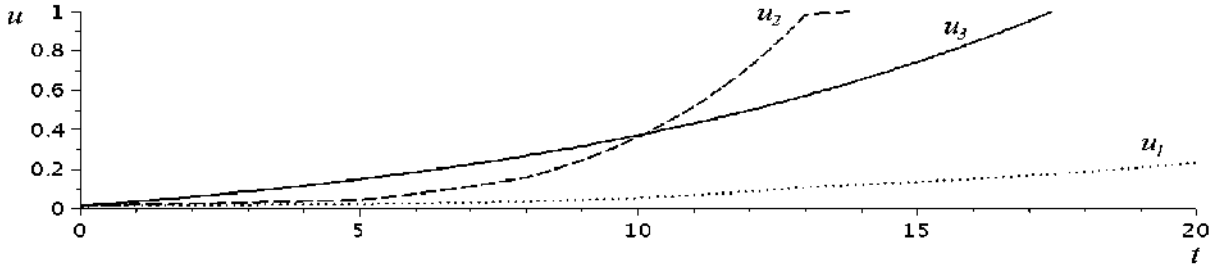


Рисунок 4.4 – Криві змінення компонент зносу, що відповідають зміненню коефіцієнта зайнятості, графік якого наведено на рис. 4.5

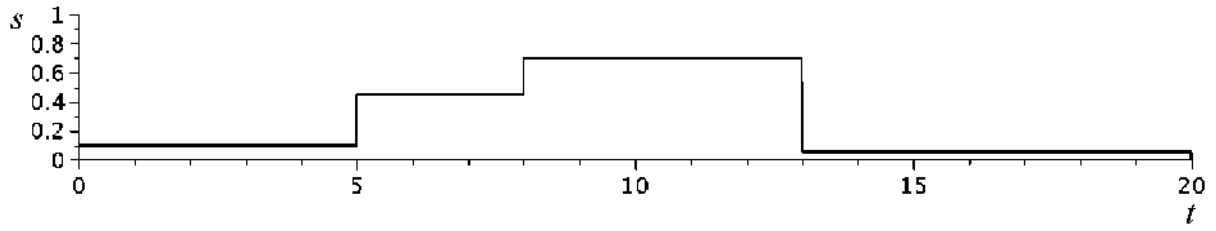


Рисунок 4.5 – Крива змінення коефіцієнта зайнятості

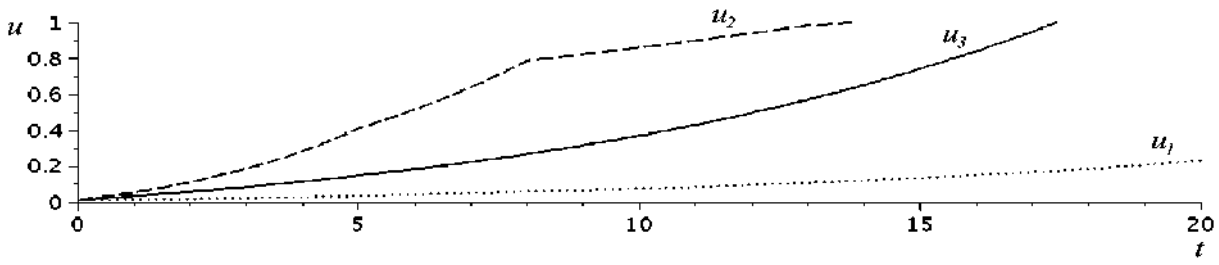


Рисунок 4.6 – Криві змінення компонент зносу, що відповідають зміненню коефіцієнта зайнятості, графік якого наведено на рис. 4.7

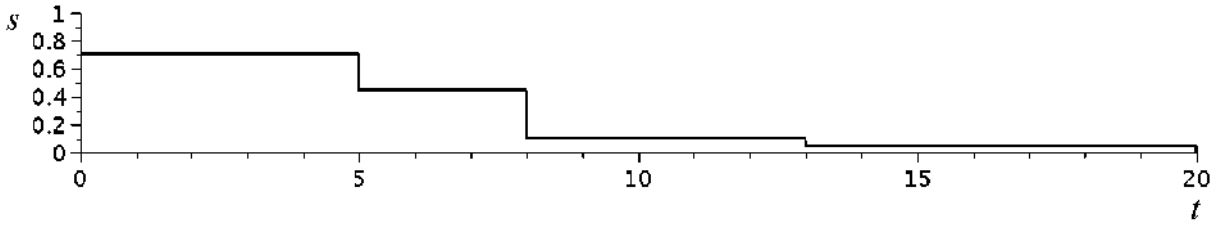


Рисунок 4.7 – Крива змінення коефіцієнта зайнятості

Оскільки зміна інтенсивності критичних деградаційних відмов розглянутого обладнання залежить тільки від зносу другого роду, графік u_3 не залежить від змін коефіцієнта зайнятості, що видно на рис. 4.6 і 4.7. При цьому, порівнюючи рис. 4.6 і рис. 4.7, можна помітити зміну взаємного розташування графіків u_1 і u_3. Отримані результати показують, що зміна динаміки завантаження обладнання може привести до якісного перерозподілу ризиків і витрат, які пов'язані з ростом зносу обладнання. Причому цей перерозподіл може спостерігатися навіть у випадку, коли середнє значення коефіцієнта зайнятості залишається постійним на даному горизонті планування.

Розглянута динамічна модель змінення фізичного зносу обладнання заснована на використанні комплексного показника зносу і поділі зносів першого і другого роду. Такий підхід дозволяє кількісно оцінювати вплив рівня зайнятості портового обладнання на якісні зміни проявів його фізичного зносу. Запропоновану модель можна розширювати і застосовувати в дослідженнях динаміки економічних показників проектів придбання та використання старіючого обладнання. Завдяки достатньої гнучкості, простій структурі і невеликій кількості параметрів, що мають наочний зміст, дана модель може бути успішно використана для оцінки економічної ефективності

різних стратегій ремонтів і замін обладнання за допомогою імітаційного моделювання а також для проведення аналізу ризиків, що пов'язані з можливими змінами вантажопотоку.

4.2. Розробка методу визначення оптимальних термінів ремонтів складного портового обладнання в межах життєвих циклів проектів їх придбання та використання

Значну частину витрат інфраструктурних проектів, і зокрема проектів інноваційного розвитку інфраструктури морського транспорту, становлять витрати на обладнання. Тому питання оптимального планування ремонтів і замін обладнання мають суттєве значення для ефективної реалізації цих проектів. Навіть при належному технічному обслуговуванні з часом експлуатаційні характеристики обладнання погіршуються до тих пір, поки його подальше використання стає недоцільним або навіть небезпечним. Є ряд робіт різних авторів, в яких пропонуються різні показники для економічної оцінки стратегій замін складного обладнання а також методи знаходження найкращих з цих стратегій.

Метою даного підрозділу є розробка методу знаходження оптимального плану капітальних ремонтів і строків завершення проекту використання складного портового обладнання, яке функціонує в умовах мінливої зайнятості. Для цього побудовано модель, що заснована на застосуванні теорії динамічних систем з джокером.

Для того, щоб вивчати вплив різних стратегій ремонтів, які реалізуються в рамках проекту придбання та використання інфраструктурних об’єктів, потрібно, перш за все, мати задовільну модель старіння обладнання. Тому до моделі старіння обладнання ставляться такі вимоги:

– ця модель повинна максимально точно відповідати реальним тенденціям старіння обладнання;

– модель повинна бути досить гнучкою для того, щоб в неї вписувався широкий спектр різних закономірностей накопичення зносу;

– по можливості модель повинна мати просту структуру і описуватися невеликою кількістю числових параметрів, які можуть бути підраховані з використанням статистичних методів для кожного типу обладнання;

– модель повинна бути придатна для вивчення впливу ремонтів.

Для побудови кількісної моделі старіння машин, що задовольняє цим вимогам, розглянемо показник зносу обладнання. Показником зносу обладнання будемо називати число $u = u(t)$, $0 \le u \le 1$, яке характеризує інтенсивність експлуатаційних витрат обладнання при його повній зайнятості. При побудові моделі будемо виходити з того, що на практиці у багатьох складних технічних систем спостерігаються три умовні стадії старіння, що представлені на рис. 4.3. Для опису динаміки старіння обладнання розглянемо наступну задачу Коші:

$$\begin{cases} u' = a \cdot (1-u)^v \cdot (u-L)^w \cdot s(t), \\ u(0) = u_0, \end{cases} \tag{4.6}$$

де w – показник, що визначає інтенсивність збільшення зносу на першій стадії старіння;

v – показник, що визначає інтенсивність збільшення зносу на третій стадії старіння;

a – коефіцієнт, який визначає загальну швидкість збільшення зносу протягом усього часу моделювання;

$s(t)$ – коефіцієнт зайнятості обладнання в момент часу t;

L – параметр, що визначає нижню асимптоту кривої старіння ($0 \le L < 1$);

u_0 – початкове значення показника зносу ($u_0 > L$).

Взявши диференціальне рівняння (4.6) за основу закону старіння обладнання, отримаємо просту (лише з невеликим числом параметрів, які можна легко підрахувати на практиці) і разом з тим досить гнучку модель. Так, при різних значеннях параметрів за допомогою цього рівняння можна

отримати, наприклад, такі криві, як на рис. 4.8. На рис. 4.8 крива а) відповідає типу обладнання, яке різко старіє після деякого часу безвідмовної роботи; крива б) відображає поступове старіння після деякого часу безвідмовної роботи; в) – швидке старіння на початку експлуатації і повільне згодом; г) – поступове «майже лінійне» старіння, і т. д. Таким чином, в дану модель вписуються різні закономірності старіння, які відповідають обладнанню різних типів. Однак, для вирішення задачі знаходження оптимальної стратегії ремонтів і замін обладнання одновимірного показника зносу недостатньо. Тому різні автори були змушені переходити до багатовимірних параметрів для того, щоб мати можливість в кожен момент часу оцінювати як поточний стан обладнання, так і стан, в який воно потенційно могло б бути переведено в разі, якби було прийнято рішення про його ремонт. Так, наприклад, для того, щоб моделювати вплив ремонтів на зміну стану обладнання, в [190] вводиться показник придатності (в [214], відповідно, показник функціонального стану), який поділяється на активну і пасивну складові. Для того, щоб подолати зазначені труднощі, ми пропонуємо розглядати загальний знос обладнання (або просто знос) як суму двох складових.

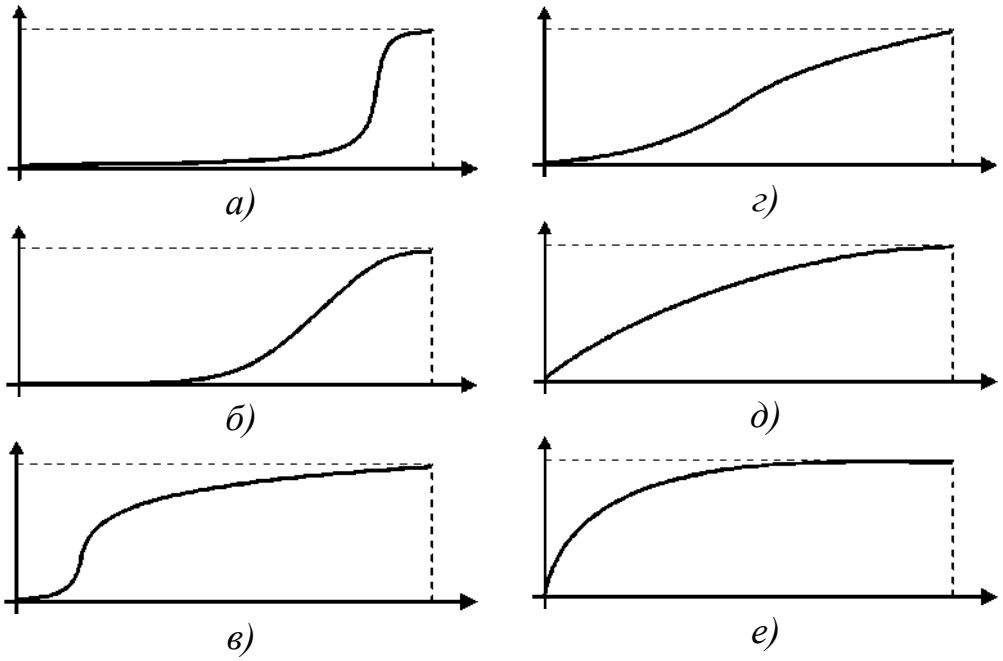


Рисунок 4.8 – Можливі рішення задачі Коші (4.6) при різних значеннях параметрів

Перша з цих складових відповідає неусувному зносу, тобто зносу, який неможливо або економічно недоцільно усувати за допомогою ремонтів або модернізацій. Друга складова відповідає усувному зносу – зносу, який може бути усунутий за допомогою ремонтів або модернізацій, що пов'язані з певними додатковими витратами.

Показником неусувного зносу в момент часу t будемо називати число $u_1 = u_1(t)$, $(0 \le u_1 \le 1)$, що характеризує інтенсивність експлуатаційних витрат при повній зайнятості обладнання, які неможливо або недоцільно зменшити за допомогою ремонтів або модернізацій. Показником усувного зносу будемо називати число $u_2 = u_2(t)$, $(0 \le u_2 \le 1)$, що характеризує інтенсивність експлуатаційних витрат обладнання в момент часу t при його повній зайнятості, які можуть бути зменшені за допомогою ремонтів або модернізацій. Загальний знос будемо розраховувати як суму $u = u_1 + (1 - u_1) \cdot u_2$. Визначені таким чином показники усувного, неусувного та загального зносу додатні і, зростаючи з плином часу, наближаються до свого граничного значення 1. Для спільного моделювання усувного і неусувного зносу розглянемо динамічну модель, що описується наступною системою диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} u_1' = (1-u_1)^{v_1} \cdot (u_1 - L_1)^{w_1} \cdot s(t) \cdot (a_1 + b_1 \cdot u_2), \\ u_2' = (1-u_2)^{v_2} \cdot (u_2 - L_2)^{w_2} \cdot s(t) \cdot (a_2 + b_2 \cdot u_1), \\ u_1(0) = u_{10}; \quad u_2(0) = u_{20}, \end{cases} \tag{4.7}$$

де w_1 і w_2 – показники, що визначають інтенсивність збільшення відповідно неусувного і усувного зносів на початковій стадії старіння;

v_1 і v_2 – показники, що визначають інтенсивність збільшення відповідно неусувного і усувного зносів на останній стадії старіння;

$s(t)$ – коефіцієнт зайнятості обладнання в момент часу t $(0 \le s(t) \le 1)$;

L_1 і L_2 – параметри, що визначають нижні асимптоти кривих відповідно неусувного і усувного зносів $(0 \le L_1 < 1, 0 \le L_2 < 1)$;

u_{10} і u_{20} – початкове значення показників відповідно неусувного і усувного зносів ($u_{10} > L_1, u_{20} > L_2$);

a_1 і a_2 – параметри, що визначають загальну швидкість збільшення відповідно неусувного і усувного зносів протягом усього часу моделювання;

b_1 и b_2 – параметри, що визначають взаємний вплив значень і динаміки усувного і неусувного зносів.

За допомогою рівнянь (4.7) можна моделювати поступовий процес старіння обладнання. Однак, крім заздалегідь регламентованих виробником ремонтів і технічних обслуговувань а також вимушених незапланованих ремонтів, необхідність в яких зазвичай зростає по мірі використання обладнання, підприємство може вважати економічно доцільним проводити додаткові профілактичні ремонти та модернізації обладнання, що спрямовані на зменшення зносу обладнання і збільшення його ресурсу. Для того, щоб в динамічної моделі (4.7) врахувати вплив ремонтів і модернізацій, ми пропонуємо використовувати механізм так званих джокерів.

Дослідження динамічних систем з джокером були розпочаті в роботах Г.Г. Малінецького і його співавторів [71, 73] і в даний час успішно використовуються для моделювання складних технічних, біологічних та економічних систем (див., наприклад, [71, 193]). Принцип використання динамічних систем з джокером полягає в наступному. Фазовий простір динамічної системи розбивається на дві частини. У першій частині – G_1 система веде себе досить «плавно» і передбачувано, і тому її поведінку в цій області можна досить точно описати системою диференціальних рівнянь малої розмірності. У другій частині фазового простору – G_2 задано деяке правило, що визначає, де виявиться точка у фазовому просторі після того, як перейде з G_1 в G_2. Це відображення, слідуючи [73], будемо називати джокером. Як правило, множина G_2 відповідає тій частині фазового простору, де система зазнає якісні стрибкоподібні, а іноді випадкові зміни, які важко або взагалі неможливо описати в рамках однієї моделі. При цьому G_2, як правило, менше

за G_1. Виділяють три основні типи джокерів [73]. Джокер першого типу переводить точку, що потрапила в G_2, в деяку фіксовану точку a з множини G_1. Джокер другого типу переводить точку, що потрапила в G_2, з ймовірністю p_i в точку x_i множини G_1. Джокер третього типу задається розподілом ймовірності $p_i(x)$, відповідно до якого він переводить точку, що потрапила в G_2 в G_1. Таким чином, повертаючись до динамічної моделі зносу обладнання, для моделювання ремонтів із заздалегідь відомим ступенем ефективності (наприклад, ремонтів, які знижують рівень усувного зносу до мінімуму), можна використовувати джокер першого типу. Якщо ж при даному типі ремонту не можна точно передбачити, наскільки в результаті зменшиться рівень усувного зносу, то природно використовувати джокери другого або третього типу.

Далі в цьому підрозділі ми обмежимося розглядом двох типів керуючих впливів і відповідних їм джокерів: капітальним ремонтом, який з ймовірністю 1 скорочує рівень усувного зносу до мінімального, залишаючи при цьому неусувний знос незмінним, або заміною обладнання, в результаті якої і усувний і неусувний знос повертаються до своїх мінімальних рівнів.

Для прикладу розглянемо криву змінення зносу, яка є типовою для портових навантажувачів вантажопідйомністю до 3 т. Цю криву можна описати за допомогою динамічної моделі (4.6) з наступними значеннями параметрів: $v_1 = 1$, $w_1 = 2$, $L_1 = 0$, $a_1 = 1{,}4$, $b_1 = 1$, $u_{10} = 0{,}1$, $v_2 = 1$, $w_2 = 1{,}02$, $L_2 = 0$, $a_2 = 2{,}8$, $b_2 = 1$, $u_{20} = 0{,}001$. Хоча динамічна модель (4.7) розроблена для прогнозування зносу обладнання, яке функціонує в умовах істотно нерівномірного завантаження, для наочності в даному прикладі обмежимося розглядом випадку завантаження з постійним коефіцієнтом зайнятості $s(t) \equiv 0{,}5$. Вибираючи в даній моделі відповідним чином джокерів, можна прогнозувати зміну динаміки зносу при різних стратегіях ремонтів обладнання. Для ілюстрації розглянемо наступні чотири альтернативні стратегії ремонтів обладнання з довільно вибраними термінами ремонтів:

стратегія S0 – не проводити капітальних ремонтів, стратегія S1 – провести один капітальний ремонт в момент часу $t_1 = 5$ років, стратегія S2 – провести два капітальні ремонти в моменти часу $t_1 = 4$ і $t_2 = 8$ років, стратегія S3 – провести три капітальні ремонти в моменти часу $t_1 = 3$, $t_2 = 6$ і $t_3 = 9$ років.

На рис. 4.9 представлені криві незворотного і загального зносу обладнання для кожної з цих стратегій, що отримані за допомогою чисельного рішення системи диференціальних рівнянь (4.7) з відповідними джокерами. Як видно з рис. 4.9, кожен ремонт в момент його проведення скорочує усувний знос до мінімального рівня, в результаті чого загальний знос опускається до рівня неусувного зносу. Отже, внаслідок планування більшої кількості ремонтів стримується зростання усувного зносу і віддаляються моменти часу, коли загальний і неусувний знос досягнуть своїх критичних рівнів, продовжуючи таким чином доцільний термін служби обладнання.

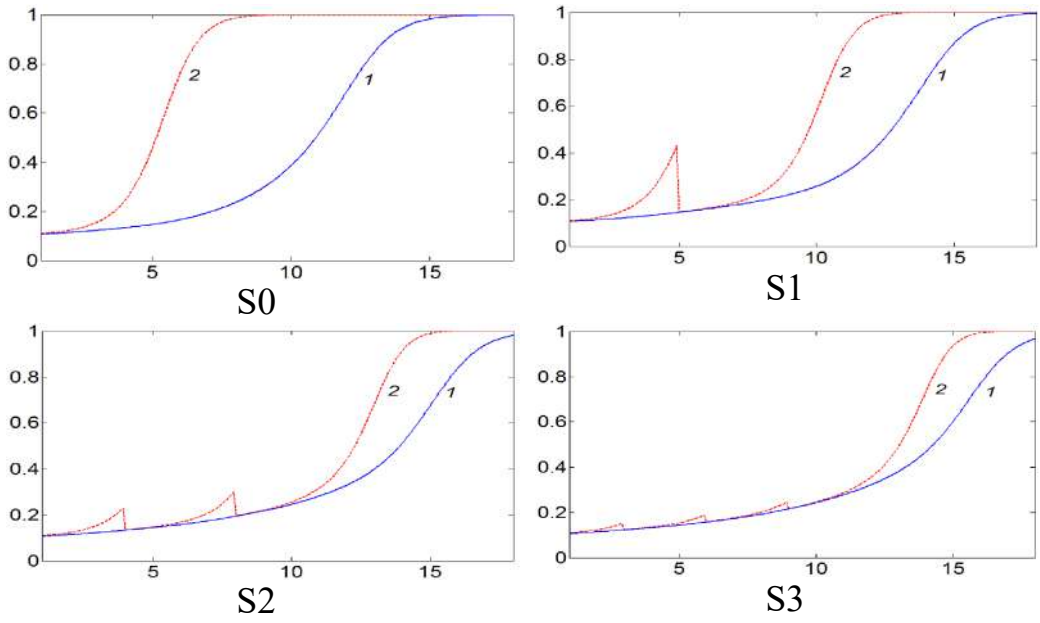


Рисунок 4.9 – Криві зносу обладнання для стратегій S0, S1, S2 і S3

(1 - крива неусувного зносу, 2 - крива загального зносу)

Однак кожен ремонт пов'язаний з додатковими витратами. Тому виникає питання: яка з розглянутих трьох стратегій є економічно кращою? В якості критерію оптимальності візьмемо середні витрати (включаючи експлуатаційні та капітальні витрати) за одиницю часу роботи машини від початку проекту [149].Оскільки в даному підрозділі розглядається складне портове

обладнання, що має тривалі терміни служби, всі витрати будемо дисконтувати (до моменту початку проекту). Одиницею виміру часу за умовчанням вважатимемо рік. Для полегшення сприйняття результатів моделювання далі всі грошові витрати будемо вказувати у відсотках від поточної вартості нового зразка цього обладнання. Середні експлуатаційні витрати за одиницю часу експлуатації обладнання в період від початку проекту до моменту часу t можна знайти за формулою

$$R_э(t) = \frac{R_{э0}}{u(0) \cdot \int_0^t s(\tau) d\tau} \int_0^t u(\tau) \cdot s(\tau) \cdot e^{\delta\tau} d\tau, \qquad (4.8)$$

де $u(t)$ – показник загального зносу в момент часу t,

$s(t)$ – коефіцієнт зайнятості в момент часу t,

$R_{э0}$ – експлуатаційні витрати нового обладнання за одиницю часу при повній постійній зайнятості,

$e^{\delta t}$ – множник нарощення при безперервному нарахуванні відсотків,

δ – сила зростання.

Середні капітальні витрати за одиницю часу роботи обладнання в період від початку проекту до моменту часу t будемо шукати за формулою

$$R_a(t) = \frac{1}{\int_0^t s(\tau) d\tau} \left(R_0 + \sum_{t_k \le t} R_{t_k} \cdot e^{\delta t_k} \right), \qquad (4.9)$$

де $R_0 = 100\%$ – ціна нового обладнання,

R_{t_k} – витрати на капітальний ремонт, що запланований на момент часу t_k.

Тоді сумарні середні витрати за одиницю часу роботи обладнання в період від початку проекту до моменту часу t дорівнюють

$$R(t) = R_э(t) + R_a(t). \qquad (4.10)$$

Якщо ж замість середніх витрат за одиницю часу роботи обладнання потрібно оцінити середньорічні витрати на обладнання, то для цього в правих частинах рівностей (4.8) і (4.9) достатньо $\int_0^t s(\tau) d\tau$ замінити на t [154].

Оцінимо середні витрати за одиницю часу роботи обладнання для кожної з розглянутих чотирьох стратегій. При цьому будемо вважати, що

середня вартість капітального ремонту становить 35% від вартості нового обладнання, річна ставка відсотків становить 4%, експлуатаційні витрати нового обладнання за рік становлять 10% від його вартості при $s(t) = 0{,}5$ і змінюються пропорційно до поточних значень коефіцієнта зносу і коефіцієнта зайнятості. На рис. 4.10 наведені криві змінення середніх витрат і моменти часу оптимального завершення проектів використання обладнання $t_{опт}$, які отримані на підставі чисельного рішення системи диференціальних рівнянь (4.7) з джокерами і формул (4.8) – (4.10) при зазначених значеннях параметрів. Для стратегій S0, S1, S2 і S3 значення $t_{опт}$ дорівнюють 5,500, 10,167, 12,917 і 14,000 років відповідно.

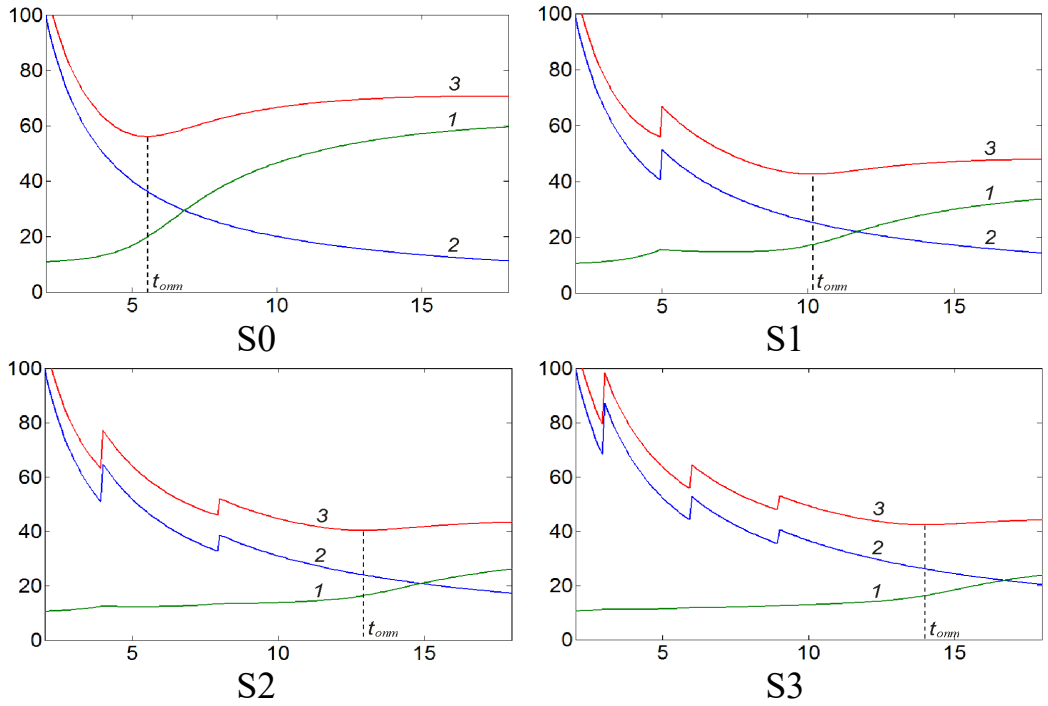


Рисунок 4.10 – Середні витрати на одиницю часу роботи обладнання для стратегій S0, S1, S2 і S3 (1 – середні експлуатаційні витрати; 2 – середні капітальні витрати; 3 – сумарні середні витрати)

Значення цільової функції при оптимальних датах завершення проектів використання обладнання (сумарні середні витрати за одиницю часу експлуатації обладнання за період життєвого циклу проекту) для цих чотирьох стратегій дорівнюють 56,020, 42,536, 40,294 і 42,330 відповідно. Таким чином, стратегія S2 виявилася кращою, ніж S0, S1 і S3. Природно виникає питання: як

знайти найкращу стратегію ремонтів, а не просто порівнювати між собою кілька довільно вибраних стратегій? Тобто як визначити, скільки і коли слід проводити ремонтів і коли слід завершувати проект, а в разі, якщо допустимо не один тип ремонтів, а декілька, то, крім того, необхідно вибрати оптимальну послідовність проведення цих ремонтів. З аналізу динаміки середніх витрат для чотирьох розглянутих стратегій (рис. 4.10) видно, що безпосереднє використання класичних градієнтних методів до вирішення задачі знаходження оптимальних термінів ремонтів і визначення терміну завершення проекту неможливо. Тому для вирішення цієї проблеми ми пропонуємо використати метод імітації відпалу [279], який не вимагає неперервності цільової функції і допускає багато точок локальних екстремумів.

Застосовуючи метод імітації відпалу до розглянутого вище прикладу моделювання старіння обладнання, отримаємо, що найкращою є стратегія, яка складається з двох капітальних ремонтів, проведених через 4,624 і 9,249 років, і заміни через 14,066 років після початку експлуатації обладнання, при цьому цільова функція буде приймати значення 39,726.

4.3. Оцінка стійкості проектів придбання та використання складного портового обладнання

Обґрунтоване планування ремонтів і замін обладнання має велике значення для ефективної роботи портів. Проблема оптимального планування істотно ускладняється тим, що портові споруди, як правило, мають тривалі терміни служби, але при цьому часто важко робити точні довгострокові прогнози щодо умов, в яких це обладнання буде використовуватися.

Метою даного підрозділу є аналіз стійкості показників ефективності проектів придбання та використання складного портового обладнання при зміненні умов його експлуатації і різних стратегіях його ремонтів і замін.

При дослідженні стратегій ремонтів і замін обладнання в кожен момент часу необхідно мати можливість кількісно оцінювати як поточний стан

обладнання, так і стан, в яке це обладнання може бути переведено за допомогою ремонтів. Тому одновимірного параметра, що характеризує поточний стан обладнання, замало. Для дослідження оптимальних стратегій ремонтів і замін складного обладнання в [131, 315, 146] використано показники усувного і неусувного зносу. Моделювання усувного і незворотного зносу будемо здіснювати за допомогою динамічної моделі, що описується системою диференціальних рівнянь (4.7). Проаналізуємо динаміку зносу, яка є типовою для портових тягачів. Цю криву можна описати за допомогою динамічної моделі (4.7) з наступними значеннями параметрів: $v_1 = 1$, $w_1 = 1{,}3$, $L_1 = 0$, $a_1 = 0{,}83$, $b_1 = 1$, $u_{10} = 0{,}03$, $v_2 = 1{,}8$, $w_2 = 1$, $L_2 = 0$, $a_2 = 1{,}8$, $b_2 = 1$, $u_{20} = 0{,}001$. Будемо вважати, що $s(t) \equiv 0{,}5$. Всі грошові витрати будемо вказувати у відсотках від поточної вартості нового зразка цього обладнання. У цьому прикладі обмежимося розглядом тільки капітальних ремонтів, виконання яких призводить до зменшення показника усувного зносу до мінімального значення. Будемо вважати, що середня вартість капітального ремонту становить 40% від вартості нового обладнання, річна ставка відсотків дорівнює 4%, постійні експлуатаційні витрати за одиницю часу роботи складають 0,42% від вартості нового обладнання, а змінні експлуатаційні витрати нового обладнання за одиницю часу роботи при повній зайнятості складають 6,6% від вартості нового обладнання і змінюються пропорційно поточним значенням коефіцієнта зносу і коефіцієнта зайнятості.

Використовуючи метод імітації відпалу (див., наприклад, [d_11]), отримуємо, що для розглянутого устаткування при зазначених умовах його експлуатації доцільно планувати проведення одного капітального ремонту через $t_{рем}$ = 6,29 років і списання через $t_{спис}$ = 12,71 років після початку використання. Цю стратегію ремонтів і замін обладнання можна вважати оптимальною, оскільки при ній сумарні середні витрати за одиницю часу роботи машини в період від початку експлуатації машини до її списання приймають мінімальне значення, що дорівнює 43,42. Очевидно, що навіть при незначній зміні умов використання обладнання оптимальні терміни ремонтів

та заміни обладнання зміняться. Разом з тим, ремонт або заміна складного портового обладнання вимагає залучення значних фінансових ресурсів, які необхідно планувати заздалегідь, крім того, ремонтні роботи можуть спричинити порушення технологічного процесу і графіка роботи всього порту. Тому в деяких випадках зміна заздалегідь запланованих термінів ремонтів і замін обладнання може бути небажаною. Отже, важливо мати чітке уявлення про те, наскільки критично зміна умов використання обладнання може відбитися на економічних показниках його функціонування [135]. Для дослідження цього питання скористаємося динамічною моделлю старіння обладнання (4.7) і даними розглянутого вище прикладу. На рис. 4.11 а) представлені криві зміни цільової функції (сумарних середніх витрат за одиницю часу роботи обладнання в період від початку експлуатації до списання) при зміні умов використання обладнання і незмінній стратегії ремонтів і замін. Якщо ж оптимальну стратегію перераховувати кожного разу, як тільки змінюються умови експлуатації обладнання, то криві змінення цільової функції будуть виглядати так, як зображено на рис. 4.11 б). На рис. 4.11 а) і б) по осі абсцис відкладені значення зсувів параметрів в % від їх початкових значень, а по осі ординат відкладені відповідні значення цільової функції [140, 117]. Дані обчислень показали, що коливання коефіцієнта зайнятості суттєво впливають на значення цільової функції і вимагають своєчасного перегляду термінів ремонтів і замін обладнання. Крім того, окремого дослідження заслуговує обґрунтування вибору значення річної ставки відсотків, оскільки навіть незначні зміни цього параметра істотно впливають на вибір оптимальної стратегії ремонтів і замін обладнання. Більш детально ці залежності можна простежити за даними в таблицях 4.1 і 4.2. Зміни постійних витрат і витрат на ремонт, хоч і мають значний вплив на цільову функцію, але, разом з тим, не так критично вимагають перегляду термінів ремонтів і замін обладнання.

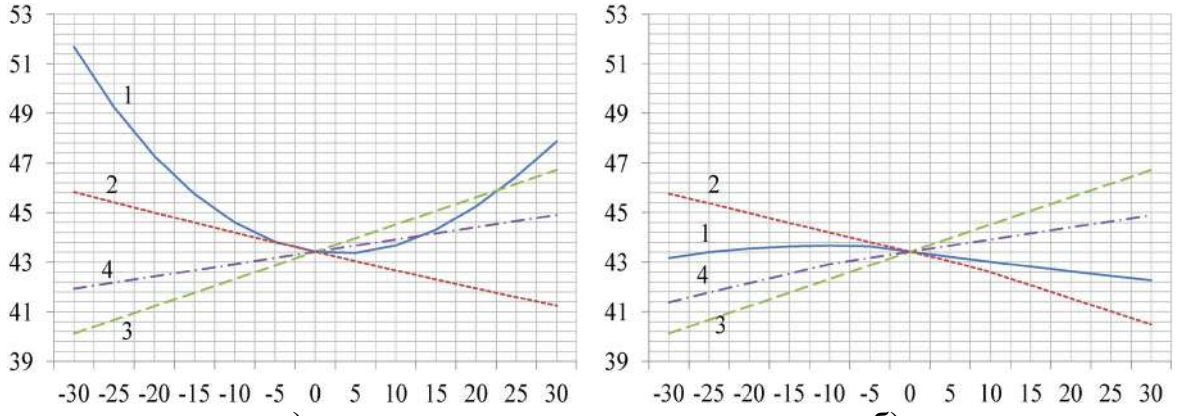


Рисунок 4.11 – Криві значень цільової функції при змінних умовах використання обладнання а) - при фіксованій стратегії ремонтів і замін обладнання; б) – за умови, що оптимальна стратегія постійно перераховується (1 – зміна цільової функції в залежності від коефіцієнта зайнятості, 2 – зміна цільової функції в залежності від річної ставки відсотків, 3 – зміна цільової функції в залежності від постійних витрат, 4 – зміна цільової функції в залежності від витрат на ремонт)

Іноді обставини можуть складатися таким чином, що з різних причин (наприклад, таких, як високий рівень завантаженості обладнання в проміжок часу, коли планується проведення ремонту, або зміна поточних фінансових умов на підприємстві), виникає потреба відмови від оптимальної стратегії і перенесення термінів ремонтів або заміни обладнання. У зв'язку з цим виникає питання: наскільки критично відступ від оптимальної стратегії ремонтів і списань обладнання відіб'ється на значенні цільової функції? Дослідження показали, що оптимальна стратегія може бути скоригована без істотних втрат в значенні цільової функції. Так, перенесення дати ремонту не більше, ніж на квартал, і відповідний зсув оптимальної дати списання не більше, ніж на півроку, спричинлять погіршення значення цільової функції не більше, ніж на 0,1, тобто загальні втрати від такого зсуву не перевищать 0,65 % вартості нової машини. Уявлення про те, як зміна стратегії відіб'ється на значенні цільової функції, можна отримати з графіка ліній рівня цільової функції (рис. 4.12).

Таблиця 4.1 – Змінення цільової функції в залежності від коефіцієнта зайнятості

Значення коефіцієнта зайнятості	Значення цільової функції при фіксованій стратегії	Значення цільової функції при оптимальній стратегії	Оптимальна кількість ремонтів обладнання	Оптимальний термін служби, роки
0,350	51,686	43,160	2	25,844
0,375	49,248	43,398	2	22,970
0,400	47,284	43,539	2	20,937
0,425	45,744	43,622	2	19,178
0,450	44,597	43,661	2	17,982
0,475	43,825	43,630	1	13,455
0,5	43,417	43,417	1	12,708
0,525	43,368	43,209	1	12,075
0,550	43,670	43,008	1	11,481
0,575	44,307	42,817	1	10,838
0,600	45,250	42,623	1	10,424
0,625	46,453	42,442	1	9,945
0,650	47,862	42,267	1	9,624

Таблиця 4.2 – Змінення цільової функції в залежності від річної ставки відсотків

Значення річної ставки відсотків, %	Значення цільової функції при фіксованій стратегії	Значення цільової функції при оптимальній стратегії	Оптимальна кількість ремонтів обладнання	Оптимальний термін служби, роки
0	52,537	51,505	1	11,282
0,8	50,449	49,822	1	11,531
1,6	48,503	48,172	1	11,769
2,4	46,689	46,552	1	12,151
3,2	44,997	44,969	1	12,382
4	43,417	43,417	1	12,708
4,8	41,941	41,540	2	16,638
5,6	40,562	39,443	2	17,143
6,4	39,272	37,031	2	20,987
7,2	38,066	34,534	3	21,939
8	36,936	32,327	3	23,120

На рис. 4.12 уздовж осі абсцис відкладені можливі дати списань, уздовж осі ординат – можливі дати ремонтів в роках, а також відзначена точка з координатами ($t_{спис}$, $t_{рем}$), що відповідає оптимальній стратегії ремонту і

заміни обладнання. Слід зазначити, що зміни умов використання обладнання можуть спричинити не тільки зміщення поверхні значень цільової функції, а й її спотворення. Так, для порівняння на рис. 4.13 представлено графік ліній рівня цільової функції за умови, що річна ставка відсотків становитиме 1,5%. Аналогічні залежності можна простежити і для оптимальних стратегій з декількома ремонтами.

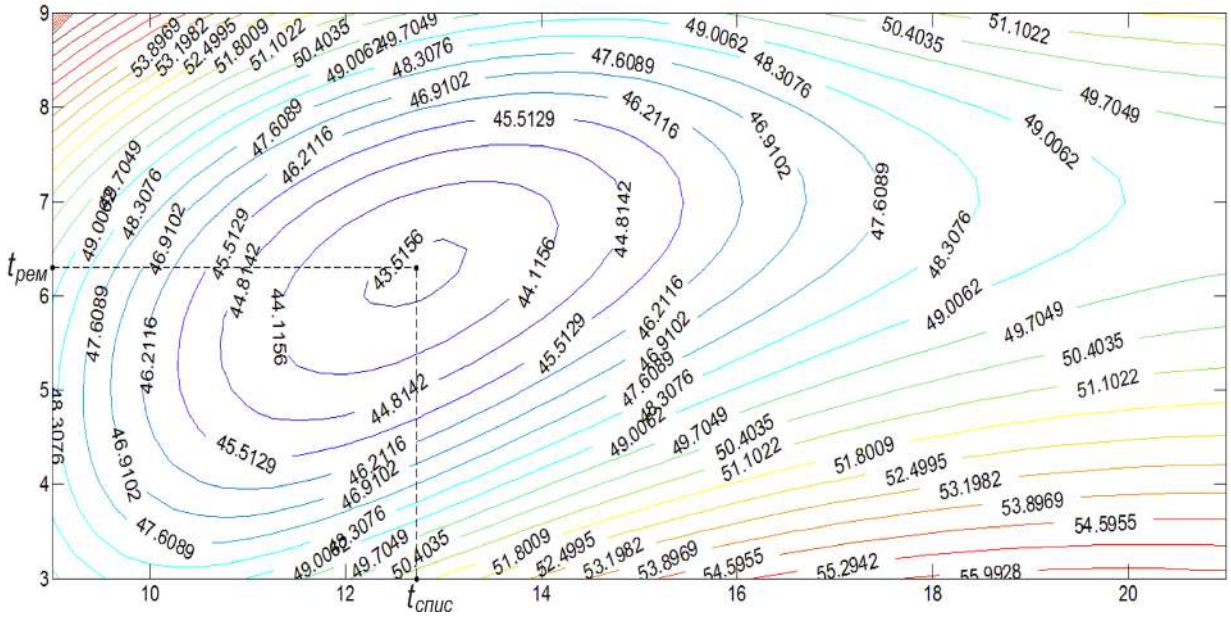


Рисунок 4.12 – Лінії рівня цільової функції при річній ставці відсотків 4%

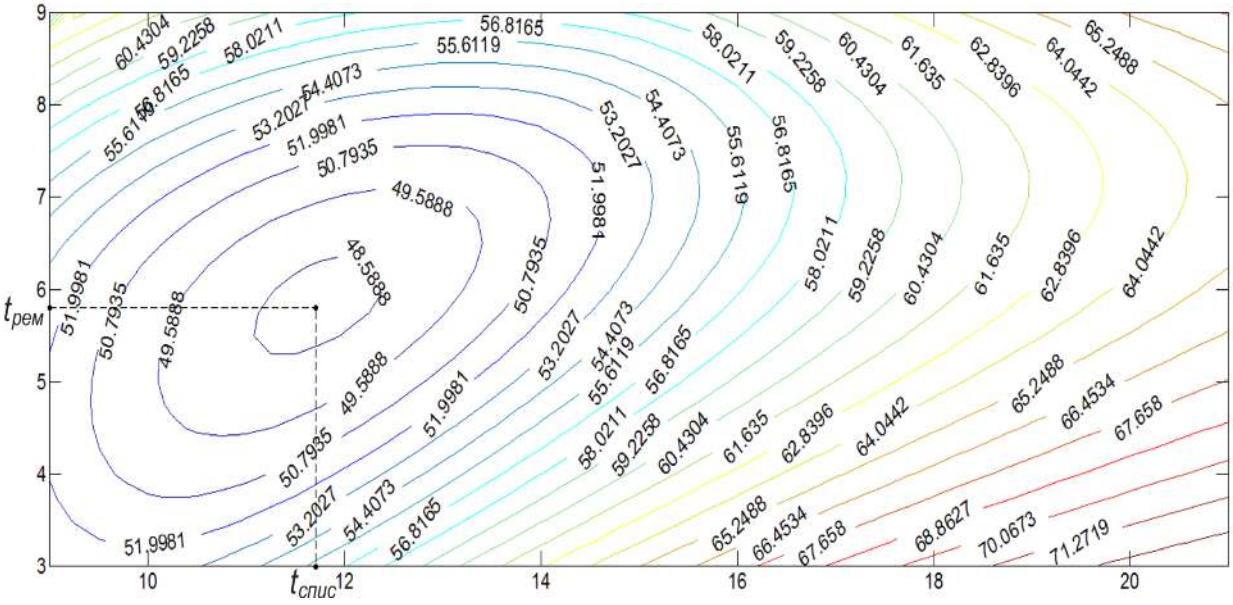


Рисунок 4.13 – Лінії рівня цільової функції при річній ставці відсотків 1,5%

З результатів дослідження видно, наскільки велике значення при плануванні термінів ремонтів і замін обладнання має рівень завантаження обладнання. Разом з тим, довгострокові прогнози рівня завантаження портів

можуть бути неточними. Тому великий інтерес представляє побудова максимально адекватної ймовірнісної моделі процесу завантаження обладнання і вивчення впливу властивостей цього випадкового процесу на вибір і стійкість оптимальної стратегії ремонтів і замін обладнання.

Дослідження також показали, що погіршення значення цільової функції, яке викликане змінами в оптимальній стратегії ремонтів і замін обладнання, є некритичним. Тому має сенс разом з даною цільовою функцією вивчати і інші показники експлуатації обладнання, які можна було б покращити, при цьому лише незначно пожертвувавши значенням цільової функції. Тобто перейти до розгляду задач багатокритеріальної оптимізації.

4.4. Планування оптимальних термінів ремонтів та завершення проектів використання складного портового обладнання, що функціонує в умовах непостійної зайнятості

На практиці ремонти і заміни обладнання плануються через певні проміжки часу або напрацювання, які фіксуються в галузевих або внутрішніх нормах підприємства. Разом з тим, зрозуміло, що такий підхід не зважає на специфіку і різноманітність умов, в яких використовується обладнання, і в деяких випадках може бути економічно неефективним. В даний час, завдяки стрімкому розвитку і доступності обчислювальної техніки і інформаційних технологій, все більш широкого поширення набувають комп'ютерні системи збирання і зберігання технічної і економічної інформації, пов'язаної з експлуатацією обладнання. Практично все сучасне складне портове обладнання оснащене електронними пристроями обліку, які дозволяють давати точну і повну інформацію про функціонування обладнання. У зв'язку з цим зростає потреба в розвитку кількісних методів аналізу цієї інформації, на підставі яких можна було б будувати оптимальні плани ремонтів і замін машин, що зважають на специфіку умов, в яких використовується обладнання. Проте, багато математичних моделей, які запропоновані для пошуку

оптимальних термінів ремонтів і замін обладнання (див., наприклад [56, 190]), мають істотні обмеження. Так, часто припускається постійна зайнятість машин, лінійність функції інтенсивності експлуатаційних витрат, розглядаються лише стратегії з однаковими міжремонтними інтервалами.

Метою даного підрозділу є побудова математичної моделі динаміки фізичного зносу обладнання, яка була б придатна для розв'язання задачі знаходження оптимальних термінів ремонтів об'єктів транспортної інфраструктури, що функціонують в умовах непостійної зайнятості, і використання цієї моделі для порівняння і аналізу різних стратегій ремонтів та обґрунтування оптимальних термінів завершення експлуатаційної фази відповідних проектів.

Щоб мати можливість кількісно оцінювати рівень зносу обладнання, доцільно розглядати числовий показник зносу. Однак, для задач знаходження оптимальних планів ремонтів і замін обладнання одновимірного показника зносу недостатньо. Це пов'язано з тим, що в кожен момент часу необхідно мати можливість оцінювати як поточний стан обладнання, так і стан, в який це обладнання могло б бути переведене, якщо було б ухвалене рішення про його ремонт. Тому різні автори використовували багатовимірні параметри. Для того, щоб подолати зазначене ускладнення, ми пропонуємо розглядати загальний знос обладнання (або просто знос) як суму двох складових. Перша з цих складових відповідає неусувному зносу, тобто зносу, який неможливо або з економічних міркувань недоцільно усувати за допомогою ремонтів чи модернізацій. Друга складова відповідає усувному зносу – зносу, який може бути зменшеним за допомогою ремонтів або модернізацій, що пов'язані з додатковими витратами.

Показником неусувного зносу у момент часу t називатимемо число $u_1 = u_1(t)$, $(0 \le u_1 \le 1)$, що характеризує інтенсивність експлуатаційних витрат при повній зайнятості обладнання, які неможливо або недоцільно зменшити за допомогою ремонтів або модернізацій. Показником усувного зносу

називатимемо число $u_2 = u_2(t)$, $(0 \le u_2 \le 1)$, що характеризує інтенсивність експлуатаційних витрат обладнання у момент часу t при його повній зайнятості, які можуть бути зменшені за допомогою ремонтів або модернізацій. Загальний знос будемо виражати як суму

$$u = u_1 + (1 - u_1) \cdot u_2 . \tag{4.11}$$

Статистичні дані показують значні коливання коефіцієнта зайнятості портового обладнання [180]. Тому при моделюванні динаміки показників зносу необхідно розрізняти вплив зносу першого і другого роду. Розглянемо вектор зносу $\overline{u} = (u_1; u_2)$. Для того, щоб врахувати роль зносу першого і другого роду, будемо моделювати динаміку вектора $\overline{u}$ за допомогою диференціального рівняння вигляду

$$\overline{u}' = \overline{\varphi}^{*}(t; \overline{u}; s; \overline{\alpha}) + \overline{\varphi}^{**}(t; \overline{u}; \overline{\alpha}), \tag{4.12}$$

де $\overline{\varphi}^{*} = (\varphi_1^{*}; \varphi_2^{*})$ – вектор-функція, що визначає швидкість росту зносу першого роду, перша координата якої $\varphi_1^{*} = \varphi_1^{*}(t; \overline{u}; s; \overline{\alpha})$ – функція, яка задає швидкість росту неусувного зносу першого роду, а друга координата $\varphi_2^{*} = \varphi_2^{*}(t; \overline{u}; s; \overline{\alpha})$ – функція, яка задає швидкість росту усувного зносу першого роду;

$\overline{\varphi}^{**} = (\varphi_1^{**}; \varphi_2^{**})$ – вектор-функція, що визначає швидкість росту зносу другого роду, яка на відміну від $\overline{\varphi}^{*}$ не залежить від коефіцієнта зайнятості, перша координата якої $\varphi_1^{**} = \varphi_1^{**}(t; \overline{u}; \overline{\alpha})$ – функція, яка задає швидкість росту неусувного зносу другого роду, а друга координата $\varphi_2^{**} = \varphi_2^{**}(t; \overline{u}; \overline{\alpha})$ – функція, яка задає швидкість росту усувного зносу другого роду;

$\overline{\alpha} = (\alpha_1; \alpha_2; ...; \alpha_k)$ – вектор параметрів, що характеризують конструктивні особливості обладнання;

$s = s(t)$ – коефіцієнт зайнятості обладнання у момент часу t, $s \in [0,1]$.

Вигляд функцій, φ_1^{*}, φ_2^{*}, φ_1^{**} і φ_2^{**} слід вибирати, виходячи з фактично спостережуваних даних про функціонування устаткування. Наприклад, динаміку неусувного зносу, що спричинений активним використанням даного

обладнання, можна моделювати за допомогою функції вигляду

$$\varphi_1^* = \alpha_1 \cdot s(t) \cdot u_1 + \alpha_2 \cdot s(t) \cdot u_2 + \alpha_3 \cdot s(t), \qquad (4.13)$$

де останній доданок не залежить від стану обладнання і виражає зміну зносу, і яка обумовлена лише поточним рівнем зайнятості обладнання, а перші два доданки, крім того, ще залежать від показників усувного зносу $u_2 = u_2(t)$ і неусувного зносу $u_1 = u_1(t)$ і виражають той факт, що при одному і тому ж ступені зайнятості нове і старе устаткування може мати неоднакові темпи старіння. Параметри α_1, α_2 і α_3 визначають вплив кожного з цих доданків на швидкість росту зносу першого роду і обумовлюють специфіку динаміки старіння кожного конкретного типу обладнання. Функцію з аналогічною структурою, але незалежну від рівня зайнятості устаткування, можна використовувати для опису динаміки неусувного зносу другого роду

$$\varphi_1^{**} = \alpha_4 \cdot u_1 + \alpha_5 \cdot u_2 + \alpha_6. \qquad (4.14)$$

По аналогії з (4.13) і (4.14) можна моделювати динаміку усувного зносу першого і другого роду:

$$\varphi_2^* = \alpha_7 \cdot s(t) \cdot u_1 + \alpha_8 \cdot s(t) \cdot u_2 + \alpha_9 \cdot s(t), \qquad (4.15)$$

$$\varphi_2^{**} = \alpha_{10} \cdot u_1 + \alpha_{11} \cdot u_2 + \alpha_{12}. \qquad (4.16)$$

Таким чином, з врахуванням вибору функцій φ_1^*, φ_2^*, φ_1^{**} і φ_2^{**}, диференціальне рівняння (4.12) прийме наступний вигляд:

$$\begin{cases} u_1' = (\alpha_1 \cdot s(t) + \alpha_4) \cdot u_1 + (\alpha_2 \cdot s(t) + \alpha_5) \cdot u_2 + \alpha_3 \cdot s(t) + \alpha_6; \\ u_2' = (\alpha_7 \cdot s(t) + \alpha_{10}) \cdot u_1 + (\alpha_8 \cdot s(t) + \alpha_{11}) \cdot u_2 + \alpha_9 \cdot s(t) + \alpha_{12}. \end{cases} \qquad (4.17)$$

Вибираючи більш складну структуру функцій φ_1^*, φ_2^*, φ_1^{**} і φ_2^{**}, можна досягнути значної гнучкості і точності даної моделі. Після вибору відповідного вигляду функцій φ_1^*, φ_2^*, φ_1^{**} і φ_2^{**} для подальшого практичного використання описаної моделі значення параметрів $\alpha_1, \alpha_2, \ldots, \alpha_k$, що відповідають даному типу обладнання, можна визначити статистичними методами за вже наявними спостереженнями траєкторій показника зносу і коефіцієнта зайнятості.

Розглянемо причальний контейнерний перевантажувач, для якого характерна динаміка старіння, що описується системою диференціальних рівнянь (4.17) з початковою умовою $\overline{u}(0) = (0{,}03;\ 0{,}001)$ і вектором параметрів $\overline{\alpha} = (0{,}03;\ 0{,}08;\ 0{,}03;\ 0{,}001;\ 0{,}06;\ 0{,}001;\ 0{,}001;\ 0{,}06;\ 0{,}02;\ 0{,}01;\ 0{,}03;\ 0{,}02)$.

Розглянемо наступні чотири сценарії зміни коефіцієнта його зайнятості:

s_1 – обладнання експлуатується рівномірно з постійним коефіцієнтом зайнятості 0,5;

s_2 – коефіцієнт зайнятості обладнання з часом зростає і описується ламаною з вершинами $(0;\ 0{,}5)$, $(5;\ 0{,}7)$, $(10;\ 0{,}8)$, $(30;\ 0{,}8)$;

s_3 – коефіцієнт зайнятості обладнання з часом спадає і описується ламаною з вершинами $(0;\ 0{,}5)$, $(2;\ 0{,}4)$, $(30;\ 0{,}4)$;

s_4 – коефіцієнт зайнятості обладнання схильний до коливань і описується ступінчастою функцією.

На рис. 4.14 наведені криві змінення коефіцієнта зайнятості s_2, s_3 і s_4, де по осі абсцис відкладено час в роках [146].

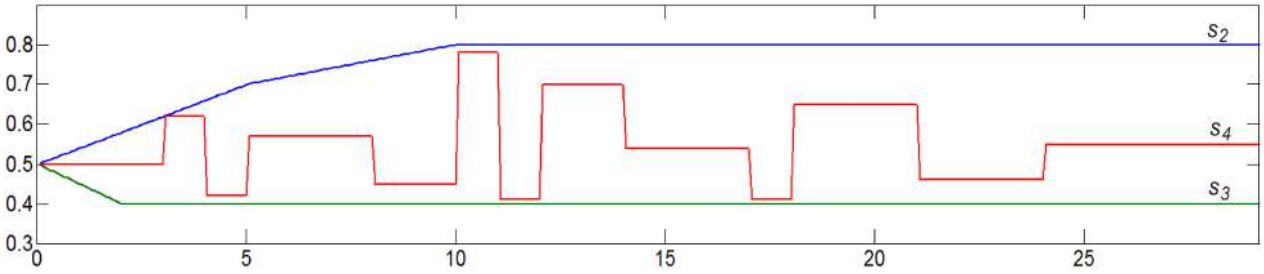


Рисунок 4.14 – Криві змінення коефіцієнта зайнятості обладнання

Далі всі грошові витрати будемо вказувати у відсотках від поточної вартості нового зразка цього обладнання. Вважатимемо, що середня вартість капітального ремонту складає 35% від вартості нового обладнання, річна ставка відсотків дорівнює 3%, постійні експлуатаційні витрати за рік неперервної роботи складають 7% від вартості нового обладнання, а змінні експлуатаційні витрати нового обладнання за рік роботи при повній зайнятості складають 2,8% від його вартості і змінюються пропорційно поточним значенням коефіцієнта зносу і коефіцієнта зайнятості.

Використовуючи метод імітації відпалу [279], для кожного з даних чотирьох сценаріїв зміни зайнятості обладнання можна знайти терміни ремонтів і списань, при яких цільова функція – сумарні середні витрати за одиницю часу роботи даного обладнання в період від початку його експлуатації до списання – будуть мінімальними (табл. 4.3).

Таблиця 4.3 – Оптимальні терміни ремонтів і заміни обладнання, а також значення цільової функції (сумарних середніх витрат за одиницю часу роботи обладнання в період від початку його експлуатації до списання) при різних сценаріях зміни зайнятості

Сценарій зміни зайнятості	Оптимальна кількість ремонтів	Оптимальні терміни ремонтів, кількість років від початку експлуатації	Оптимальні терміни списань, кількість років від початку експлуатації	Оптимальні терміни ремонтів, кількість років напрацювання	Оптимальні терміни списань, кількість років напрацювання	Значення цільової функції, % від вартості нової машини
s_1	2	4,62; 9,76	17,22	2,31; 4,88	8,61	54,549
s_2	1	4,94	10,75	2,46	5,37	50,241
s_3	3	4,93; 10,25; 16,74	27,22	2,46; 5,08; 8,29	13,58	57,773
s_4	2	4,88; 9,96	15,87	2,42; 4,92	7,92	53,150

На рис. 4.15 наведені криві зносу обладнання, а на рис. 4.16 – криві зміни середніх витрат за одиницю часу роботи машини при різних сценаріях зміни його зайнятості і відповідних оптимальних стратегіях ремонтів і замін. Отримані результати показують, що різні сценарії зміни рівня зайнятості вимагають істотно різних стратегій ремонтів і замін обладнання [146]. Але оскільки рівень майбутньої зайнятості обладнання часто достовірно не відомий, заздалегідь вибрати найкращу стратегію ремонтів і заміни машин неможливо. Для оптимального управління процесом ремонтів і замін устаткування необхідно постійно відстежувати тенденції можливих змін рівня завантаження устаткування і відповідно до цього коректувати дати ремонтів і замін. Проте на практиці такий підхід використовується зрідка.

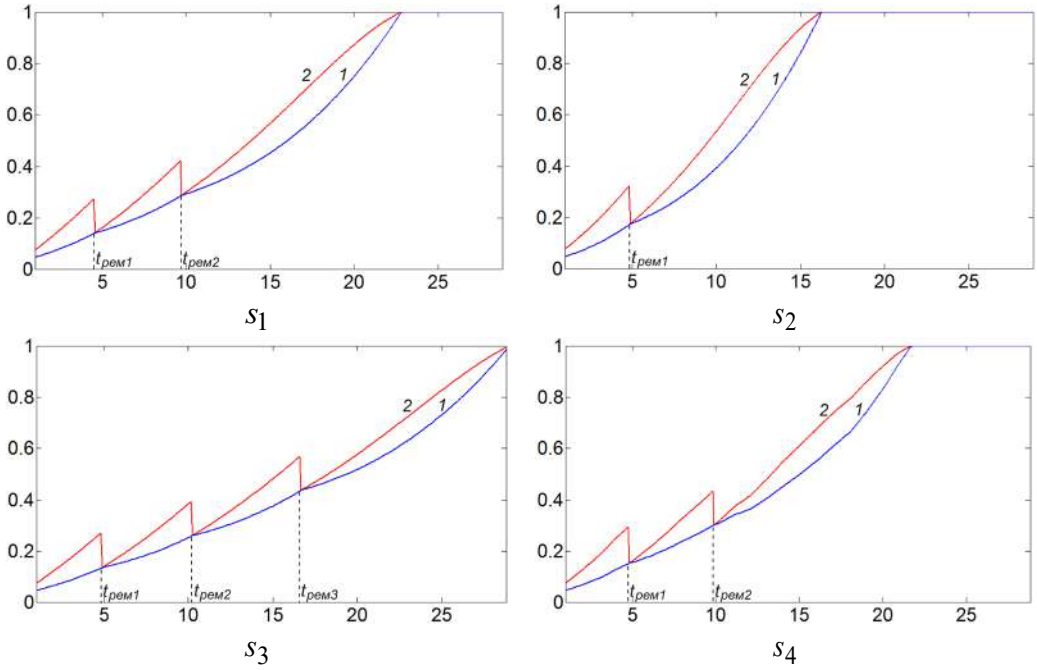


Рисунок 4.15 – Криві зносу обладнання при сценаріях s_1, s_2, s_3 і s_4 і відповідних їм оптимальних стратегіях ремонтів і замін (1 – крива неусувного зносу, 2 – крива загального зносу)

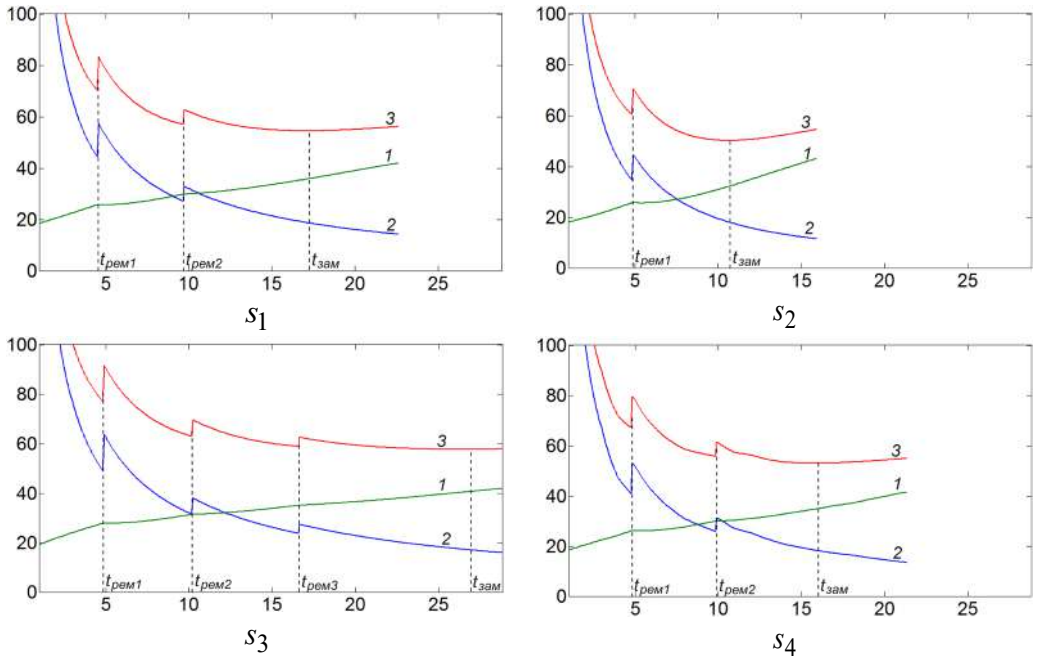


Рисунок 4.16 – Середні витрати на одиницю часу роботи машини при сценаріях s_1, s_2, s_3 і s_4 та відповідних їм оптимальних стратегіях ремонтів і замін (1 – середні експлуатаційні витрати; 2 – середні капітальні витрати; 3 – сумарні середні витрати)

При плануванні ремонтів і замін обладнання на практиці в переважній більшості випадків використовують жорсткий графік ремонтів і замін,

відповідно до якого ремонти і списання машин плануються через певний час після початку експлуатації або після досягнення певного рівня напрацювання. Використання жорсткого графіка легко формалізувати у вигляді виробничих стандартів, для його використання не потрібні додаткові витрати на розвиток інформаційних структур зберігання і аналізу даних на підприємстві. Крім того, в деяких випадках змінювати заздалегідь заплановані терміни ремонтів і списання не бажано з об'єктивних причин. Наприклад, якщо ці терміни зафіксовані в контракті або страховому договорі, або ж якщо це вузько спеціалізоване устаткування, яке виробляється на замовлення, і договори на його купівлю або капітальний ремонт необхідно укладати заздалегідь. Але, привабливість використання жорсткого графіка ремонтів і замін устаткування, очевидно, що його необґрунтоване використання у ряді випадків може призвести до значних фінансових втрат. Оцінимо можливі втрати від використання жорсткої стратегії в прикладі, що розглянутий вище, використовуючи динамічну модель старіння обладнання (4.17). Для обґрунтованого вибору жорсткої стратегії необхідно мати інформацію як про можливі траєкторії зміни коефіцієнта зайнятості, так і про ймовірність їх реалізації.

Припустимо, що розглянуті вище траєкторії зміни коефіцієнта зайнятості s_1, s_2, s_3 і s_4 можуть реалізуватися з ймовірностями $p_1 = 0{,}3$, $p_2 = 0{,}3$, $p_3 = 0{,}2$ і $p_4 = 0{,}2$ відповідно. Тоді за оптимальну стратегію ремонтів і замін слід вважати таку стратегію $\Psi_{унив}$, яка б мінімізувала математичне сподівання сумарних середніх витрат за одиницю часу роботи в період від початку його експлуатації до списання, тобто стратегію, при якій мінімізується сума

$$\sum_{k=1}^{4} p_k \cdot R(s_k, \Psi), \tag{4.18}$$

де $R(s, \Psi)$ – сумарні середні витрати за одиницю часу роботи даного обладнання в період від початку його експлуатації до списання, що

розраховуються за формулами (4.8) – (4.10) при заданій стратегії ремонтів і замін Ψ і функції змінення коефіцієнта зайнятості $s = s(t)$. Розглянемо два способи вибору стратегії: перший спосіб – коли ремонти і списання призначаються після певного фіксованого часу, а другий спосіб – коли ремонти і списання призначаються після певного фіксованого напрацювання. Використовуючи метод імітації відпалу, отримаємо, що для даного прикладу оптимальна за часом стратегія складається з двох ремонтів, які треба проводити через 4,54 і 9,30 років, і заміни через 15,78 років після початку експлуатації обладнання (незалежно від рівня зайнятості обладнання), а відповідне значення виразу (4.18) складає 54,355. Для оптимальної стратегії по напрацюванню ремонти слід проводити після 2,30 і 4,80 років і заміну після 8,70 років напрацювання (незалежно від рівня зайнятості обладнання), а відповідне значення виразу (4.18) складе 53,693. Використовуючи результати обчислень, які наведені в табл. 4.4, можна порівняти ефективність застосування розглянутих стратегій і оптимальних стратегій, що побудовані індивідуально для кожного сценарію зміни коефіцієнта зайнятості.

Таблиця 4.4 – Сумарні середні витрати за одиницю часу роботи обладнання за період від початку його експлуатації до списання при різних сценаріях зайнятості

Сценарій зміни зайнятості	Значення цільової функції при оптимальній стратегії, % від вартості нової машини	Значення цільової функції при стратегії за часом, % від вартості нової машини	Значення цільової функції при стратегії по напрацюванню, % від вартості нової машини	Збиток від застосування жорсткої стратегії за часом за весь термін використання машини, % від вартості нової машини	Збиток від застосування жорсткої стратегії по напрацюванню за весь термін використання машини, % від вартості нової машини
s_1	54,549	54,692	54,555	1,067	0,045
s_2	50,241	51,407	50,374	12,536	1,426
s_3	57,773	59,429	57,892	10,102	0,727
s_4	53,150	53,196	53,179	0,378	0,238

Отримані результати показують, що для даного прикладу використання

часу служби обладнання як основного критерію при плануванні його ремонтів і замін може призвести до значних збитків. Збитки за весь термін експлуатації машини при використанні оптимальної стратегії, яка враховує лише напрацювання обладнання (замість використання стратегій, що складені індивідуально для кожного сценарію зміни коефіцієнта зайнятості) не перевищили 2% від вартості нової машини. Проте, той факт, що вартість нового причального контейнерного перевантажувача складає приблизно 60 мільйонів гривень, ставить під сумнів доцільність використання і цієї стратегії. Використання календарного часу служби обладнання як основного критерію при плануванні його ремонтів і замін допустимо лише для устаткування, яке мало схильне до зносу першого роду. Планування ремонтів і замін на основі напрацювання можливо, коли устаткування мало схильне до зносу другого роду (як в розглянутому прикладі). У разі, коли обладнання схильне до зносу і першого і другого роду, використання будь-яких стратегій при непостійному завантаженні може привести до значних збитків. В цьому випадку економічний ефект від використання методів, запропонованих в даному підрозділі, стає дуже значним. І навіть якщо з тих або інших причин буде ухвалено рішення про планування ремонтів і замін обладнання на підставі стратегії, запропонована вище динамічна модель може бути ефективно використана для з'ясування оптимальних значень параметрів цієї стратегії.

4.5. Розробка методу вибору стратегії ремонтів і завершення проекту використання складного обладнання за умов частково визначеного прогнозу рівня його завантаження

Оскільки головним фактором, що впливає на швидкість фізичного старіння обладнання, є інтенсивність його використання, неможливо планувати проекти ремонтів і замін обладнання без урахування рівня його зайнятості в майбутньому.

Як правило, структура і інтенсивність вантажопотоку планується заздалегідь, однак фактичне надходження вантажу в порт може коливатися щодо запланованих раніше значень. На практиці порт має дуже обмежені можливості активно впливати на інтенсивність і структуру вантажопотоку. Основними факторами формування вантажопотоку є загальний стан економіки країни і її окремих галузей, політична ситуація, зміни в податковому та митному законодавстві і багато інших чинників. І хоча адміністрація порту не може прямо впливати на вантажопотік, вона цілком може з певною точністю прогнозувати тенденції його зміни і приймати управлінські рішення відповідно до цих прогнозів. Неможливо створити одну математичну модель для коректного опису завантаження всіх типів обладнання у всіх можливих ситуаціях. Так, наприклад, якщо основна частка завантаження обладнання залежить від укладання кількох вдалих довгострокових контрактів, то має сенс розглядати лише кілька альтернативних траєкторій зміни коефіцієнта зайнятості обладнання, ймовірності реалізації яких безпосередньо залежать від укладання або неукладання цих контрактів. Зовсім інша ситуація складається в разі, коли завантаження обладнання залежить від великої кількості факторів, які схильні до випадкових змін. В цьому випадку для моделювання змін коефіцієнта зайнятості більше підходить використання відповідного випадкового процесу. Саме цей випадок розглядається в цьому підрозділі і проводиться аналіз того, як дана специфіка зміни рівня зайнятості обладнання впливає на вибір оптимального плану його ремонтів і замін.

В даний час вдалося досягти значних результатів в аналізі показників роботи підприємств різних галузей, що функціонують в умовах невизначеності, [15, 87, 114, 175] і у вивченні процесів старіння обладнання, в тому числі портового, плануванні його ремонтів і замін [215, 179, 190, 220]. Проте, ряд практично важливих питань, що знаходяться на стику цих напрямків, до сих пір залишається недостатньо вивченими. Метою даного підрозділу є розробка методу визначення оптимальних термінів ремонтів і

завершення проекту використання складного обладнання за умов частково визначеного прогнозу рівня його завантаження.

В ідеалі, для знаходження оптимальних термінів ремонтів і замін обладнання в умовах невизначеного вантажопотоку було б добре знати скінченномірні функції розподілу випадкового процесу зміни коефіцієнта зайнятості. Але на практиці така інформація практично ніколи недоступна. У кращому випадку відома лише функція прогнозованого середнього рівня коефіцієнта зайнятості у майбутньому $s_c = s_c(t)$, а також функції $s_в = s_в(t)$ і $s_н = s_н(t)$, що стосуються найбільш оптимістичного і найбільш песимістичного сценарію зміни коефіцієнта зайнятості і є відповідно верхньою і нижньою межами для всіх можливих траєкторій зміни коефіцієнта зайнятості [142]. Крім цього, якщо очікується, що загальна специфіка завантаження в майбутньому не буде змінюватися, може виявитися корисною історія зміни коефіцієнта зайнятості за минулі роки, на підставі якої можна, наприклад, скласти уявлення про такі характеристики, як рівень коливань майбутнього завантаження.

Для прикладу розглянемо випадок, коли значення коефіцієнта зайнятості $s = s(t)$ в майбутньому можуть змінюватися випадковим чином, приймаючи значення між функціями $s_в = s_в(t)$ і $s_н = s_н(t)$, графіки яких представлені на рис. 4.17. І очікується, що в середньому рівень завантаження буде відповідати значенням функції $s_c = s_c(t)$ (рис. 4.17).

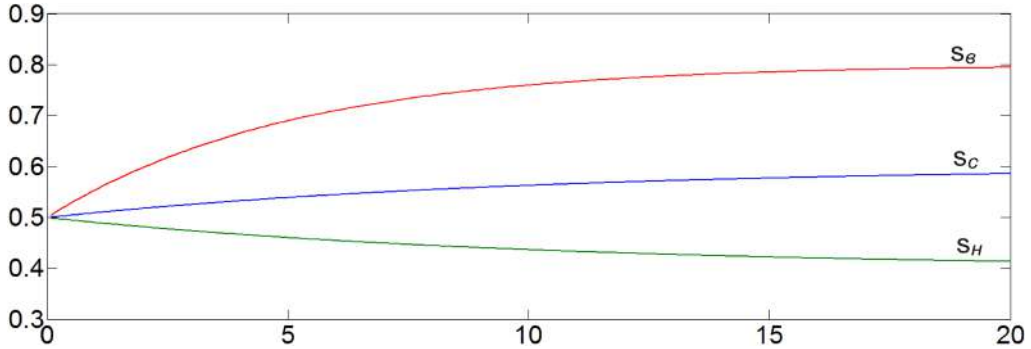


Рисунок 4.17 – Графіки функцій $s_в = s_в(t)$, $s_н = s_н(t)$ і $s_c = s_c(t)$

Для моделювання змін коефіцієнта зайнятості будемо його розглядати

як дифузний випадковий процес $s = s(t, \omega)$, де $\omega \in \Omega$, а $(\Omega, \mathrm{A}, \mathrm{P})$ – ймовірнісний простір. Використання дифузійних випадкових процесів зручно тим, що вони повністю характеризуються своїми функціями зносу і дифузії, які мають наочний фізичний зміст [166]. Функція зносу

$$a(x,t) = \lim_{\tau \to t} \frac{\mathrm{M}\big(s(\tau, \omega) - s(t, \omega) \mid s(t, \omega) = x\big)}{\tau - t} \tag{4.19}$$

виражає швидкість змінення значень випадкового процесу $s = s(t, \omega)$, а функція дифузії

$$b(x,t) = \lim_{\tau \to t} \frac{\mathrm{M}\Big(\big(s(\tau, \omega) - s(t, \omega)\big)^2 \mid s(t, \omega) = x\Big)}{\tau - t} \tag{4.20}$$

відображує швидкість змінення умовної дисперсії. Тому нескладно підібрати їх так, щоб забезпечити випадковому процесу $s = s(t, \omega)$ належні властивості. При наявних функціях знесення і дифузії випадковий процес $s = s(t, \omega)$ може бути виражений за допомогою стохастичної моделі стану в формі Іто:

$$\begin{cases} ds(t, \omega) = a(s(t, \omega), t)dt + \sqrt{b(s(t, \omega), t)}\, dW(t, \omega), \\ s(t_0, \omega) = s_0(\omega), \end{cases} \tag{4.21}$$

де $W(t, \omega)$ – винеровський процес, що виходить з нуля.

Для моделювання випадкового процесу завантаження обладнання розглянемо функції зносу і дифузії такого вигляду:

$$a(x,t) = l \cdot (s_c(t) - x) + s_c'(t), \tag{4.22}$$

$$b(x,t) = q^2 \cdot (s_в(t) - x) \cdot (x - s_н(t)), \tag{4.23}$$

з параметрами $l, q > 0$. Легко перевірити, що при такому виборі функцій зносу і дифузії випадковий процес змінення коефіцієнта зайнятості $s = s(t, \omega)$, що отриманий за допомогою стохастичного диференціального рівняння (4.21), є обмеженим функціями $s_в = s_в(t)$ і $s_н = s_н(t)$ і має математичне сподівання $m_S(t) = s_c(t)$. Дійсно, це випливає з того, що математичне сподівання $m_S(t) \equiv \mathrm{M}(s(t, \omega))$ випадкового процесу $s = s(t, \omega)$ має бути розв'язком задачі Коші

$$\begin{cases} \dfrac{dm_S(t)}{dt} = l \cdot (s_C(t) - m_S(t)) + s'_C(t), \\ m_S(t_0) = s_C(t_0), \end{cases} \tag{4.24}$$

яка виходить зі стохастичної моделі стану в формі Ito (4.21), якщо на неї подіяти оператором математичного сподівання. І оскільки безпосередньою перевіркою легко переконатися в тому, що функція $s_C(t)$ є рішенням рівняння (4.24), отримуємо, що $m_S(t) = s_C(t)$.

Для того, щоб оцінити дисперсію $D_S(t)$ випадкового процесу $s = s(t, \omega)$, що моделюється стохастичною задачею Коші (4.21), розглянемо функцію

$$y(s(t,\omega),t) = s(t,\omega) - m_S(t). \tag{4.25}$$

Очевидно, що

$$\mathrm{M}(y(s(t,\omega),t)) = 0 \quad \text{і} \quad D_s(t) = \mathrm{M}(y^2(s(t,\omega),t)). \tag{4.26}$$

При цьому

$$dy(s(t,\omega),t) = ds(t,\omega) - dm_S(t) =$$

$$= \left(l(s_C(t) - s(t,\omega)) + s'_C(t)\right) dt + q\sqrt{(s_в(t) - s(t,\omega)) \cdot (s(t,\omega) - s_н(t))}\; dW(t,\omega) -$$

$$- \left(l(s_C(t) - m_S(t)) + s'_C(t)\right) dt =$$

$$= -ly(s(t,\omega),t)\, dt + q\sqrt{(s_в(t) - s(t,\omega)) \cdot (s(t,\omega) - s_н(t))}\; dW(t,\omega). \tag{4.27}$$

Використовуючи правило диференціювання Ito (див., наприклад, [330]), отримаємо:

$$d(y^2(s(t,\omega),t)) =$$

$$= \left(-2ly^2(s(t,\omega),t) + q^2(s_в(t) - s(t,\omega))(s(t,\omega) - s_н(t))\right) dt +$$

$$+ 2q\sqrt{(s_в(t) - s(t,\omega)) \cdot (s(t,\omega) - s_н(t))}\; y(s(t,\omega),t)\, dW(t,\omega) =$$

$$= \left(-2ly^2(s(t,\omega),t) + q^2\left(-s^2(t,\omega) + s(t,\omega)(s_в(t) + s_н(t)) - s_в(t)s_н(t)\right)\right) dt +$$

$$+ 2q\sqrt{(s_в(t) - s(t,\omega)) \cdot (s(t,\omega) - s_н(t))}\; y(s(t,\omega),t)\, dW(t,\omega). \tag{4.28}$$

А оскільки

$$\mathrm{M}(s^2(t,\omega)) = D_S(t) + {m_S}^2(t), \tag{4.29}$$

то застосовуючи до рівності (4.28) оператор математичного сподівання, приходимо до задачі Коші для $D_S(t)$:

$$\begin{cases} D_S'(t) = -(2l + q^2)D_S(t) + q^2(s_в(t) - s_C(t))(s_C(t) + s_H(t)), \\ D_S(0) = 0. \end{cases} \tag{4.30}$$

Розв'язавши цю задачу Коші, знаходимо дисперсію

$$D_S(t) = e^{-(2l+q^2)t} q^2 \int_0^t (s_в(\tau) - s_C(\tau))(s_C(\tau) + s_H(\tau)) e^{(2l+q^2)\tau} d\tau. \tag{4.31}$$

Параметри у функціях зносу і дифузії, що задаються формулами (4.19) і (4.20), мають наочний сенс і представляють додаткові можливості для врахування специфіки модельованого процесу завантаження обладнання. Так, параметр l визначає швидкість, з якою траєкторії випадкового процесу $s = s(t, \omega)$ повертаються до математичного сподівання $m_S(t)$. Великим значенням параметру l відповідає таке завантаження обладнання, при якому значення коефіцієнта зайнятості після відхилень мають тенденцію швидко повертатися до своїх середніх значень. Параметр q характеризує інтенсивність коливань випадкового процесу $s = s(t, \omega)$. Великі значення q відповідають значним коливанням рівня завантаження обладнання.

На рис. 4.18 представлено декілька траєкторій випадкового процесу $s = s(t, \omega)$, що є рішенням стохастичної задачі Коші (4.21), з функціями зносу і дифузії, які задані формулами (4.22) і (4.23), та параметрами $l = 0{,}1$ і $q = 0{,}3$. Свобода вибору функцій $s_в = s_в(t)$, $s_H = s_H(t)$ і $s_C = s_C(t)$ створює широкі можливості для врахування особливостей процесу змінення завантаження обладнання, наприклад таких, як можливі сезонні коливання та інші фактори, що пов'язані з даним вантажопотоком [143]. Тепер, маючи математичну модель випадкових змін завантаження обладнання, для того, щоб дослідити вплив цих змін на ефективність обраної стратегії ремонтів і замін обладнання, потрібна модель динаміки старіння обладнання, що враховує змінення рівня його завантаження. В якості такої моделі використовуємо математичну

модель, засновану на поділі усувного і незворотного зносів (4.6) і запропоновану в [131].

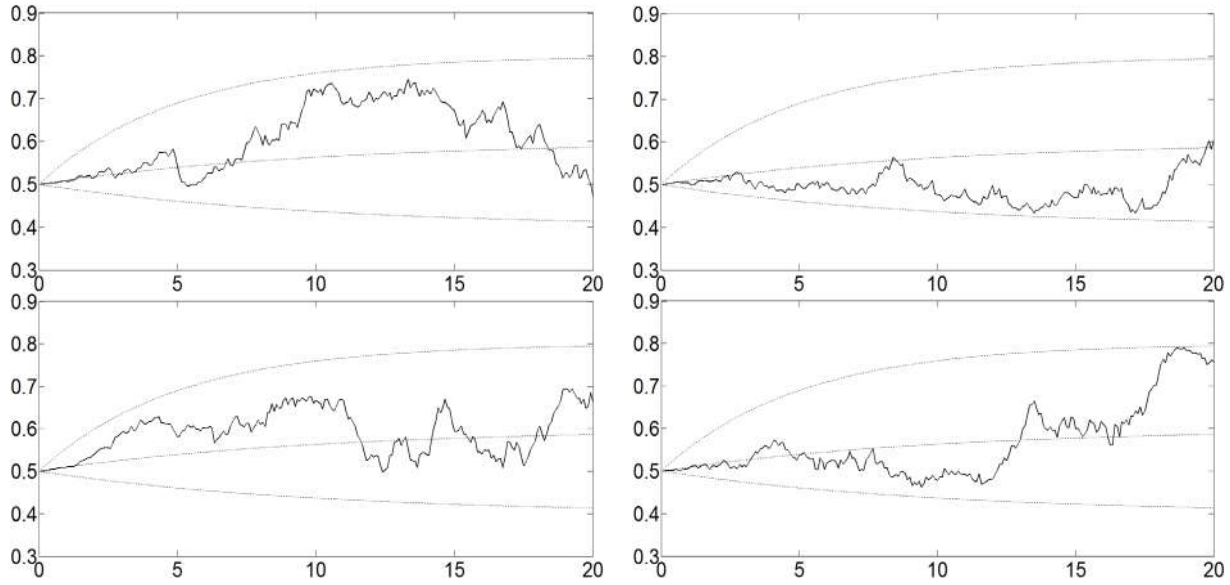


Рисунок 4.18 – Деякі траєкторії випадкового процесу $s = s(t, \omega)$

Розглянемо динаміку зносу, яка є типовою для портових навантажувачів вантажопідйомністю до 3т. Цю криву можна описати за допомогою динамічної моделі (4.7) з наступними значеннями параметрів: $v_1 = 1$, $w_1 = 2$, $L_1 = 0$, $a_1 = 1{,}4$, $b_1 = 1$, $u_{10} = 0{,}1$, $v_2 = 1$, $w_2 = 1{,}02$, $L_2 = 0$, $a_2 = 2{,}8$, $b_2 = 1$, $u_{20} = 0.001$. Всі грошові витрати будемо вказувати у відсотках від поточної вартості нового зразка цього обладнання. У даному підрозділі обмежимося розглядом тільки капітальних ремонтів, виконання яких призводить до зменшення показника усувного зносу до найменшого значення. Будемо вважати, що середня вартість капітального ремонту становить 35% від вартості нового обладнання, річна ставка відсотків дорівнює 4%, а експлуатаційні витрати нового обладнання за одиницю часу роботи при повній зайнятості складають 10% від його вартості і змінюються пропорційно поточним значенням коефіцієнта зносу і коефіцієнта зайнятості.

Використовуючи метод імітації відпалу [279], отримуємо, що для розглянутого обладнання за умови, коли зміна коефіцієнта його зайнятості $s = s(t)$ збігатиметься з функцією $s_c = s_c(t)$, доцільно планувати проведення двох капітальних ремонтів через $t_{рем1} = 4{,}47$ і $t_{рем2} = 8{,}64$ років і списання

через $t_{спис} = 12{,}82$ років після початку використання. Цю стратегію ремонтів і замін обладнання можна вважати оптимальною для даного рівня завантаження, оскільки при ній сумарні середні витрати за одиницю часу роботи обладнання в період від початку експлуатації до списання приймають найменше значення, що дорівнює 40,109. На рис. 4.19 наведені криві зносу обладнання, а на рис. 4.20 – криві змінення середніх витрат за одиницю часу роботи обладнання при даній оптимальній стратегії ремонтів і замін.

Виникає питання: які терміни ремонтів і замін обладнання слід вважати оптимальними, і як їх шукати, якщо майбутні зміни коефіцієнта зайнятості обладнання можна прогнозувати лише з певним ступенем точності? Одним з найбільш природних підходів до вирішення поставленої проблеми є розгляд в якості оптимальної стратегії ремонтів та заміни обладнання такої стратегії $\Psi_{опт}$, яка б мінімізувала математичне сподівання сумарних середніх витрат за одиницю часу роботи обладнання в період від початку його експлуатації до списання, тобто яка б мінімізувала вираз

$$\mathrm{M}\big(R(s(t,\omega),\Psi)\big) = \int_{\Omega} R(s(t,\omega),\Psi)\; P(d\omega)\,, \qquad (4.32)$$

де $R(s,\Psi)$ – сумарні середні витрати за одиницю часу роботи даного обладнання в період від початку його експлуатації до списання, що розраховуються за формулами (4.8) – (4.10) при стратегії ремонтів і замін обладнання Ψ і функції змінення коефіцієнта зайнятості $s = s(t)$ [130]. Для того, щоб обчислити наближене значення зазначеного математичного сподівання, за допомогою стохастичної задачі Коші (4.21) згенеруємо випадкову вибірку траєкторій випадкового процесу завантаження устаткування $s_1(t)$, $s_2(t)$, …, $s_N(t)$ і скористаємося наближеною рівністю

$$\mathrm{M}\big(R(s(t,\omega),\Psi)\big) \approx \sum_{k=1}^{N} \frac{1}{N} \cdot R(s_k(t),\Psi)\,. \qquad (4.33)$$

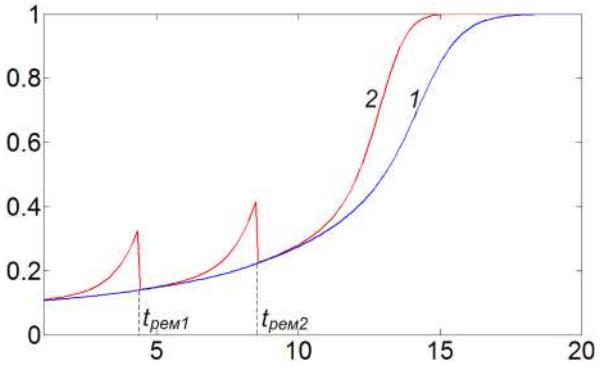


Рисунок 4.19 – Криві зносу обладнання при $s(t) = s_c(t)$
(1 – крива неусувного зносу, 2 - крива загального зносу)

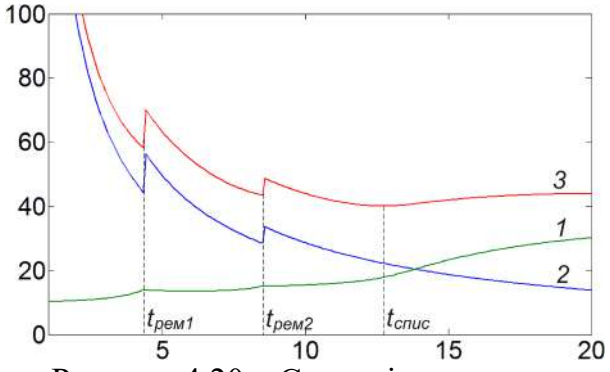


Рисунок 4.20 – Середні витрати за одиницю часу роботи устаткування при $s(t) = s_c(t)$
(1 - середні експлуатаційні витрати; 2 - середні капітальні витрати; 3 - сумарні середні витрати)

Використовуючи алгоритм послідовного квадратичного програмування [324], отримаємо, що для розглянутого прикладу оптимальна стратегія $\Psi_{опт}$ складається з двох ремонтів, що проводяться через 4,46 і 8,45 років, і заміни через 12,51 років після початку експлуатації обладнання, а відповідне їй значення $\mathrm{M}\left(R(s(t,\omega),\Psi_{опт})\right)$ складає 40,456. При цьому оцінка середньоквадратичного відхилення сумарних середніх витрат за одиницю часу роботи обладнання в період від початку його експлуатації до списання $\sigma\left(R(s(t,\omega),\Psi_{опт})\right)$ при випадковій траєкторії коефіцієнта зайнятості та фіксованій стратегії $\Psi_{опт}$ становить 0,391. І хоча стратегія $\Psi_{опт}$ виявилася схожою на оптимальну стратегію, що отримана вище для фіксованої функції коефіцієнта зайнятості $s(t) = s_c(t) = m_s(t)$, вид системи (4.21) не дає підстав стверджувати, що це закономірно. Чим більше обсяг вибірки N, тим статистично точніше буде рівність (4.33). При цьому відзначимо, що навіть значні обсяги вибірки не призводять до суттєвого уповільнення обчислень комп'ютерної реалізації запропонованої математичної моделі. Так, при обсязі вибірки $N = 100$ знаходження оптимальної стратегії $\Psi_{опт}$ в системі Matlab займає приблизно одну хвилину. На рис. 4.21 представлена гістограма значень сумарних середніх витрат за одиницю часу роботи обладнання в період від

початку його експлуатації до списання $R(s_k(t), \Psi_{onm})$ по 1000 траєкторіях змінення коефіцієнту зайнятості $s_1(t)$, $s_2(t)$, …, $s_{1000}(t)$, що згенеровано за допомогою стохастичної задачі Коші (4.21) та фіксованої стратегії Ψ_{onm}.

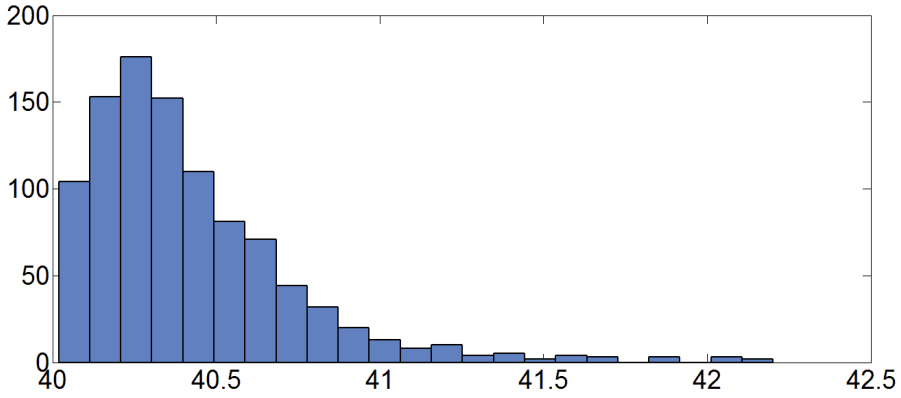


Рисунок 4.21 – Гістограма значень $R(s_k(t), \Psi_{onm})$ при різних траєкторіях змінення коефіцієнта зайнятості та фіксованій стратегії Ψ_{onm}

Зображена на рис. 4.21 гістограма дає уявлення про функції щільності розподілу ймовірностей сумарних середніх витрат за одиницю часу роботи обладнання протягом всієї фази його експлуатації при випадковому вантажопотоці та фіксованій стратегії, що мінімізує математичне сподівання цих витрат [125, 127, 136, 141]. З наведеної гістограми видно, що математичне сподівання зміщене вправо щодо моди через наявність невеликої кількості викидів, які майже рівномірно розподілені між значеннями 41 і 42,3 (права частина гістограми). Наявність цих небажаних викидів пов'язана з ризиком додаткових витрат проекту. У зв'язку з цим в деяких випадках може бути доцільним відмовитися від використання розглядуваної стратегії на користь інших, менш ризикованих стратегій ремонтів і замін обладнання, які б мінімізували ймовірності таких викидів за рахунок незначного збільшення математичного сподівання сумарних середніх витрат за одиницю часу роботи обладнання [122]. Тому великий практичний інтерес представляє подальший розвиток запропонованої моделі для дослідження багатокритеріальних оцінок стратегій ремонтів і замін обладнання, що містяться в наступному підрозділі.

4.6. Використання багатокритеріальних оцінок для зменшення ризиків при плануванні ремонтів і замін складного портового обладнання, що функціонує в умовах неповністю визначеного вантажопотоку

Найважливішим завданням при плануванні проектів розвитку портів, крім забезпечення високого рівня очікуваних економічних показників, є забезпечення стійкості цих показників до можливих змін зовнішніх умов. Це є непростою задачею, оскільки очікувана структура вантажопотоку і його інтенсивність найчастіше носять складний випадковий характер, а зміна виробничих потужностей порту вимагає тривалого часу і великих капіталовкладень. Для того щоб приймати виважені управлінські рішення, необхідно оцінювати не тільки середні очікувані доходи та витрати проектів, а й дослідити ризики, що пов'язані з цими проектами. Тому в деяких випадках має сенс відмовитися від стратегій, що максимізують очікуваний прибуток (або мінімізують очікувані витрати, або максимізують очікуваний дохід) на користь інших стратегій, що мають в середньому трохи гірші очікувані економічні показники, але при цьому пов'язані з меншими ризиками.

Одним з найважливіших факторів, що впливає на швидкість фізичного старіння обладнання, є інтенсивність його використання. Тому великий практичний інтерес представляє побудова математичних моделей, на підставі яких можна було б створювати економічно обґрунтовані плани ремонтів і замін складного портового обладнання і при цьому мінімізувати ризики, які пов'язані з нерівномірністю і неповною визначеністю майбутнього завантаження.

Метою даного підрозділу є побудова математичної моделі, що використовує багатокритеріальні оцінки для пошуку оптимальних стратегій ремонтів і замін складного портового обладнання, що скорочують ризики, які пов'язані з неповною визначеністю вантажопотоку.

В умовах, коли змінення вантажопотоку є випадковими, стратегії ремонтів і замін обладнання, що дають найкращі в середньому економічні показники, можуть бути пов'язані зі значними ризиками, а найкращі в сенсі стабільності і відсутності ризиків стратегії можуть давати далеко не найкращі середні економічні показники. Тому найбільш доцільним і коректним в даній ситуації є пошук найкращих стратегій ремонтів і замін обладнання, що засновані на використанні багатокритеріальних методів оптимізації.

Для подальшого аналізу, перш за все, необхідно вибрати кількісні показники, за допомогою яких буде оцінюватися економічна ефективність і рівень ризиків, що пов'язані з кожною з обраних стратегій ремонтів і замін обладнання в умовах, коли завантаження випадково змінюється. У даному підрозділі в якості показника економічної ефективності будемо розглядати математичне сподівання сумарних середніх витрат за одиницю часу роботи обладнання. В якості показника рівня нестабільності і ризику, що пов'язаний з обраною стратегією ремонтів і замін обладнання в умовах випадково змінюваної інтенсивності завантаження, будемо розглядати корінь p-го ступеня з центрального моменту p-го порядку сумарних середніх витрат за одиницю часу роботи обладнання в період від початку його експлуатації до списання. Вибір порядку p ($p \geq 1$) повинен визначатися ставленням особи, що приймає рішення, до ризику: чим менш бажані значні відхилення середніх витрат за одиницю часу роботи устаткування від середнього значення, тим більші значення p слід обирати.

Використаємо модифікацію математичної моделі, що запропонована в [131]. Відповідно до цієї моделі будемо розглядати показник неусувного зносу $u_1 = u_1(t)$, $(0 \leq u_1 \leq 1)$, що характеризує інтенсивність експлуатаційних витрат в момент часу t при повній зайнятості обладнання, які неможливо або недоцільно зменшити за допомогою ремонтів або модернізацій, а також показник усувного зносу $u_2 = u_2(t)$, $(0 \leq u_2 \leq 1)$, що характеризує інтенсивність експлуатаційних витрат в момент часу t при повній зайнятості

обладнання, які можуть бути зменшені за допомогою ремонтів або модернізацій. Загальний знос будемо розраховувати як суму $u = u_1 + (1 - u_1) \cdot u_2$. Визначені таким чином показники усувного, неусувного і загального зносу додатні і, зростаючи з плином часу, наближаються до свого граничного значення 1. Для спільного моделювання усувного і неусувного зносу розглянемо динамічну модель, що описується системою диференціальних рівнянь (4.17). Як приклад розглянемо криву зміни зносу, яка є типовою для портових контейнерних перевантажувачів. Цю криву можна описати за допомогою динамічної моделі (4.34) з початковими умовами $u_1(0) = 0{,}03$, $u_2(0) = 0{,}001$ і вектором параметрів

$$\overline{\alpha} = (0{,}03;\ 0{,}08;\ 0{,}03;\ 0{,}001;\ 0{,}06;\ 0{,}001;\ 0{,}001;\ 0{,}06;\ 0{,}02;\ 0{,}01;\ 0{,}03;\ 0{,}02).$$

Середні витрати за одиницю часу роботи обладнання в період від початку експлуатації до моменту часу t будемо розраховувати за формулами (4.8)–(4.10). Будемо вважати, що середня вартість капітального ремонту становить 35% від вартості нового обладнання, річна ставка відсотків дорівнює 3%, постійні експлуатаційні витрати за одиницю часу роботи складають 7% від вартості нового обладнання, а змінні експлуатаційні витрати нового обладнання за одиницю часу роботи при повній зайнятості складають 2,8% від його початкової вартості і змінюються пропорційно поточним значенням коефіцієнта зносу і коефіцієнта зайнятості. Якщо коефіцієнт зайнятості буде постійним $s = s(t) \equiv 0{,}5$, то сумарні середні витрати за одиницю часу роботи обладнання в період від початку експлуатації до списання стануть мінімальними, якщо стратегія ремонтів і заміни буде складатися з двох капітальних ремонтів через $t_{рем1} = 4{,}62$ і $t_{рем2} = 9{,}76$ років і заміни через $t_{зам} = 17{,}22$ років після початку експлуатації. Але для всебічного дослідження ефективності обраної стратегії ремонтів і замін складного портового обладнання, яке функціонує в умовах невизначеного завантаження, не можна обмежуватися розглядом лише однієї усередненої траєкторії змінення коефіцієнта зайнятості. Необхідно враховувати специфіку процесу

випадкових змін вантажопотоку. В одній математичної моделі неможливо врахувати всі особливості і умови експлуатації різних типів обладнання. Однак в ряді випадків, коли на зміну рівня завантаження устаткування впливає багато випадкових, мало пов'язаних між собою факторів, для моделювання процесу завантаження устаткування можна використовувати дифузійний випадковий процес. На практиці, як правило, відома функція очікуваного середнього рівня коефіцієнта зайнятості $s_c = s_c(t)$, функції $s_в = s_в(t)$ і $s_н = s_н(t)$, що відповідають найбільш оптимістичним і найбільш песимістичним сценаріям зміни коефіцієнта зайнятості і є відповідно верхньою і нижньою межами для всіх можливих траєкторій змінення коефіцієнта. Для моделювання змінення коефіцієнта зайнятості будемо розглядати дифузний випадковий процес $s = s(t,\omega)$, який є рішенням стохастичної моделі стану в формі Іто (4.21). На рис. 4.22 пунктиром зображені деякі траєкторії випадкового процесу $s = s(t,\omega)$, що є рішенням стохастичної задачі Коші (4.21) з функціями зносу і дифузії, які задані формулами (4.22) і (4.23), і параметрами $l = 0{,}1$ та $q = 0{,}3$. Суцільними лініями зображені функції $s_c = s_c(t)$, $s_в = s_в(t)$ та $s_н = s_н(t)$.

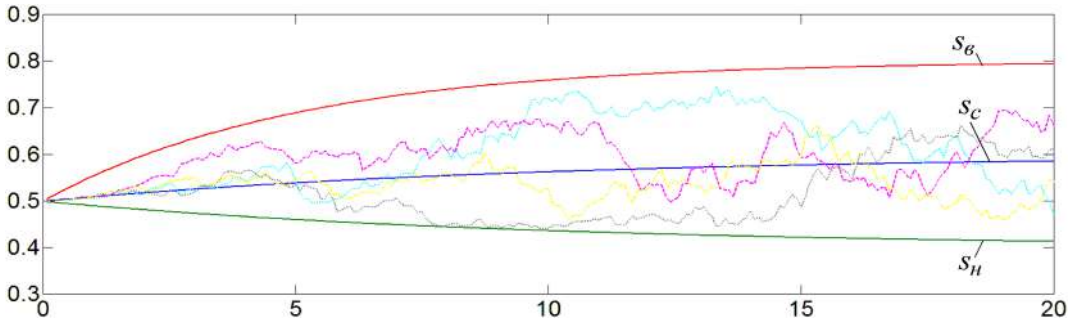


Рисунок 4.22 – Деякі траєкторії випадкового процесу $s = s(t,\omega)$

Тепер, маючи математичну модель для опису випадкового процесу зміни завантаження устаткування і модель для оцінки сумарних середніх витрат за одиницю часу роботи обладнання при різних сценаріях змінення коефіцієнта зайнятості, перейдемо до дослідження задачі багатокритеріальної оптимізації при виборі стратегії ремонтів і замін обладнання [118, 120, 134]. Позначимо

через Ψ множину всіх допустимих стратегій ремонтів і замін обладнання. Тоді задачу багатокритеріальної оптимізації можна записати у вигляді

$$\underset{\psi\in\Psi}{\text{minimize}}\,\overline{F}(\psi), \tag{4.34}$$

де $\overline{F}(\psi)=\left(F_1(\psi),F_2(\psi)\right)$ – векторна цільова функція, перша координата якої є функцією

$$F_1(\psi)=\mathrm{M}\left[R(s(t,\omega),\psi)\right]=\int_{\Omega}R(s(t,\omega),\psi)\,P(d\omega), \tag{4.35}$$

що виражає залежність математичного сподівання сумарних середніх витрат за одиницю часу роботи обладнання в період від початку експлуатації до списання $R(s(t,\omega),\psi)$ від стратегії його ремонтів і замін ψ. Друга координата

$$F_2(\psi)=\left(\mu_p\left[R(s(t,\omega),\psi)\right]\right)^{\frac{1}{p}}=\left(\mathrm{M}\left[\left(R(s(t,\omega),\psi)-\mathrm{M}\left[R(s(t,\omega),\psi)\right]\right)^p\right]\right)^{\frac{1}{p}} \tag{4.36}$$

є функцією, що виражає корінь p-го ступеня з центрального моменту p-го порядку сумарних середніх витрат за одиницю часу роботи обладнання в період від початку його експлуатації до списання. Зокрема, при $p=2$ функція $F_2(\psi)$ виражає середньоквадратичне відхилення сумарних середніх витрат за одиницю часу роботи обладнання: $F_2(\psi)=\sigma\left[R(s(t,\omega),\psi)\right]$.

Оскільки $\overline{F}(\psi)=\left(F_1(\psi),F_2(\psi)\right)$ – векторна функція, то компоненти $F_1(\psi)$ і $F_2(\psi)$ є конкуруючими і в загальному випадку не існує єдиного рішення поставленої задачі (4.34). Тому вводиться концепція множини точок непокращуваних рішень [172] (так звана оптимальність по Парето). Непокращуваним рішенням є таке рішення, в якому поліпшення в одній з цілей призводить до деякого погіршення іншого. Більш строго визначення непокращуваної стратегії ремонтів і замін обладнання можна сформулювати наступним чином: стратегія $\psi^*\in\Psi$ є непокарщуваною, якщо для деякого околу $\mathrm{U}(\psi^*)$ не існує таких стратегій $\psi\in\mathrm{U}(\psi^*)$, що

$$F_1(\psi)\le F_1(\psi^*),\ F_2(\psi)\le F_2(\psi^*)\ \text{і}$$

$$F_k(\psi)<F_k(\psi^*),\ \text{для}\ k=1\ \text{або}\ k=2. \tag{4.37}$$

Очевидно, що для використання на практиці представляють інтерес тільки непокращувані стратегії. Множину непокращуваних стратегій ремонтів і замін обладнання можна наочно зобразити, якщо обмежитися розглядом стратегій, що складаються тільки з одного ремонту і списання. Для цього достатньо на одному графіку (рис. 4.23) побудувати лінії рівня функцій F_1 та F_2. Далі, будемо розглядати $F_2(\psi) = \sigma\left[R(s(t,\omega),\psi)\right]$. На рис. 4.23 по осі абсцис відкладені терміни списання обладнання, а по осі ординат – терміни ремонту. Лінії рівня функції F_2 зображені пунктиром, а лінії рівня функцій F_1 – суцільні. По лініях рівня на рис. 4.23 можна побачити, що в точках A_1, A_2, …, A_5 і у всіх інших точках кривої, що відмічена жирною лінією, градієнти функцій F_1 і F_2 протилежно спрямовані, а значить, кожна точка на цій кривій відповідає певній непокращуваній стратегії.

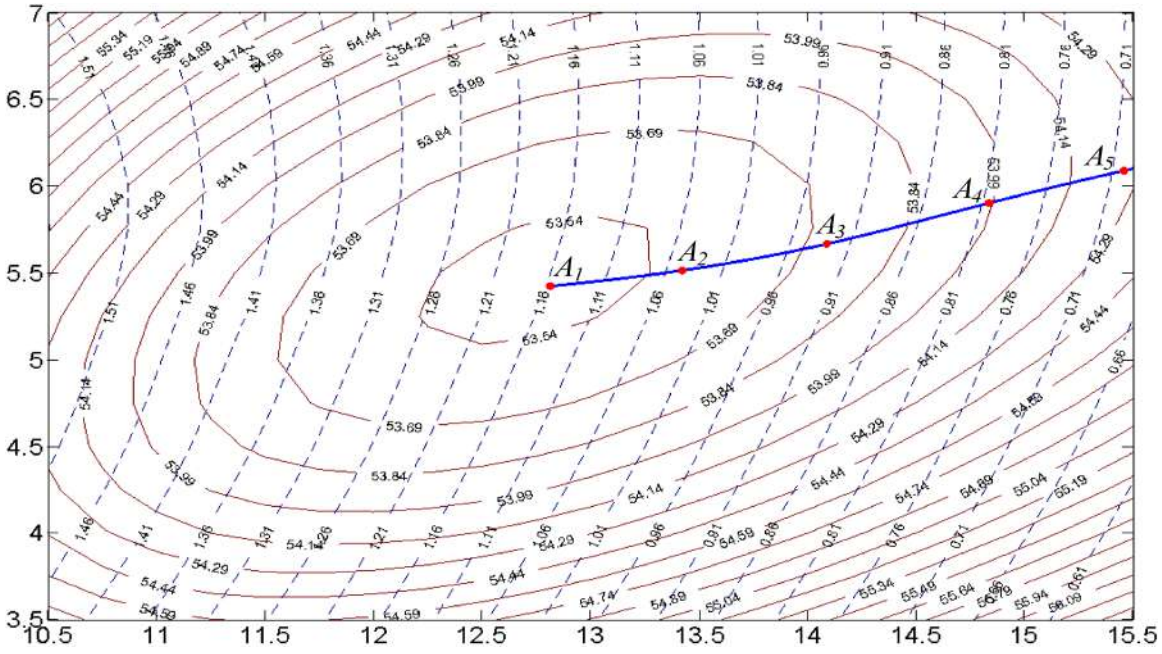


Рисунок 4.23 – Лінії рівня функцій F_1 та F_2 і крива, точки якої відповідають непокращуваним стратегіям

В табл. 4.5 наведені непокращувані стратегії, що відповідають точкам A_1, A_2, …, A_5, і відповідні їм значення цільових функцій F_1 та F_2. На рис. 4.24 представлена крива точок непокращуваних значень цільових функцій при відповідних оптимальних стратегіях ремонту і заміни обладнання. Уздовж осі

абсцис відкладені значення функції F_1, а вздовж осі ординат – значення функції F_2.

Таблиця 4.5 – Деякі непокращувані стратегії, що складаються з одного ремонту і списання, і відповідні значення цільових функцій

Точки, що відповідають непокращуваним стратегіям	Параметри непокращуваних стратегій ψ		Значення цільових функцій	
	Терміни ремонту	Терміни списання	$F_1(\psi)=\mathrm{M}[R(s(t,\omega),\psi)]$	$F_2(\psi)=\sigma[R(s(t,\omega),\psi)]$
A_1	5,42	12,81	53,502	1,168
A_2	5,51	13,42	53,549	1,061
A_3	5,66	14,08	53,701	0,940
A_4	5,90	14,83	53,950	0,817
A_5	6,08	15,45	54,236	0,707

Рис. 4.23 і 4.24 зручні для сприйняття і дають особі, що приймає рішення, достатньо інформації, яка значно полегшує вибір однієї з низки знайдених непокращуваних стратегій. У загальному випадку, коли стратегії ремонтів і замін можуть містити більше одного ремонту, відобразити рішення задачі багатофакторної оптимізації в такому наочному вигляді неможливо.

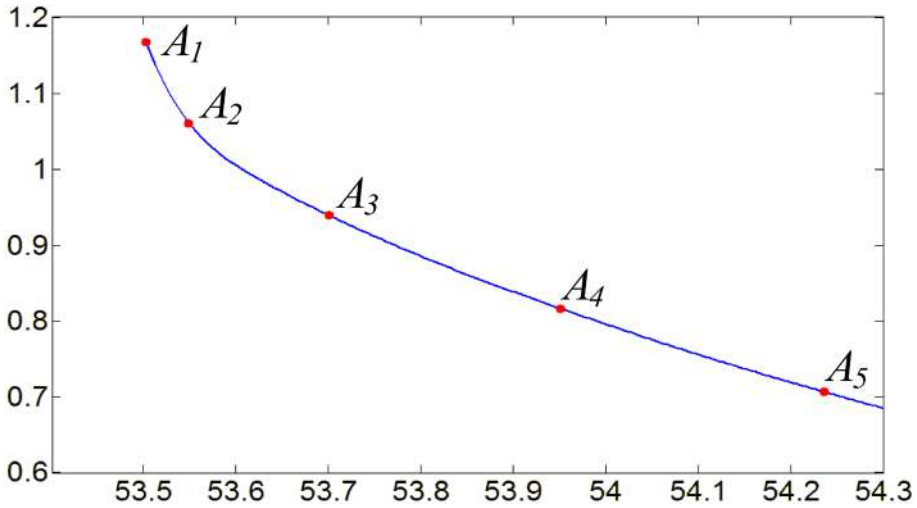


Рисунок 4.24 – Крива непокращуваних значень в разі одного ремонту при відповідних оптимальних стратегіях ремонту і заміни обладнання

Існує ряд аналітичних методів знаходження множини непокращуваних рішень. Найбільш простим серед них є метод, відповідно до якого багатокритеріальна задача мінімізації вектора $\overline{F}(\psi)=\left(F_1(\psi),F_2(\psi)\right)$ зводиться

до скалярної задачі шляхом побудови зваженої суми його координат, і далі до отриманої скалярної задачі застосовується один із стандартних алгоритмів оптимізації. Однак в разі, коли межа множини значень вектор-функції $\overline{F}(\psi)$ не є опуклою, знаходження всієї множини непокращуваних стратегій з використанням даного методу може виявитися неможливим. Оскільки для розглянутої вектор-функції $\overline{F}(\psi)$ досить складно досліджувати опуклість її множини значень, то для пошуку множини непокращуваних стратегій можна використати так званий метод досягнення мети [267]. В рамках даного методу особі, що приймає рішення, необхідно вибрати множину намірів $\overline{F}^* = \left(F_1^*, F_2^*\right)$, яка зв'язана з множиною цілей $\overline{F}(\psi) = \left(F_1(\psi), F_2(\psi)\right)$. Таке формулювання задачі допускає те, що цілі можуть бути як недовиконаними так і перевиконаними, і це дозволяє особі, що приймає рішення, легко висловити вихідні наміри. Відносна ступінь недовиконання або перевиконання поставлених намірів контролюється за допомогою вектора вагових коефіцієнтів $\overline{\alpha} = (\alpha_1, \alpha_2)$ і може бути представлена як стандартна задача оптимізації такого вигляду:

$$\begin{aligned} &\underset{\gamma \in R,\ \psi \in \Psi}{\text{minimize}}\, \gamma, \\ &\textit{при умові, що} \\ &F_k(\psi) - \alpha_k \gamma \le F_k^*, \quad k = 1, 2. \end{aligned} \tag{4.38}$$

Ваговій вектор $\overline{\alpha}$ дає особі, що приймає рішення, можливість досить точно висловити міру взаємозв'язку між двома цілями. На рис. 4.25 представлена геометрична інтерпретація даного методу. На рис. 4.25 заштрихована область схематично зображує множину значень вектор-функції $\overline{F}(\psi)$ (так звана множина досяжних значень критеріїв), а частина її межі, що виділена жирною лінією, утворює шукану множину непокращуваних критеріальних точок (так звану множину Парето або паретову межу). Визначення компонент намірів $\left(F_1^*, F_2^*\right)$ визначає точку намірів A. Ваговій вектор $\overline{\alpha}$ задає напрямок пошуку від точки A в бік множини досяжних значень

критеріїв. В процесі пошуку рішення задачі (4.35) відбувається зміна величини γ і рух межі обмежень до точки $B = (F_{1B}, F_{2B})$ множини Парето. Задачу (4.3) можна звести до задачі знаходження мінімакса

$$\underset{\psi \in \Psi}{\text{minimize}} \max_{k} \left\{ \frac{F_k(\psi) - F_k^*}{\alpha_k} \right\} \tag{4.39}$$

і розв'язати за допомогою методів нелінійної оптимізації. Такий підхід дозволяє досліджувати множину Парето у випадку будь-якої кількості критеріїв і будь-якої розмірності простору рішень. Використовуючи цей підхід, опишемо множину непокращуваних стратегій ремонтів і замін обладнання та відповідну множину Парето при довільній кількості ремонтів.

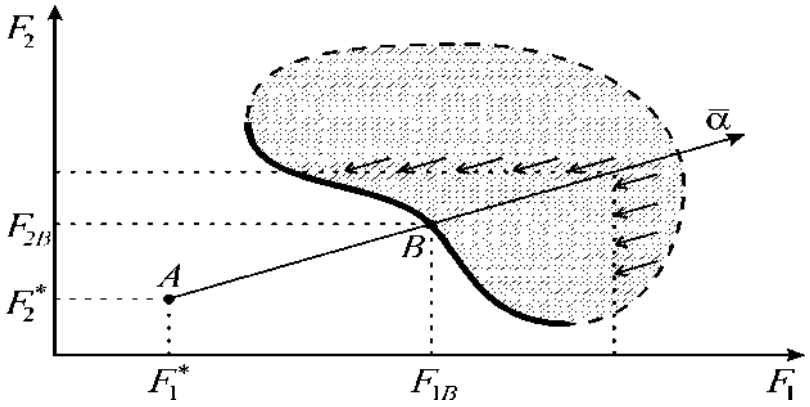


Рисунок 4.25 – Геометрична інтерпретація методу досягнення мети

На рис. 4.26 представлено множину Парето, при цьому уздовж осі абсцис відкладені математичні сподівання сумарних середніх витрат за одиницю часу роботи обладнання в період від початку експлуатації до списання, а по осі ординат – середньоквадратичне відхилення сумарних середніх витрат [144]. У табл. 4.6 представлені значення критеріїв для деяких точок на паретовій межі (рис. 4.26) і відповідні їм рішення, за якими можна скласти уявлення про множину непокращуваних стратегій ремонтів і замін обладнання. Проаналізуємо розташування паретових меж при різній фіксованій кількості ремонтів обладнання [128]. На рис. 4.27 зображені паретові межі для випадків, коли застосовуються тільки стратегії, що складаються з одного, двох і трьох ремонтів. Маркерами на рис. 4.27 позначені ті ж точки B_1, …, B_8, що і на рис. 4.26.

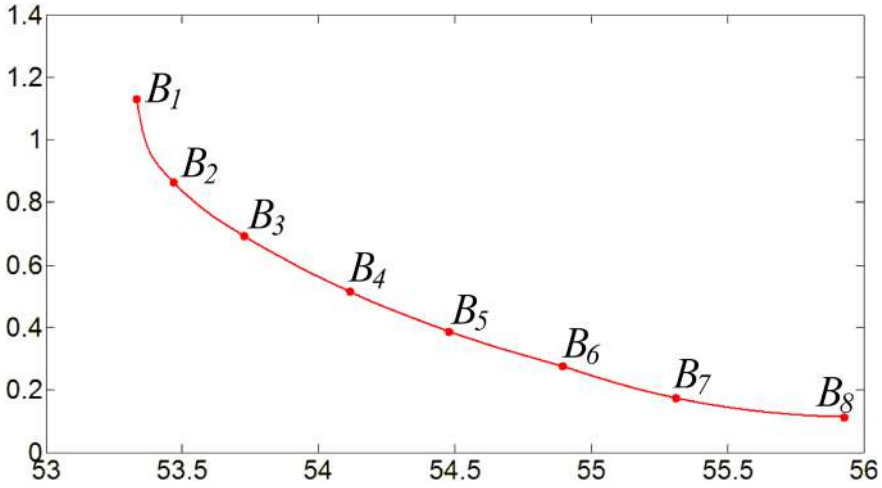


Рисунок 4.26 – Крива точок непокращуваних значень цільових функцій для довільної кількості ремонтів при відповідних оптимальних стратегіях ремонту і заміни обладнання

Таблиця 4.6 – Деякі непокращувані стратегії, що складаються з довільної кількості ремонтів, і відповідні значення цільових функцій

Точки, що відповідають непокращуваним стратегіям	Параметри непокращуваних стратегій ψ		Значення цільових функцій	
	терміни ремонтів	терміни списання	$F_1(\psi) = \mathrm{M}[R(s(t,\omega),\psi)]$	$F_2(\psi) = \sigma[R(s(t,\omega),\psi)]$
B_1	4,38; 4,71	15,75	53,334	1,129
B_2	4,58; 5,12	17,09	53,469	0,862
B_3	4,69; 5,52	18,11	53,729	0,693
B_4	4,80; 5,89	19,17	54,116	0,515
B_5	4,98; 6,23	20,08	54,479	0,387
B_6	4,17; 4,60; 5,86	23,14	54,894	0,275
B_7	4,26; 4,74; 6,57	24,56	55,310	0,174
B_8	4,43; 4,97; 7,02	25,02	55,928	0,113

Таким чином, легко бачити, що крива, що зображена на рис. 4.26, складається з частин кривих 2 і 3, які зображені на рис. 4.27. Той факт, що шукана паретова межа може бути представлена як сукупність частин паретових меж, які є рішеннями більш простих задач з фіксованою кількістю ремонтів, може бути використаний при аналізі рішень вихідної багатокритеріальної задачі. Разом з тим, така структура паретової межі може потенційно призводити до її неопуклості і розривів. Тому дослідження

властивостей множини Парето для розглянутої задачі представляє окремий інтерес.

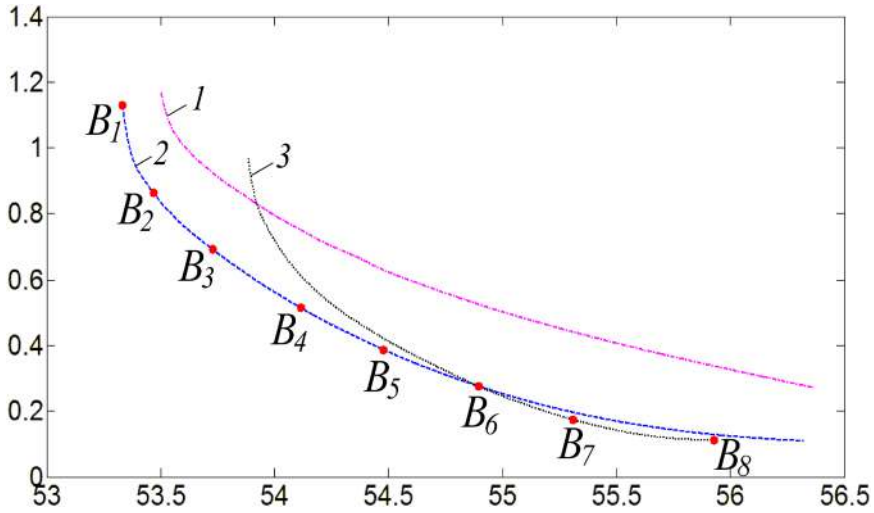


Рисунок 4.27 – Криві непокращуваних значень при відповідних оптимальних стратегіях ремонтів і замін обладнання.

1 - при одному ремонті; 2 - при двох ремонтах; 3 - при трьох ремонтах

На практиці часто буває так, що сильне перевищення запланованого рівня витрат, навіть якщо це перевищення має малу ймовірність, більш небажано для особи, яка приймає рішення, чим дуже ймовірні, але незначні відхилення від середнього очікуваного рівня витрат. Для того, щоб краще контролювати саме великі перевищення середнього рівня витрат, в розглянутій вище моделі в якості опції $F_2(\psi)$ слід вибирати центральні моменти високих порядків.

Результати досліджень показали (табл. 4.6 і рис. 4.27), що в розглянутому прикладі стратегії з великою кількістю ремонтів виявилися не надто ефективними, проте більш стабільними. При моделюванні ми допускали можливість покращення стану обладнання за допомогою капітальних ремонтів до максимально можливого рівня з одиничною ймовірністю. На практиці, в деяких випадках ремонти можуть покращувати стан обладнання лише з певною ймовірністю, істотно меншою одиниці. У цих випадках може виявитися, що планування більшої кількості ремонтів, навпаки, буде пов'язане з більшою невизначеністю і фінансовими ризиками. Однак і в цих випадках

запропонована вище математична модель може бути ефективно використана для знаходження непокращуваних стратегій ремонтів і замін обладнання.

Запропонований в даному підрозділі метод можна використовувати не тільки для зменшення середньоквадратичного відхилення або центральних моментів більш високих порядків, але і для врахування інших показників, наприклад, для зменшення ймовірності перевищення заданого рівня витрат. Також можна розглядати задачі з трьома і більше цільовими функціями, однак в цьому випадку доведеться зіткнутися зі значними труднощами при візуалізації паретової межі.

4.7. Оцінка коливань показників ефективності проектів інноваційного розвитку транспортної інфраструктури, що функціонує в умовах мінливого завантаження

Експлуатаційні характеристики обладнання, як правило, погіршуються через старіння та знос. Фізичний знос призводить до збільшення кількості поломок і зростання поточних витрат на обладнання. В результаті настає час, коли стає доцільним оновити обладнання. Визначальним фактором при прийнятті рішення щодо заміни обладнання, зазвичай, є те, наскільки ефективним може бути його подальше використання. На практиці часто буває так, що технічний стан обладнання дозволяв би його подальше використання протягом ще тривалого часу при належних ремонтах і технічному обслуговуванні, але, тим не менш, це обладнання замінюється на нове з міркувань ефективності.

Завершення проекту використання обладнання може бути обумовленим як фізичним, так і моральним зносом. В цьому підрозділі розглядається тільки фізичний знос обладнання. При плануванні обґрунтованих строків завершення проекту використання складного обладнання важливо брати до уваги не тільки середньоочікувані показники ефективності, але і стійкість цих показників до можливих коливань, що спричинені випадковими змінами рівня завантаження

обладнання. Останніми роками структура та інтенсивність вантажопотоків через українські порти зазнала суттєвих змін та має тенденцію коливатися і надалі. Тому є актуальним питання обґрунтування стратегій оновлення та розвитку парків перевантажувального обладнання, яке має функціонувати в умовах нестійкого рівня завантаження.

Планування термінів замін обладнання через його фізичний знос є актуальною і в багатьох випадках непростою проблемою, вивченню якої присвячено багато наукових робіт. Є різні підходи до дослідження цієї проблеми. Наприклад, для простого масового обладнання досить ефективними є методи, що базуються на використанні кривих виживаності [317]. Для складного ремонтопридатного обладнання зазвичай використовуються більш складні методи.

Існує низка моделей технічного обслуговування і заміни обладнання. Умовно ці моделі можна поділити за типами політик обслуговування: політики заміщення за віком або за напрацюванням, політики групових замін, політики періодичного профілактичного обслуговування, тощо. Кожен вид політики має свою специфіку, свої переваги і недоліки. В огляді [367] узагальнюється, класифікується і порівнюється низка існуючих політик обслуговування як для одноблокових, так і для багаторівневих систем. Також вивчаються зв’язки між різними політиками технічного обслуговування.

В [282] була розглянута проблема вибору оптимальної політики профілактичного обслуговування та запланованої дати продажу обладнання. Передбачалося, що продуктивність машини не залежить від віку, але з віком зростає ймовірність відмови машини. При цьому профілактичне обслуговування може бути застосовано для зниження ймовірності відмови машини.

В роботі [376] порівнюються і аналізуються деякі політики заміни обладнання, що виконуються через задані проміжки часу і при заданій загальній кількості ремонтів.

В роботах [315, 363] досліджуються задачі CBM (condition-based maintenance) оптимізації. Так, в роботі [363] розглянуто загальні проблеми якості даних, що використовуються при аналізі CBM задач, та запропоновано шляхи вирішення. Зокрема, розглянуто підходи до оцінки відсутніх даних в аналізі рішень і запропоновано структуру даних для управління інформацією з обслуговування обладнання, яка необхідна для прийняття рішень, що базуються на CBM. В роботі [315] досліджено задачу знаходження оптимальної стратегії ремонтів і замін обладнання. Результати досліджень засновані на використанні динамічної моделі старіння обладнання. В [256] досліджуються питання прийняття рішень про заміну машин за допомогою оптимальної моделі управління, яка враховує випадкові фактори виходу машин з ладу. В своїх дослідженнях автори відштовхувалися від відомої моделі [282]. Також в цій роботі врахована можливість технологічних поліпшень використовуваного обладнання. В [231, 232] розглядаються питання координації операцій з технічного обслуговування обладнання зі стратегіями капіталовкладень при наявності можливих випадкових збоїв обладнання. В цих роботах, на відміну від традиційного підходу, що запропонований в праці [282], стохастичний процес відмов машини моделюється явно. Таким чином, завдання вибору оптимальних стратегій замін обладнання зводиться до аналізу моделі стохастичного динамічного програмування. Також в [231] розглянуто питання резервування виробничих потужностей, проведено порівняння детермінованих політик замін обладнання і політик, що залежать від стану машин. Крім того, досліджено вплив погіршення продуктивності, технологічних поліпшень і можливих затримок в реалізації рішень, а також вплив ставки дисконтування на оптимальну політику управління парком машин. В [374] автори розглядають проблему заміни однієї машини і зводять до нелінійного інтегрального рівняння для оптимального терміну служби машини.

Проблеми оптимізації структури парку портового обладнання, яке функціонує в умовах мінливої інтенсивності вантажопотоку, і оптимізації

системи доставки вантажів розглянуто в [297, 298]. В цих роботах запропоновано імітаційні моделі, що дозволяють оцінювати ефективність різних схем доставки вантажів і оптимізувати склад парку портового обладнання.

Рішення про терміни заміни обладнання залежать від таких факторів, як рівень поточних операційних витрат і витрат на заміну, а також продуктивності, надійності і безпеки існуючого і нового обладнання. Однак прогнози, які пов'язані з цими факторами, зазвичай не є цілком визначеними і не завжди легко піддаються об'єктивній оцінці. В роботі [227] обговорюються можливі суб'єктивні підходи до оцінки невизначеності, які можуть бути використані в якості основи для прийняття рішення про заміну обладнання.

Подальшого вивчення потрібує питання обґрунтування термінів замін складного обладнання з огляду на нестійкість рівня його завантаження. В роботах, наведених вище, викладено різні варіанти постановки задачі щодо обґрунтування термінів заміни обладнання і запропоновано різні методи і моделі, що спрямовані на її рішення. Але кожен із запропонованих в даних роботах підходів спрямований на дослідження якогось одного окремого випадку та при певних умовах або обмеженнях. Методи, запропоновані в наведених роботах, не дозволяють достатньо повно досліджувати проблему обґрунтування термінів замін складного обладнання з урахуванням нестійкості рівня його завантаження. Зокрема, всі вони не дозволяють встановити кількісні співвідношення між середнім рівнем показників ефективності устаткування, рівнем коливань цих показників при можливих випадкових коливаннях завантаження і терміном заміни обладнання.

Метою даного підрозділу є дослідження динаміки середніх показників ефективності обладнання та коливань цих показників з плином часу, а також розробка методу обґрунтування термінів заміни складного обладнання з врахуванням нестійкості інтенсивності завантаження.

Для досягнення поставленої мети вирішуються наступні задачі:

– розробити математичну модель оцінювання динаміки середніх значень та коливань показників ефективності функціювання складного обладнання, яка б враховувала випадкові коливання завантаження обладнання;

– розрахувати межі інтервалів можливих значень сумарних середніх витрат за одиницю часу роботи обладнання в період від початку його експлуатації до списання;

– встановити кількісні співвідношення між середнім рівнем показників ефективності обладнання, рівнем коливань цих показників при можливих випадкових коливаннях завантаження та терміном заміни обладнання.

Нехай коефіцієнт зайнятості обладнання $s=s(t)$ змінюється випадковим чином, приймаючи значення між функціями $s_в=s_в(t)$ та $s_н=s_н(t)$, $s_н(t)<s(t)<s_в(t)$, а середній рівень коефіцієнта зайнятості в кожен момент часу t дорівнює $s_c=s_c(t)$. Зміни коефіцієнта зайнятості будемо описувати за допомогою дифузійного випадкового процесу $s=s(t, \omega)$, де $\omega\in\Omega$, а (Ω, A, P) – ймовірнісний простір.

Для моделювання випадкового процесу завантаження обладнання розглянемо функцію зсуву $a(x,t)$, що визначається формулою (4.22) та функцію дифузії $b(x,t)$, що визначається формулою (4.23). За наявних функціях зсуву і дифузії випадковий процес $s=s(t, \omega)$ може бути виражений за допомогою стохастичної моделі стану у формі Іто (4.21).

Можна показати [124], що при такому виборі функцій зсуву і дифузії випадковий процес змінення коефіцієнта зайнятості $s = s(t,\omega)$, який отримано за допомогою стохастичного диференціального рівняння (4.21), є обмеженим функціями $s_t = s_t(t)$ і $s_b = s_b(t)$ та має математичне сподівання $E(s(t,\omega)) = s_c(t)$.

Для того, щоб показати, що коефіцієнт зайнятості $s(\tau,\omega)$, отриманий за допомогою стохастичного диференціального рівняння (4.21), є обмеженим функціями $s_t = s_t(t)$ та $s_b = s_b(t)$, достатньо дослідити умовну функцію щільності ймовірностей випадкового процесу $s(\tau,\omega)$.

Як відомо, наприклад з [50], умовна функція щільності ймовірностей $f(t,x,\tau,y)$ випадкового процесу $s(t,\omega)$, що розглядається як функція кінцевого стану (τ,y), задовольняє рівняння Колмогорова-Фоккера-Планка

$$\frac{\partial f}{\partial \tau}+\frac{\partial}{\partial y}\big(a(y,\tau)\cdot f\big)-\frac{1}{2}\cdot\frac{\partial^2}{\partial y^2}\big(b(y,\tau)\cdot f\big)=0 \qquad (4.40)$$

Це диференціальне рівняння є рівнянням в частинних похідних параболічного типу. Існують різні підходи до розв'язку рівнянь такого типу з різними початковими та граничними умовами. Деякі з них спрямовані на отримання розв'язку в явному вигляді і засновані на використанні інтегральних перетворень і методі Фур'є розділення змінних. Деякі – орієнтовані на використання чисельних методів.

Нехай, $s_t=const$ та $s_b=const$. Щоб переконатися в тому, що випадковий процес $s(\tau,\omega)$ при будь-якому $\tau>0$ з ймовірністю 1 знаходиться між значеннями s_t і s_b, достатньо перевірити, що

$$\int_{s_b}^{s_t} W(\tau,y)dy=1 \text{ для будь-якого } \tau>0, \qquad (4.41)$$

де $W(\tau,y)$ – умовна функція щільності ймовірностей того, що в початковий момент часу $t_0=0$ випадковий процес знаходиться в точці $s_0=s_c(t_0)$ і на протязі часу $(0,\tau)$ жодного разу не виходить з діапазону значень (s_b,s_t). Функція $W(\tau,y)$ є розв'язком рівняння (4.40) з відповідною початковою та граничними умовами:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial W(\tau,y)}{\partial \tau}+\dfrac{\partial}{\partial y}\big(a(y,\tau)\cdot W(\tau,y)\big)- \\ \qquad -\dfrac{1}{2}\cdot\dfrac{\partial^2}{\partial y^2}\big(b(y,\tau)\cdot W(\tau,y)\big)=0, \quad \tau>0, \quad y\in(s_b,s_t) \\ W(0,y)=\delta(y-s_0), \\ W(\tau,s_b)=0, \\ W(\tau,s_t)=0, \end{cases} \qquad (4.42)$$

де $\delta(x)$ – δ-функція Дірака; $W(0,y)=\delta(y-x_0)$ – початкова умова, яка відображає те, що в початковий момент часу випадковий процес $s(\tau,\omega)$

знаходився в точці s_0 $(s_b < s_0 < s_t)$; $W(\tau, s_b) = 0$ і $W(\tau, s_t) = 0$ – граничні умови, які визначають діапазон випадкового процесу $s(\tau, \omega)$.

Для випадку, коли функції $s_t = s_t(t)$ і $s_b = s_b(t)$ не є постійними, структура рівняння (4.42) залишиться такою ж, однак вирази для граничних умов стають більш громіздкими [50]. Розв'язок рівняння (4.42) і перевірку умови (4.41) можна здійснити, використовуючи, наприклад, чисельні методи, що реалізовані в пакетах Matlab або Maple.

Для кількісної оцінки витрат за одиницю часу експлуатації обладнання в період від початку його роботи до списання при різних сценаріях змінення коефіцієнта зайнятості розглянемо показник зносу $u = u(t)$, $(0 \le u \le 1)$. Цей показник характеризує інтенсивність експлуатаційних витрат в момент часу t при повній зайнятості обладнання.

Для моделювання змін показника зносу розглянемо динамічну модель, яка описується диференціальним рівнянням

$$u' = (1-u)^q \cdot (u-L)^r \cdot (a \cdot s(t) + b) \qquad (4.43)$$

з початковою умовою $u(0) = u_0$, де r – параметр, що визначає інтенсивність збільшення зносу обладнання на початковій стадії старіння; q – параметр, що визначає інтенсивність збільшення зносу обладнання на останній стадії старіння; $s(t)$ – коефіцієнт зайнятості обладнання в момент часу t $(0 \le s(t) \le 1)$; L – параметр, що визначає нижню асимптоту кривої зносу обладнання $(0 \le L < 1)$; u_0 – початкове значення показника зносу $(u_0 > L)$; a і b – параметри, що визначають загальну швидкість збільшення зносу протягом усього часу роботи обладнання та вплив ступеня зайнятості обладнання на швидкість його зносу.

Всі витрати будемо дисконтувати до моменту початку експлуатації обладнання. Одиницею виміру часу за умовчанням вважатимемо рік. Середні експлуатаційні витрати за одиницю часу експлуатації машини в період від початку експлуатації до моменту часу t можна знайти за формулою

$$R_{oper}(t) = \frac{1}{t} \cdot \int_0^t \left(\frac{R_{var} \cdot u(\tau)}{u(0)} \cdot s(\tau) + R_{const} \right) \cdot e^{\frac{-\eta\tau}{100}} d\tau, \qquad (4.44)$$

де $u(t)$ – показник загального зносу в момент часу t, R_{const} – постійні експлуатаційні витрати обладнання за одиницю часу; R_{var} – змінні експлуатаційні витрати нового обладнання за одиницю часу при повній зайнятості; η – річна процентна ставка відсотків. Вираз, що стоїть в дужках в формулі (4.44), визначає інтенсивність поточних витрат на обладнання в одиницю часу. Отже, вираз (4.44) є наслідком застосування відомої формули знаходження сучасної вартості коштів при неперервному нарахуванні відсотків:

$$V(t) = \int_0^t f(\tau) \cdot e^{\frac{-\eta\tau}{100}} d\tau. \qquad (4.45)$$

Формула (4.45) часто використовується при дослідженні показників ефективності експлуатації обладнання [280].

Середні капітальні витрати за одиницю часу експлуатації машини в період від початку роботи до моменту часу *t* будемо шукати за формулою

$$R_{cap}(t) = \frac{R_0}{t}, \qquad (4.46)$$

де R_0 – ціна нового обладнання.

Тоді сумарні середні витрати за одиницю часу експлуатації обладнання в період від початку роботи до моменту часу *t* дорівнюють

$$R(t) = R_{cap}(t) + R_{oper}(t). \qquad (4.47)$$

Оптимальним строком служби обладнання будемо вважати такий час *t*, що мінімізує математичне сподівання сумарних середніх витрат за одиницю часу експлуатації обладнання в період від початку роботи до списання, тобто мінімізує вираз

$$E(R(s(t,\omega),t)) = \int_\Omega R(s(t,\omega),t) P(d\omega), \qquad (4.48)$$

де $R(s,t)$ – сумарні середні витрати за одиницю часу роботи даного обладнання в період від початку його експлуатації до моменту часу t при

функції змінення коефіцієнта зайнятості $s = s(t)$. Для статистичного оцінювання значення $E(R(s(t,\omega),t))$ в кожен момент часу t, використовуючи (4.21), згенеруємо випадкову вибірку функцій завантаження обладнання $s_1(t)$, $s_2(t)$, …, $s_N(t)$ і скористаємося рівністю

$$E(R(s(t,\omega),t)) \sim \overline{R}(t) = \frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N} R(s_k(t),t). \qquad (4.49)$$

За оптимальний час заміни обладнання будемо вважати таке значення *t*, що мінімізує функцію $\overline{R}(t)$ [311].

Важливе значення має прогнозування середнього рівня витрат на обладнання при різних можливих траєкторіях змінення обсягів завантаження. Але в багатьох випадках також важливо оцінювати і те, наскільки сильно можуть відхилятися фактичні витрати від своїх прогнозних середніх значень. Середньоквадратичне відхилення сумарних середніх витрат за одиницю часу роботи обладнання в період від початку його експлуатації до списання знаходимо за формулою

$$\sigma(R(s(t,\omega),t)) = \left(\int_{\Omega} \left(R(s(t,\omega),t) - E(R(s(t,\omega),t)) \right)^2 P(d\omega) \right)^{1/2} \qquad (4.50)$$

або за статистичною оцінкою

$$\sigma(R(s(t,\omega),t)) \sim \overline{\sigma}(t) = \left(\frac{1}{N-1} \left(\sum_{k=1}^{N} R^2(s_k(t),t) - \frac{1}{N} \left(\sum_{k=1}^{N} R(s_k(t),t) \right)^2 \right) \right)^{1/2}$$

. (4.51)

Практичний інтерес представляє визначення для кожного моменту часу *t* інтервалу $(x_{(1-\alpha)/2}, x_{(1+\alpha)/2})$, всередині якого з заданою ймовірністю α будуть знаходитися значення $R(s(t,\omega),t)$. Результати чисельних розрахунків інтервалів, в яких знаходяться показники сумарних середніх витрат за одиницю часу експлуатації обладнання, наведені далі в цьому підрозділі.

Генерування випадкової вибірки з реалізацій випадкового процесу, який є розв'язком стохастичного диференціального рівняння (4.21), було

реалізовано в пакеті прикладних програм для інженерних обчислень Matlab. Також за допомогою Matlab було здійснено обчислення показників за формулами (4.44) – (4.51). На рис. 4.28 зображено випадкову вибірку зі 100 траєкторій змінення середніх витрат за одиницю часу експлуатації обладнання $R(s(t, \omega), t)$.

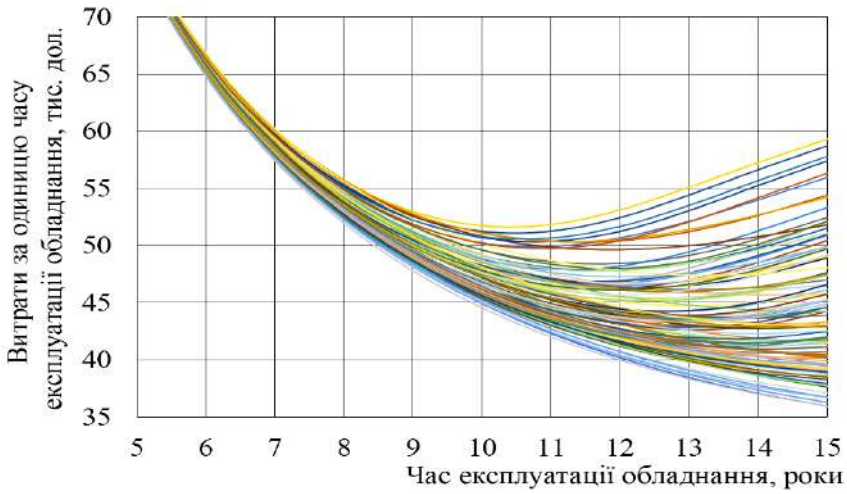


Рисунок 4.28 – Випадкова вибірка зі 100 траєкторій змінення середніх витрат за одиницю часу експлуатації обладнання

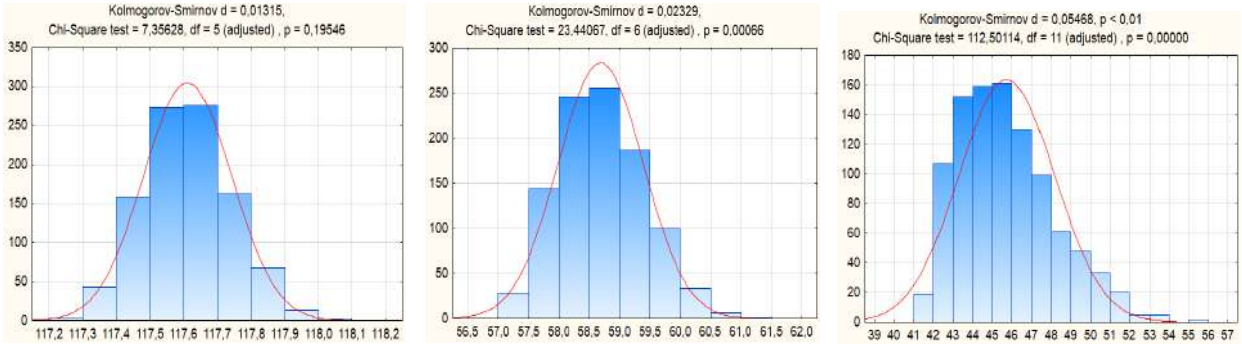
Числові значення вхідних параметрів для динамічної моделі (4.43)–(4.49), які були використані, отримані на підставі статистичних даних експлуатації портових контейнерних перевантажувачів. Застосовувалися результати точкових оцінок параметрів для запропонованої динамічної моделі старіння обладнання (4.43)–(4.49). Задачі статистичного оцінювання параметрів стохастичних динамічних моделей присвячено багато досліджень, наприклад [50]. Криві, що зображені на рис. 4.28, є різними траєкторіями випадкового процесу $R(s(t,\omega),t)$. При розрахунках вважалося, що крива змінення зносу $u(t)$ описується за допомогою динамічної моделі (4.36) з початковою умовою $u(0)$=0,1 і параметрами q=1, r=2,01, L=0, a=1,4, b=0,3. Така форма кривої змінення зносу є типовою для портових контейнерних перевантажувачів. Приймалося, що R_{var}=200, R_{const}=8, R_0=240, δ=10. При моделюванні випадкового процесу змінення коефіцієнта зайнятості за допомогою диференційного рівняння (4.21) припускалося, що s_b=0,1, s_c=0,4 і s_t=0,9.

Функція зносу і функція дифузії відповідно дорівнюють $a(t) = 0{,}1 \cdot (0{,}4 - x)$ та $b(t) = 0{,}09 \cdot (0{,}9 - x) \cdot (x - 0{,}1)$.

В табл. 4.7 представлені оцінки показників середніх витрат за одиницю часу експлуатації обладнання, які отримані по випадковій виборці функцій $\{R(s(t, \omega_k), t)\}_{k=1}^{400}$. Оцінки квантилів розподілів середніх витрат за одиницю часу роботи обладнання для різних термінів експлуатації обладнання при випадкових траєкторіях інтенсивностей завантаження обладнання наведено в табл. 4.8. Більш наочно змінення закону розподілу середніх витрат за одиницю часу експлуатації обладнання з плином часу можна прослідити на рис. 4.29, 4.30. Дані в табл. 4.7, 4.8 та графіки на рис. 4.32–4.34 отримані на підставі обчислень траєкторій випадкового процесу $R(s(t, \omega), t)$, який визначається формулами (4.43)–(4.51). Для рис. 4.28 використовувалася вибірка з 100 траєкторій випадкового процесу $R(s(t, \omega), t)$. Для статистичних оцінок в табл. 4.7 і 4.8 використовувалася вибірка обсягом 400 реалізацій. Довірчі інтервали для оцінки математичних сподівань перерізів випадкового процесу, що наведені в останньому стовбці табл. 4.7, були обчислені на основі вибірки з 400 реалізацій випадкового процесу $R(s(t, \omega), t)$ з використанням розподілу Стьюдента. Те, як змінюється форма закону розподілу показників середніх витрат за одиницю часу експлуатації обладнання при заміні обладнання через 3, 7 або 11 років, можна спостерігати на рис. 4.29–4.31, що відображають гістограми розподілів значень перерізів випадкового процесу $R(s(t, \omega), t)$ в зазначені моменти часу. Рис. 4.29–4.31 були побудовані за допомогою програми Statistica по виборці з 400 реалізацій випадкового процесу $R(s(t, \omega), t)$. На цих рисунках червоними лініями зображені щільності нормальних розподілів, математичні сподівання та середньоквадратичні відхилення яких відповідають вибірковим показникам, а також вказані результати перевірки тесту Колмогорова-Смирнова та тесту χ^2 на нормальність розподілу.

Таблиця 4.7 – Оцінки показників середніх витрат за одиницю часу експлуатації обладнання при випадкових змінах інтенсивності завантаження

Строк експлуатації, роки	Оцінка математичного сподівання середніх витрат за одиницю часу експлуатації обладнання, тис. дол.	Оцінка дисперсії середніх витрат за одиницю часу експлуатації обладнання	Довірчий інтервал для оцінки математичного сподівання
1	330,12	0,02	0,002
2	170,54	0,07	0,007
3	117,59	0,13	0,013
4	91,35	0,22	0,021
5	75,80	0,32	0,032
6	65,65	0,46	0,045
7	58,61	0,65	0,063
8	53,58	0,89	0,087
9	49,92	1,21	0,119
10	47,31	1,64	0,161
11	45,53	2,22	0,218
12	44,47	2,97	0,292
13	44,02	3,86	0,379
14	44,11	4,82	0,474
15	44,64	5,76	0,567



а) *б)* *в)*

Рисунок 4.29 – Гістограма розподілу значень перерізу випадкового процесу $R(s(t,\omega),t)$: *а*) при $t=3$; *б*) при $t=7$; *в*) при $t=11$

Отже, при малих t закон розподілу середніх витрат за одиницю часу експлуатації обладнання майже не відрізняється від нормального (рис. 4.29, *а*), *б*)), але з плином часу дедалі стає помітним відхилення від нормального закону розподілу (рис. 4.29 *в*)). Можна відмітити, що ступінь розсіяння значень середніх витрат за одиницю часу експлуатації обладнання суттєво зростає з

плином часу, а функція $\overline{R}(t)$ приймає найменше значення приблизно через 13,5 років після початку роботи обладнання (рис. 4.30, 4.32). Межі областей, які зображені на рис. 4.31, є кривими зміни квантилів $x_{0.05}$, $x_{0.25}$, $x_{0.75}$, $x_{0.95}$ в залежності від часу експлуатації обладнання. Ці криві побудовані за даними, які представлені в табл. 4.8.

Таблиця 4.8 – Оцінки квантилів розподілів середніх витрат за одиницю часу функціювання обладнання для різних термінів експлуатації обладнання при випадкових функціях інтенсивностей завантаження обладнання

Час експлуатації, роки	$x_{0,05}$	$x_{0,25}$	$x_{0,50}$	$x_{0,75}$	$x_{0,95}$
1	330,10	330,11	330,12	330,14	330,16
2	170,45	170,49	170,52	170,57	170,66
3	117,40	117,51	117,57	117,69	117,86
4	91,04	91,21	91,29	91,52	91,75
5	75,34	75,59	75,72	76,05	76,43
6	64,98	65,31	65,56	65,97	66,49
7	57,73	58,15	58,49	58,98	59,79
8	52,37	52,90	53,42	54,03	55,31
9	48,37	49,08	49,60	50,53	52,34
10	45,24	46,15	46,81	48,15	50,79
11	42,72	43,95	44,93	46,85	50,35
12	40,75	42,23	43,80	46,29	50,57
13	39,22	41,06	43,30	46,54	52,07
14	38,02	40,28	43,18	47,43	54,00
15	37,10	39,65	43,63	48,95	55,99

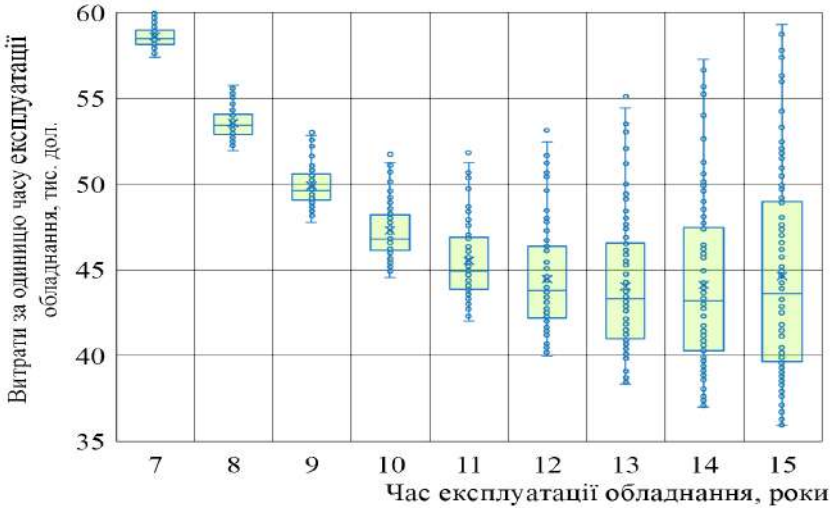


Рисунок 4.30 – Діаграма «ящик з вусами», що побудована по виборці зі 100 випадкових траєкторій змінення середніх витрат за одиницю часу експлуатації обладнання

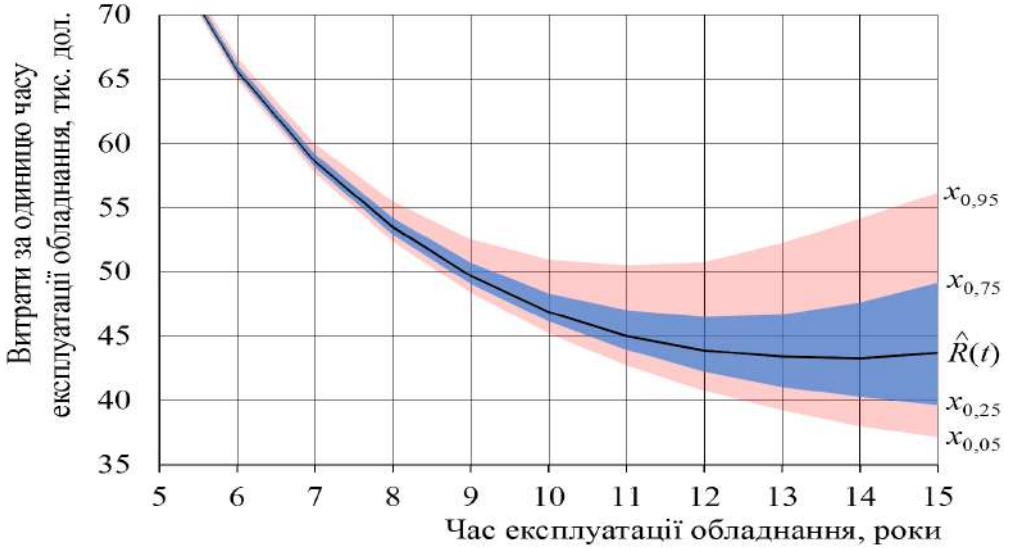


Рисунок 4.31 – Оцінки змінення математичного сподівання і квантилів для сумарних середніх витрат за одиницю часу функціювання обладнання

Отже, внутрішня область визначає межі інтервалів, всередині яких з ймовірністю 0,5 знаходитимуться сумарні середні витрати за одиницю часу функціонування обладнання. Верхня і нижня межі зовнішньої області визначають межі інтервалів, всередині яких перебувають сумарні середні витрати за одиницю часу функціонування обладнання з ймовірністю 0,9. З огляду на значне зростання меж коливань сумарних середніх витрат постає потреба в обґрунтуванні заходів, що напрямлені на підвищення рівня стійкості середніх витрат на обладнання. На рис. 4.32 суцільною жирною лінією зображено криву значень оцінки математичного сподівання сумарних середніх витрат за одиницю часу роботи обладнання $\overline{R}(t)$. Графіки на рис. 4.30–4.32 побудовані за даними табл. 4.7 і 4.8. Пунктирними лініями на рис. 4.32 представлені межі інтервалів, в яких знаходяться значення сумарних середніх витрат за одиницю часу функціювання обладнання з ймовірністю $\alpha = 0{,}9$. З рис. 4.32 видно, що з точки зору мінімізації математичного сподівання сумарних середніх витрат за одиницю часу роботи обладнання, оптимальний строк служби обладнання становить приблизно 13,5 років. При заміні обладнання в будь-який момент часу, що знаходиться в проміжку між 12 та 13,5 роками, математичні сподівання середніх витрат є майже мінімальними. Разом з цим, з плином часу спостерігається помітне зростання

ступеня розсіювання і, як наслідок, зростання ризиків отримання надмірних витрат [126]. Таким чином, в даному випадку доцільно скоротити запланований строк служби обладнання з 13,5 років приблизно до 12 і навіть менше. Тоді очікувані сумарні середні витрати за одиницю часу роботи обладнання майже не зміняться, але рівень їх стійкості значно зросте [110].

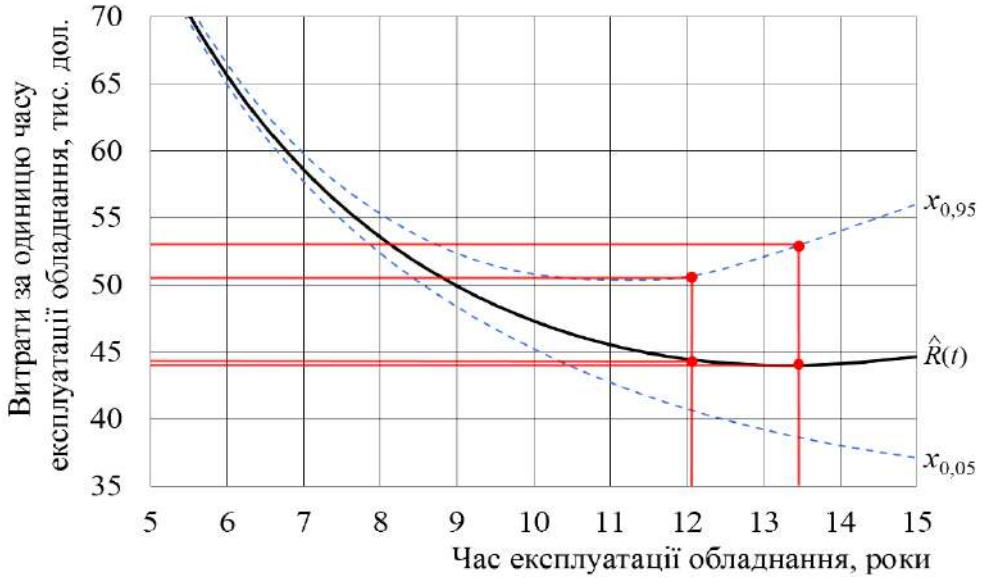


Рисунок 4.32 – Змінення математичного сподівання і границь інтервалу, в якому з ймовірністю 0,9 знаходяться значення сумарних середніх витрат за одиницю часу функціювання обладнання

В більшості робіт, що присвячені плануванню термінів замін обладнання, рівень завантаження вважається постійним (наприклад, [282, 317, 363, 367, 376]). Але в деяких випадках таке припущення не відповідає дійсності. Змінення рівня завантаження обладнання суттєво впливає на темпи фізичного зносу і, як наслідок, – на показники ефективності експлуатації обладнання. Перевагою методу визначення термінів замін обладнання, який запропоновано в цьому розділі, є те, що він враховує можливі коливання рівня завантаження обладнання. Це дозволяє визначати терміни завершення проекту використання обладнання, виходячи не лише з середніх значень показників ефективності роботи обладнання, а і враховуючи рівень стійкості цих показників. Зокрема, прикладним аспектом використання отриманого результату є можливість підвищення стійкості показників ефективності

проектів експлуатації складного портового обладнання, яке функціонує в умовах нестійкого вантажопотоку. Однак запропонована в цьому розділі модель не враховує вплив морального зносу на планування термінів заміни складного обладнання. Складне обладнання зазвичай має тривалі строки служби. Тому під час його експлуатації на ринку можуть з’явитися нові більш ефективні моделі обладнання. Поява нових моделей обладнання також є фактором, що визначає терміни заміни застарілого обладнання. Дослідження сумісного впливу фізичного та морального зносу на визначення оптимальних термінів заміни складного обладнання представлені в третьому розділі.

4.8. Висновки до четвертого розділу

1. Запропоновано моделі та методи управління проектами розвитку транспортної інфраструктури в умовах мінливого зовнішнього оточення.

2. Розроблено метод оцінювання динаміки середніх значень та коливань показників ефективності проектів модернізації об’єктів інфраструктури морського транспорту, який враховує випадкові коливання вантажопотоків, а також запропоновано метод обґрунтування стратегій модернізації об’єктів транспортної інфраструктури, що скорочують ризики, пов'язані з неповною визначеністю інтенсивності вантажопотоку.

3. Вдосконалено модель усувного і неусувного зносу технічних засобів, на основі якої базуються методи оптимізації термінів операційної фази проектів створення та використання складних інноваційних технічних систем. Запропонована модель, в порівнянні з існуючими, використовує більш розвинені інструменти кількісного аналізу, що базуються на застосуванні апарату стохастичних диференційних рівнянь та статистичного моделювання.

4. Запропонована динамічна модель дозволяє оцінювати динаміку усувного і незворотного зносу складного портового обладнання, яке функціонує в умовах мінливої зайнятості. Для порівняння різних стратегій ремонтів і списань обладнання в побудованій динамічній моделі

запропоновано використовувати апарат джокерів. При знаходженні оптимальної стратегії ремонтів і списань машин досить ефективним виявилося використання методу імітації відпалу.

5. Результати досліджень показали, що динаміка коефіцієнта зайнятості суттєво впливає на процес старіння об’єктів транспортної інфраструктури, при цьому зміна завантаження може не просто зсунути в часі розраховану раніше оптимальну послідовність ремонтів і замін обладнання, а може якісно її змінити. Тому при розробці довгострокових стратегій управління парком обладнання, що функціонує в умовах мінливого завантаження, недостатньо враховувати тільки один з показників зносу, а необхідно зробити аналіз динаміки комплексного техніко-економічного показника зносу.

6. Представлено аналіз стійкості показників ефективності проектів використання складного портового обладнання. Отримані результати засновані на використанні методів чисельної оптимізації та багаторазовому чисельному рішенні систем диференційних рівнянь. Комп'ютерні обчислення показали ефективність використання запропонованої динамічної моделі старіння обладнання при дослідженні ефективності стратегій ремонтів і замін портового обладнання.

7. Встановлені кількісні співвідношення між середнім рівнем показників ефективності обладнання, рівнем коливань цих показників при можливих випадкових коливаннях завантаження та терміном заміни обладнання. Зокрема, дослідження показали, що зміни середніх сумарних питомих витрат обладнання можуть бути незначними протягом певного проміжку часу, тоді як діапазон розкиду рівня витрат на обладнання протягом цього ж часового проміжку може істотно зростати.

8. Дослідження показали, що погіршення значення цільової функції, що викликане змінами в оптимальній стратегії ремонтів і замін обладнання, є некритичним. Тому має сенс разом з даною цільовою функцією вивчати й інші показники експлуатації обладнання, які можна було б поліпшити, при цьому

лише незначно пожертвувавши значенням цільової функції. Тобто перейти до розгляду задач багатокритеріальної оптимізації.

9. На підставі аналізу розроблених математичних моделей запропоновано методи планування термінів заміни складного обладнання з врахуванням нестійкості інтенсивності рівня завантаження. Ці методи дозволяють обґрунтовувати терміни закінчення проектів використання складного обладнання, приймаючи до уваги як середні очікувані показники ефективності його експлуатації, так і рівень можливих коливань цих показників.

Основні положення розділу розкриті в публікаціях автора [110, 117–128, 130, 131, 133–136, 140–144, 146, 149, 153, 154, 294, 311, 315].