

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ МІСЬКОГО
ГОСПОДАРСТВА імені О.М. БЕКЕТОВА
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ХУДЯКОВ ІЛЛЯ ОЛЕКСАНДРОВИЧ

УДК 004.032.26:519.816]:697.34.059.7](043)

ДИСЕРТАЦІЯ


МОДЕЛІ І МЕТОДИ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ПРИ УПРАВЛІННІ
ПРОГРАМАМИ З РЕКОНСТРУКЦІЇ ІНЖЕНЕРНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

Спеціальність 122 – Комп'ютерні науки

Галузь знань – Інформаційні технології

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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

 І.О. Худяков

Наукові керівники:

Сухонос Марія Костянтинівна, д-р техн. наук, професор

Плюгін Владислав Євгенович, д-р техн. наук, професор

Харків – 2023

АНОТАЦІЯ

Худяков І.О. Моделі і методи підтримки прийняття рішень при управлінні програмами з реконструкції інженерної інфраструктури. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 122 «Комп'ютерні науки» (12 – Інформаційні технології). – Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Міністерство освіти і науки України, Харків, 2023.

Впровадження програм з реконструкції інженерної інфраструктури (ПРІІ) міст має вирішальне значення як для забезпечення ефективного функціонування комунального господарства, так і для здійснення відбудови України внаслідок повномасштабного вторгнення російської федерації.

У контексті управління ПРІІ особливе значення мають процеси планування та управління змістом. При цьому, зазначені процеси прямо пов'язані з прийняттям управлінських рішень стосовно вибору обладнання для встановлення на об'єктах, що реконструюються. З урахуванням тісного взаємозв'язку елементів системи, за рахунок якого зміна характеристик об'єкту в складі підсистеми буде впливати на характеристики як інших об'єктів, так і системи в цілому, та імовірності виникнення впливів турбулентного зовнішнього середовища як на системи управління програмами або проєктами, так і на інфраструктурні системи, що підлягають реконструкції, є доцільним застосування методів адаптивного управління в процесах управління змістом ПРІІ.

Наразі існує проблема відсутності таких засобів адаптивного управління програмами, які враховували б комплексність систем-об'єктів реконструкції, надавали можливість масштабування систем, були б зручними у користуванні для децидента. Також вони не забезпечують врахування екологічної компоненти при прийнятті рішень та допускають вплив суб'єктивних суджень технічних фахівців-

членів команд проєктів при здійсненні підбору обладнання до встановлення на об'єктах системи.

Відповідно, для забезпечення ефективної реалізації програм та проєктів з реконструкції інженерної інфраструктури необхідна наявність адаптивного інструменту для розробки та управління архітектурою програми з урахуванням наявних обмежень, екологічної компоненти та наявністю альтернатив можливих рішень.

Із огляду на це, створення компонентів інформаційної технології підтримки прийняття рішень на етапах планування та виконання програм з реконструкції інфраструктурних систем є *актуальним науково-прикладним завданням*.

Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності прийняття рішень при плануванні та управлінні змістом програм з реконструкції інженерної інфраструктури.

Для досягнення зазначеної мети в дисертаційній роботі вирішуються такі *завдання*:

- проаналізувати структуру та обмеження програм з реконструкції інженерної інфраструктури;
- проаналізувати теоретико-методичні засади адаптивного управління програмами;
- проаналізувати наявні методи та засоби адаптивного управління програмами в контексті їх застосування у програмах з реконструкції інженерної інфраструктури;
- розробити модель підтримки прийняття рішень при управлінні програмами з реконструкції інженерної інфраструктури на основі штучної нейронної мережі;
- розробити метод прийняття рішень при управлінні програмами з реконструкції інженерної інфраструктури за допомогою використання моделі;
- виконати програмну реалізацію запропонованих моделі та методу;
- виконати апробацію і впровадження результатів дослідження.

Об'єкт дослідження – процеси прийняття рішень при управлінні програмами.

Предмет дослідження – інструменти підтримки прийняття рішень при управлінні програмами.

У проведених дослідженнях використовувались такі методи: аналізу та синтезу, системного аналізу при проведенні теоретичного дослідження; метод формалізації для опису структури програми, системи управління програмою тощо, формулювання обмежень для структури програм, завдань управління програмами з реконструкції інженерної інфраструктури, компонентів моделі підтримки прийняття рішень; абстрактно-логічний метод при визначенні специфічних особливостей управління програмами з реконструкції інженерної інфраструктури, характерних ризиків таких програм; математичного моделювання для розробки моделі підтримки прийняття рішень; структурного аналізу для визначення складу інфраструктурних систем та систем теплопостачання зокрема як об'єктів реконструкції; параметричного аналізу для визначення структури систем теплопостачання.

Наукова новизна отриманих результатів.

Уперше розроблено:

– метод прийняття рішень при управлінні програмами з реконструкції інженерної інфраструктури, заснований на використанні сервісу машинного навчання для вибору параметрів інфраструктурної системи, що забезпечують мінімізацію шкідливого впливу системи на довкілля, який, на відміну від існуючих, надає можливість врахування взаємозв'язків елементів систем, що дозволяє підвищити ефективність прийняття рішень при управлінні програмами та проектами з реконструкції інженерної інфраструктури завдяки скороченню планованих термінів впровадження;

Удосконалено:

– прогнозу модель підтримки прийняття управлінських рішень, засновану на штучній нейронній мережі, яка, на відміну від існуючих, використовує історичні дані для прогнозування значення цільової функції, що дозволяє скоротити

плановані терміни програм, забезпечити можливість масштабування та комплексність відображення систем, врахувати категорії даних при здійсненні прогнозування значення цільової функції.

– систему компонентів моделі, заснованих на засобах машинного навчання, які, на відміну від існуючих, здійснюють перерозподіл варійованих параметрів у залежності від цілей моделювання, що дозволяє забезпечити адаптацію процесу прийняття рішень при реалізації програм з реконструкції інженерних інфраструктурних систем до індивідуальних умов та обмежень експлуатації.

Дістало подальшого розвитку:

– комбінований метод адаптивного управління програмами, заснований на методах пасивного та активного адаптивного управління програмами, який, на відміну від існуючих, застосовує одночасно методи навчання та прогнозування результатів керівних впливів, що дозволяє підвищити ефективність адаптивного управління програмою.

Результати дослідження впроваджено у діяльність приватного підприємства «Донком».

Результати дослідження та розробки, а саме: модель підтримки прийняття рішень при управлінні програмами з реконструкції інженерної інфраструктури, метод прийняття рішень при управлінні програмами з реконструкції інженерної інфраструктури впроваджено в навчальний процес підготовки магістрів галузі знань 12 «Інформаційні технології», спеціальності 122 «Комп'ютерні науки», освітньої програми «Комп'ютерні науки. Управління проектами» Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова при викладанні дисциплін «Міські проекти і програми», «Інформаційні системи та наукові дослідження в управлінні проектною організацією».

Основні результати роботи доповідалися й обговорювалися на таких науково-технічних конференціях: Міжнародна науково-технічна конференція «Інформатика, Автоматизація, Математика». (м. Суми, 20-24 квітня 2020 р.), дистанційно; Міжнародний форум «International Forum for Young Researchers». (м. Харків, 25 вересня 2020 р.), дистанційно; Всеукраїнська науково-практична

конференція здобувачів вищої освіти і молодих учених «Перспективи розвитку територій: теорія і практика». (м. Харків, 19-20 листопада 2020 р.), очно; Міжнародна конференція «Smart Technologies in Urban Engineering». (м. Харків, 9-11 червня 2022 р.), дистанційно.

У першому розділі проведено аналіз комплексів інженерної інфраструктури як складних організаційно-технічних систем, що дозволило обґрунтувати доцільність застосування програмного підходу при їх реконструкції. Проаналізовано розвиток теорії адаптивного управління програмами та засоби адаптивного управління проєктами та програмами. Проведено формалізацію завдання управління для здійснення управління як реалізації керівного впливу, реалізації керуючого впливу з використанням зворотного зв'язку та реалізації керуючого впливу з використанням зворотного зв'язку в нестационарних умовах. Розглянуто процеси пасивного та активного управління програмами, розроблено схему процесу комбінованого адаптивного управління програмами. Проведено категоризацію засобів адаптивного управління, проведено аналіз деяких із них. Проведено аналіз деяких засобів адаптивного управління проєктами та програмами, методів моделювання. Сформульовано мету та задачі дисертаційної роботи.

У другому розділі розроблено модель підтримки прийняття управлінських рішень при управлінні програмами з реконструкції інженерної інфраструктури на основі штучної нейронної мережі, де підтримка прийняття рішення відбувається на основі моделювання інженерної системи-об'єкту реконструкції шляхом відображення відповідної системи у вигляді масиву елементів із заданими параметрами. Розроблено компоненти перерозподілу варійованих параметрів, що дозволяють адаптувати процес прийняття рішень при реалізації програм з реконструкції інженерних інфраструктурних систем до індивідуальних умов та обмежень експлуатації через модифікацію датасету моделі для різних типів об'єктів. Визначено взаємозв'язок моделі підтримки прийняття рішень із наявними засобами адаптивного управління програмами. Визначено прямий та опосередкований зв'язок моделі з процесами управління програмами. Розроблено

метод прийняття рішень при управлінні програмами та проектами з реконструкції інженерної інфраструктури, що дозволяє застосовувати модель підтримки прийняття рішень у фазах планування та виконання програми.

У третьому розділі розроблено функціональну композицію моделі підтримки прийняття рішень при управлінні програмами та проектами з реконструкції інженерної інфраструктури. Описано датасет, що складається з історичних даних стосовно параметрів модельованих об'єктів та використовувався для навчання моделі. Розроблено підхід до категоризації параметрів інженерних систем, який дає можливість масштабування моделі для підсистем розподілу та перетворення енергії. Реалізовано функціонал пост-обробки даних, що полягає у створенні на основі результатів обробки даних датасету графіків залежностей між значеннями цільової функції та деяких основних обмежень та виведення їх до користувацького інтерфейсу. Проведено апробацію запропонованої моделі та методу.

Ключові слова: підтримка прийняття рішень, управління програмами, управління проектами, інфраструктурний проєкт, інженерна інфраструктура, вплив змін, турбулентне середовище, проєктне середовище, цільова функція, централізоване теплопостачання, енергоефективність, енергозбереження.

ABSTRACT

Khudiakov I.O. Models and Methods of Decision Support in Engineering Systems Reconstruction Programs Management. – Manuscript copyright.

Thesis on competition of scientific degree of Doctor of Philosophy by specialty 122 – Computer Science. –O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2023.

The implementation of the program for the reconstruction of the engineering infrastructure (PREI) of the cities is of crucial importance both for ensuring the effective functioning of the communal economy and for the reconstruction of Ukraine as a result of the full-scale invasion of the Russian Federation.

In the context of PREI management, the processes of planning and scope management are of particular importance. At the same time, these processes are directly related to decision-making regarding the selection of equipment for installation at the facilities being reconstructed. Taking into account the close relationship of the system elements, due to which the changed characteristics of the object in the subsystem will affect the characteristics of both other objects and the system as a whole, and the probability of the impact of the turbulent external environment on both the program management system or the objects, as well as on infrastructural systems subject to reconstruction, it is expedient to use adaptive management methods in the processes of managing the scope of PREI.

Currently, there is a problem of having such means of adaptive management of programs that would take into account the complexity of systems-objects of reconstruction, provide the possibility of scaling the system, and be convenient for the decision-maker to use. Also, they do not ensure that the environmental component is taken into account when making decisions and allow the influence of subjective judgments of technical specialists who are members of project teams when selecting equipment for installation at system facilities.

Therefore, to ensure the effective implementation of the program and projects for the reconstruction of engineering infrastructure, an adaptive tool is needed for the development and management of the architectural program, taking into account the existing limitations, environmental components and the availability of alternative possible solutions.

In view of this, the creation of components of information technology to support decision-making at the stages of planning and implementation of the program for the reconstruction of infrastructure systems is *an urgent scientific and applied task*.

The purpose of the dissertation is to increase the effectiveness of decision-making in the planning and management of the content of engineering infrastructure reconstruction programs.

To achieve the specified goal, the following tasks are solved in the dissertation work:

- analyze the structure and limitations of engineering infrastructure reconstruction programs;
- analyze the theoretical and methodological principles of adaptive program management;
- analyze the existing methods and means of adaptive management of programs in the context of their application in engineering infrastructure reconstruction programs;
- develop a decision-making support model for managing engineering infrastructure reconstruction programs based on an artificial neural network;
- develop a decision-making method in the management of engineering infrastructure reconstruction programs using the model;
- implement the software implementation of the proposed model and method;
- carry out testing and implementation of research results.

The object of research is decision-making processes in program management.

The subject of research is decision-making support tools for program management.

The following methods were used in the conducted research: analysis and synthesis, system analysis when conducting theoretical research; a formalization method for describing the program structure, program management system, etc., formulation of constraints for the program structure, program management tasks for the reconstruction of engineering infrastructure, components of the decision support model; abstract-logical method in determining specific features of management of engineering infrastructure reconstruction programs, characteristic risks of such programs; mathematical modeling for the development of a decision support model; structural analysis to determine the composition of infrastructure systems and heat supply systems, in particular as objects of reconstruction; parametric analysis to determine the structure of heat supply systems.

Scientific novelty of the obtained results.

First developed:

- a decision-making method in the management of programs for the reconstruction of engineering infrastructure, based on the use of a machine learning service for choosing the optimal parameters of the infrastructure system, which, unlike the existing ones, provides the opportunity to take into account the interrelationships of system elements,

which allows to increase the efficiency of decision-making at management programs and projects for the reconstruction of engineering infrastructure thanks to the reduction of planned implementation terms;

Improved:

– a predictive management decision support model based on an artificial neural network, which, unlike the existing ones, uses historical data to predict the value of the objective function, which allows you to reduce the planned terms of programs, ensure the possibility of scaling and the complexity of displaying systems, take into account categories of data when implementing prediction of the value of the objective function.

– a system of model components based on machine learning tools, which, unlike the existing ones, carry out the redistribution of varied parameters depending on the modeling goals, which allows to adapt the decision-making process during the implementation of programs for the reconstruction of engineering infrastructure systems to individual conditions and limitations of operation.

Got further development:

– a combined method of adaptive program management, based on the methods of passive and active adaptive program management, which, unlike the existing ones, simultaneously applies training methods and forecasting the results of managerial influences, which allows to increase the effectiveness of adaptive program management.

The results of the research are implemented in the activity of Private Enterprise "Doncom".

The results of research and development, namely: the decision-making support model for managing engineering infrastructure reconstruction programs, the decision-making method for managing engineering infrastructure reconstruction programs have been implemented in the educational process of master's training in the field of knowledge 12 "Information technologies", specialty 122 "Computer science", educational program "Computer science. Project Management" of O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv when teaching the disciplines "Urban projects and programs", "Information systems and scientific research in project organization management".

The main results of the work were reported and discussed at the following scientific and technical conferences: International scientific and technical conference "Informatics, Automation, Mathematics". (Sumy, April 20-24, 2020), remotely; International Forum "International Forum for Young Researchers". (Kharkiv, September 25, 2020), remotely; All-Ukrainian scientific and practical conference of higher education graduates and young scientists "Perspectives for the development of territories: theory and practice". (Kharkiv, November 19-20, 2020), in person; International conference "Smart Technologies in Urban Engineering". (Kharkiv, June 9-11, 2022), remotely.

In the first section, the analysis of engineering infrastructure complexes as complex organizational and technical systems was carried out, which made it possible to substantiate the expediency of using a software approach in their reconstruction. The development of the theory of adaptive management of programs and means of adaptive management of projects and programs were analyzed. The formalization of the management task was carried out for the implementation of management as the implementation of managerial influence, the implementation of managerial influence using feedback and the implementation of managerial influence using feedback in non-stationary conditions. The processes of passive and active program management were considered, and the scheme of the process of combined adaptive program management was developed. A categorization of means of adaptive management was carried out, an analysis of some of them was carried out. An analysis of some means of adaptive management of projects and programs, modeling methods was carried out. The purpose and tasks of the dissertation work were formulated.

In the second section, a model of decision-making support in the management of engineering infrastructure reconstruction programs based on an artificial neural network was developed, where decision-making support is based on the modeling of the engineering system-object of reconstruction by displaying the corresponding system in the form of an array of elements with specified parameters. The components of the distribution of varied parameters were been developed, which allows to to adapt the decision-making process during the implementation of programs for the reconstruction of engineering infrastructure systems to individual conditions and limitations of operation

through the modification of the model dataset for various types of objects. The relationship between the decision support model and the existing means of adaptive program management was defined. The direct and indirect connection of the model with program management processes was determined. A decision-making method has been developed in the management of engineering infrastructure reconstruction programs and projects, which allows applying the decision-making support model in the program planning and implementation phases.

In the third section, the functional composition of the decision support model for the management of engineering infrastructure reconstruction programs and projects was developed. A dataset consisting of historical data on the parameters of modeled objects and used for model training was described. An approach to the categorization of engineering system parameters has been developed, which makes it possible to scale the model for energy distribution and conversion subsystems. The functionality of post-processing of data is implemented, which consists in creating, based on the results of data processing, dataset graphs of dependencies between the values of the target function and some basic restrictions and outputting them to the user interface. Approbation of the proposed model and method was carried out.

Keywords: decision support, program management, project management, infrastructure project, engineering infrastructure, impact of changes, turbulent environment, project environment, objective function, district heating, energy efficiency, energy conservation.

Список публікацій здобувача за темою дисертації

1. Kadykova, I., Khvostichenko V., & Khudiakov, I. (2020). Application of convergent approach in strategic project management. *Herald of Advanced Information Technology*, 3(2), 83-94. <http://dspace.opu.ua/jspui/handle/123456789/10799>
2. Khudiakov, I., & Sukhonos, M. (2021). Adaptive approach to engineering infrastructure reconstruction program and project management. *Development management*, 19(4), 17-26. [https://doi.org/10.57111/devt.19\(4\).2021.17-26](https://doi.org/10.57111/devt.19(4).2021.17-26)

3. Sukhonos, M., Babaiev, V., Pliuhin, V., Teterev, V., & Khudiakov, I. (2022). Load Forecasting and Electricity Consumption by Regression Model. In: Arsenyeva, O., Romanova, T., Sukhonos, M., Tsegelnyk, Y. (Eds.) *Smart Technologies in Urban Engineering. STUE 2022. Lecture Notes in Networks and Systems*, vol 536, 302-314. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-20141-7_28
4. Pliuhin, V., Petrenko, O., Tsegelnyk, Y., & Khudiakov, I. (2022). Optimization of output parameters of electromechanical energy converters with a solid rotor in Ansys RMXprt. *Lighting Engineering & Power Engineering*, 63(3), 1 – 8. <https://doi.org/10.33042/2079-424X.2022.61.3.01>
5. Teterev, V., & Khudiakov, I. (2022). Simulation of a Hybrid Solar Power Plant with a Hydrogen Generator in MATLAB/Simulink Environment. *Lighting Engineering & Power Engineering*, 61(2), 30-48. <https://doi.org/10.33042/2079-424X.2022.61.2.01>
6. Khudiakov I., & Sukhonos M. (2023). An adaptive decision-making support model in the management of engineering infrastructure reconstruction programs and projects. *Municipal Economy of Cities*, 4(178), 2–9. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2023-4-178-2-9>
7. I. Khudiakov. (2023). Formation of components of an adaptive decision-making support means components in engineering infrastructure reconstruction programs management. *Lighting Engineering & Power Engineering*, 62(1), 12-16. <https://doi.org/10.33042/2079-424X.2023.62.1.02>
8. I. Khudiakov. (2023). The decision-making method in the management of engineering infrastructure reconstruction programs using an adaptive decision support model. *Lighting Engineering & Power Engineering*, 62(2), 38-45. <https://doi.org/10.33042/2079-424X.2023.62.2.01>
9. Khudiakov, I. (2020). Адаптивна модель управління програмами з енергоефективності на промислових підприємствах [Adaptive management model of energy efficiency programs at industrial enterprises]. In: Drozdenko, O., Shabelnyk, Yu. (eds.) *Informatics, mathematics, automation IMA :: 2020. Materials and program of the international scientific and technical conference of students and young scientists*, (p.

173). Sumy: Sumy state university.
<https://er.chdtu.edu.ua/bitstream/ChSTU/1526/1/IMA-2020.pdf>

10. Khudiakov, I., Sukhonos, M., Pliuhin, V., & Iliencko, O. (2020). Adaptive model of energy efficiency programs management at industrial enterprises. In: Sukhonos, M., Iliencko, O., Krohmal, A., Zubenko, S., Anisenko, O. (eds.) *Young Researchers in the Global World: Vistas and Challenges : Book of papers of the 2020 International Forum for Young Researchers*, (pp. 136-138). Kharkiv: O.M. Beketov NUUE in Kharkiv.
https://science.kname.edu.ua/images/dok/konferentsii/2020konf/_25.pdf

11. Khudiakov, I., Sukhonos, M., & Pliuhin, V. (2020). Місце штучного інтелекту в концепції систем прийняття рішень [Place of artificial intelligence in the decision support systems concept]. In: Sukhonos, M., Starostina, A., Vershynina, D., Hovorova, K. (eds.) *Prospects for the development of territories: theory and practice: materials of the All-Ukrainian scientific and practical conference of students of higher education and young scientists, Kharkiv, November 19-20, 2020* (pp. 489-491). Kharkiv: O.M. Beketov NUUE in Kharkiv.
<https://science.kname.edu.ua/images/dok/konferentsii/2020konf/2020-1--7-.pdf>

ЗМІСТ

ВСТУП.....	17
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ АДАПТИВНОГО УПРАВЛІННЯ ПРОГРАМАМИ З РЕКОНСТРУКЦІЇ ІНЖЕНЕРНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ.....	24
1.1 Проекти та програми з реконструкції інженерної інфраструктури як складні організаційно-технічні системи.....	24
1.2 Аналіз теоретичних аспектів адаптивного управління програмами	28
1.3 Аналіз інструментарію адаптивного управління програмами з реконструкції інженерної інфраструктури	33
1.4 Постановка задач дослідження.....	41
1.5 Висновки до розділу 1.....	42
РОЗДІЛ 2. МОДЕЛЬ ТА МЕТОД ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ПРИ УПРАВЛІННІ ПРОГРАМАМИ З РЕКОНСТРУКЦІЇ ІНЖЕНЕРНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ.....	44
2.1 Модель підтримки прийняття управлінських рішень при реалізації програм з реконструкції інженерної інфраструктури	44
2.2 Метод прийняття рішень при управлінні програмами з реконструкції інженерної інфраструктури з використанням моделі підтримки прийняття рішень	69
2.3 Висновки до другого розділу.....	80
РОЗДІЛ 3. ФУНКЦІОНАЛЬНА КОМПОЗИЦІЯ МОДЕЛІ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ, ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА АПРОБАЦІЯ РОЗРОБЛЕНОГО МЕТОДУ.....	82
3.1 Функціональна композиція моделі підтримки прийняття рішень при управлінні змістом програм з реконструкції інженерної інфраструктури	82
3.2 Характеристика датасету моделі підтримки прийняття рішень	96
3.3 Функціонал пост-обробки моделі.....	113

3.4 Програмна реалізація та апробація методу підтримки прийняття рішень при управлінні програмами з реконструкції інженерної інфраструктури	115
3.4 Висновки до третього розділу	128
ВИСНОВКИ	131
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	133
ДОДАТКИ	145
Додаток А. Список публікацій здобувача за темою дисертації	146
Додаток Б. Відомості про апробацію результатів дисертації	148
Додаток В. Акти впровадження результатів дисертаційної роботи.....	149

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. Впровадження програм з реконструкції інженерної інфраструктури (ПРІ) міст має вирішальне значення як для забезпечення ефективного функціонування комунального господарства, так і для здійснення відбудови України внаслідок повномасштабного вторгнення російської федерації.

У контексті управління ПРІ особливе значення мають процеси планування та управління змістом, а саме – процеси розробки та управління архітектурою програми. При цьому, зазначені процеси прямо пов'язані з прийняттям управлінських рішень стосовно вибору обладнання для встановлення на об'єктах, що реконструюються. Під час цього необхідно враховувати наявну потребу в енергії з боку споживачів, державні норми та характеристики обладнання, встановленого на об'єктах системи, що не підлягає заміні в рамках реалізації програми чи проекту.

Ускладненням при цьому виступає тісний взаємозв'язок елементів системи, за рахунок якого зміна характеристик об'єкту в складі підсистеми буде впливати на характеристики як інших об'єктів, так і системи в цілому, що створює необхідність відповідної зміни параметрів системи загалом при зміні таких у деяких її елементів для дотримання відповідності наявним обмеженням.

Разом із імовірністю виникнення впливів турбулентного зовнішнього середовища як на системи управління програмами або проектами, так і на інфраструктурні системи, що підлягають реконструкції, дане ускладнення визначає доцільність застосування методів адаптивного управління в процесах управління змістом ПРІ, в тому числі – в процесах прийняття управлінських рішень при розробці та управлінні архітектурою програм.

Питання управління змістом програм і проектів досліджувалося багатьма вченими, серед яких – Н. Ансофф, С.Д. Бушуєв, Н.С. Бушуєва, В.М. Бабаєв, П. Друкер, В.В. Морозов, Д. Нейман, І.В. Чумаченко, та ін. Питання адаптивного управління програмами та проектами розглядаються у багатьох роботах

українських [1, 2] та закордонних [3, 4] вчених, проте наразі застосування методів адаптивного управління до інфраструктурних проєктів та програм є малодослідженим.

Серед засобів адаптивного управління програмами [5] та проєктами наразі відсутні такі, що могли б ефективно застосовуватись для підтримки прийняття рішень при розробці та управлінні архітектурою програм. До таких, що можуть застосовуватись обмежено, належать засоби моделювання систем [6-10], проте їх аналіз дозволив виявити ряд недоліків:

- відсутність врахування комплексності систем у контексті відображення параметрів систем та взаємозв'язку їх елементів;
- неможливість їх застосування у процесах управління програмами та проєктами через відсутність елементів підказок для децидента, що можуть застосовуватись для підтримки прийняття управлінських рішень;
- неможливість масштабування засобів для подальшого застосування для систем інших рівнів;
- незручність у користуванні для децидента.

Серед наведених недоліків також необхідно виділити відсутність врахування екологічної компоненти при прийнятті рішень. Згідно Закону України «Про охорону атмосферного повітря» [11] встановлюється нормування у галузі охорони атмосферного повітря, в тому числі визначаються нормативи гранично допустимих викидів забруднюючих речовин стаціонарних джерел. Існуючі засоби підтримки прийняття рішень не дозволяють враховувати вплив об'єктів інженерної інфраструктури на довкілля, що знижує ефективність прийняття рішень при управлінні ПРП.

Окремим фактором у процесі прийняття рішень при реалізації ПРП є наявність впливу суб'єктивних суджень, що пов'язана з відсутністю альтернатив елементів обладнання у пропозиціях фахівців у складі команд проєктів. Це призводить до можливості вибору такого переліку обладнання до встановлення на об'єктах системи, що реконструюється, який не відповідає заданим обмеженням програм. При цьому можливий негативний вплив на досягнення цілей програми.

Відповідно, для забезпечення ефективної реалізації програм та проєктів з реконструкції інженерної інфраструктури необхідна наявність адаптивного інструменту для розробки та управління архітектурою програми з урахуванням наявних обмежень, екологічної компоненти та наявністю альтернатив можливих рішень.

Із огляду на це, створення компонентів інформаційної технології підтримки прийняття рішень на етапах планування та виконання програм з реконструкції інфраструктурних систем є *актуальним науково-прикладним завданням*.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана в рамках науково-дослідної роботи Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова під час виконання проєкту Міністерства розвитку громад та територій України «Проведення аналізу факторів, що впливають на досягнення мінімальних вимог щодо енергетичної ефективності прийнятих в експлуатацію будівель, та розроблення пропозицій щодо удосконалення методики визначення економічно доцільного рівня енергетичної ефективності будівель» (№ ДР 0121U113140); наукової роботи, науково-технічного та інфраструктурного проєкту «Розробка інтелектуальної енергоефективної системи централізованого тепlopостачання з інтеграцією відновлювальних джерел енергії» (№ ДР 0123U102775).

Мета і завдання дослідження. *Метою дослідження є підвищення ефективності прийняття рішень при плануванні та управлінні змістом програм з реконструкції інженерної інфраструктури.*

Досягнення поставленої мети вимагає виконання таких завдань:

- аналіз структури та обмежень програм з реконструкції інженерної інфраструктури;
- аналіз теоретико-методичних засад адаптивного управління програмами;
- аналіз наявних підходів та засобів адаптивного управління програмами в контексті їх застосування у програмах з реконструкції інженерної інфраструктури;
- розробка моделі підтримки прийняття рішень при управлінні програмами з реконструкції інженерної інфраструктури;

- розробка методу прийняття рішень при управлінні програмами з реконструкції інженерної інфраструктури за допомогою використання моделі;
- розробка програмної реалізації запропонованих моделі та методу;
- апробація і впровадження результатів дослідження.

Об'єкт дослідження – процеси прийняття рішень при управлінні програмами.

Предмет дослідження – інструменти підтримки прийняття рішень при управлінні програмами.

Методи дослідження. У проведених дослідженнях використовувались такі методи: аналізу та синтезу, системного аналізу при проведенні теоретичного дослідження; метод формалізації для опису структури програми, системи управління програмою тощо, формулювання обмежень для структури програм, завдань управління програмами з реконструкції інженерної інфраструктури, компонентів моделі підтримки прийняття рішень; абстрактно-логічний метод при визначенні специфічних особливостей управління програмами з реконструкції інженерної інфраструктури, характерних ризиків таких програм; математичного моделювання для розробки моделі підтримки прийняття рішень; структурного аналізу для визначення складу інфраструктурних систем та систем теплопостачання зокрема як об'єктів реконструкції; параметричного аналізу для визначення структури систем теплопостачання.

Наукова новизна отриманих результатів.

Уперше розроблено:

- метод прийняття рішень при управлінні програмами з реконструкції інженерної інфраструктури, заснований на використанні сервісу машинного навчання для вибору параметрів інфраструктурної системи, що забезпечують мінімізацію шкідливого впливу системи на довкілля, який, на відміну від існуючих, надає можливість врахування взаємозв'язків елементів систем, що дозволяє підвищити ефективність прийняття рішень при управлінні програмами та проектами з реконструкції інженерної інфраструктури завдяки скороченню планованих термінів впровадження;

Удосконалено:

– прогнозу модель підтримки прийняття управлінських рішень, засновану на штучній нейронній мережі, яка, на відміну від існуючих, використовує історичні дані для прогнозування значення цільової функції, що дозволяє скоротити плановані терміни програм, забезпечити можливість масштабування та комплексність відображення систем, врахувати категорії даних при здійсненні прогнозування значення цільової функції.

– систему компонентів моделі, заснованих на засобах машинного навчання, які, на відміну від існуючих, здійснюють перерозподіл варійованих параметрів у залежності від цілей моделювання, що дозволяє забезпечити адаптацію процесу прийняття рішень при реалізації програм з реконструкції інженерних інфраструктурних систем до індивідуальних умов та обмежень експлуатації.

Дістало подальшого розвитку:

– комбінований метод адаптивного управління програмами, заснований на методах пасивного та активного адаптивного управління програмами, який, на відміну від існуючих, застосовує одночасно методи навчання та прогнозування результатів керівних впливів, що дозволяє підвищити ефективність адаптивного управління програмою.

Практичне значення одержаних результатів.

Розроблена модель підтримки прийняття рішень на основі штучної нейронної мережі дозволяє впровадити методологію адаптивного управління в процеси управління програмами з реконструкції інженерної інфраструктури через застосування засобу прогнозування результатів реалізації управлінських рішень та моделювання системи-об'єкту реконструкції при управлінні змістом програм.

Запропонована модель дозволяє обирати проекти до складу архітектури програми з урахуванням поточних значень параметрів елементів системи-об'єкту проектування, вносити зміни до архітектури програми внаслідок впливів зовнішнього або внутрішнього середовища, що дає системі управління програмою можливість адаптувати процеси управління до наявних умов для максимізації досягнення цілей програм та проектів та дотримання обмежень.

Розроблено метод прийняття рішень при використанні моделі підтримки прийняття рішень при управлінні ПРІ, що дозволяє підвищити ефективність прийнятих управлінських рішень шляхом використання моделі підтримки прийняття управлінських рішень в процесах управління програмою завдяки скороченню планованих термінів реалізації програми, врахувати екологічну компоненту при прийнятті рішень, запобігти впливу суб'єктивних суджень фахівців при формуванні конфігурації реконструйованої підсистеми.

Розроблений графічний інтерфейс моделі дозволяє проводити розрахунок значень цільової функції без використання спеціалізованих програмних засобів. Функціонал пост-обробки даних дозволяє отримати додаткову інформацію, що дає можливість враховувати взаємозв'язки елементів системи при розробці та управлінні архітектурою програми.

Результати дослідження впровадження у діяльність приватного підприємства «Донком».

Результати дослідження та розробки, а саме: модель підтримки прийняття рішень при управлінні програмами з реконструкції інженерної інфраструктури, метод прийняття рішень при управлінні програмами з реконструкції інженерної інфраструктури впроваджено в навчальний процес підготовки магістрів галузі знань 12 «Інформаційні технології», спеціальності 122 «Комп'ютерні науки», освітньої програми «Комп'ютерні науки. Управління проектами» Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова при викладанні дисциплін «Міські проекти і програми», «Інформаційні системи та наукові дослідження в управлінні проектною організацією».

Особистий внесок здобувача. За темою дисертації з викладенням її основного змісту опубліковано 11 праць, з них: 8 статей у наукових фахових виданнях категорії «Б», зокрема одну статтю опубліковано у виданні, що входить до міжнародної наукометричної бази Scopus та 3 праці апробаційного характеру.

Усі наукові положення, висновки і рекомендації одержані автором особисто. У публікаціях, підготовлених в співавторстві, здобувачеві належать такі результати: аналіз теоретичних засад управління складними нелінійними

системами [12], програмна частина модуля оптимізації на основі нейронних мереж [13], оптимізація рівняння регресії, структурний аналіз моделі та визначення комплексу індикаторів для прогнозування [14], математична модель гібридного енергетичного комплексу з урахуванням впливу комплексу факторів на режими функціонування [15], аналіз теоретичних засад адаптивного управління програмами з реконструкції інженерної інфраструктури, розробка комбінованого методу адаптивного управління програмами [16], модель підтримки прийняття рішень при управлінні програмами та проєктами з реконструкції інженерної інфраструктури [17], аналіз можливостей застосування штучного інтелекту в системах підтримки прийняття рішень [18], аналіз можливостей застосування методів машинного навчання для розробки моделі [19-20]. Також опубліковано дві одноосібні статті, в яких викладено наступні наукові результати: компоненти моделі, що здійснюють перерозподіл варійованих параметрів у залежності від цілей моделювання [21], метод прийняття рішень при управлінні програмами з реконструкції інженерної інфраструктури з використанням моделі [22]. Результати дисертації опубліковано в повному обсязі.

Апробація результатів дисертації. Основні результати роботи доповідалися й обговорювалися на таких науково-технічних конференціях: Міжнародна науково-технічна конференція «Інформатика, Автоматизація, Математика». (м. Суми, 20-24 квітня 2020 р.), дистанційно; Міжнародний форум «International Forum for Young Researchers». (м. Харків, 25 вересня 2020 р.), дистанційно; Всеукраїнська науково-практична конференція здобувачів вищої освіти і молодих учених «Перспективи розвитку територій: теорія і практика». (м. Харків, 19-20 листопада 2020 р.), дистанційно; Міжнародна конференція «Smart Technologies in Urban Engineering». (м. Харків, 9-11 червня 2022 р.), дистанційно.

РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ АДАПТИВНОГО УПРАВЛІННЯ ПРОГРАМАМИ З РЕКОНСТРУКЦІЇ ІНЖЕНЕРНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

1.1 Проєкти та програми з реконструкції інженерної інфраструктури як складні організаційно-технічні системи

Комплекси інженерної інфраструктури є складними організаційно-технічними системами [23, 24], що складаються з множин елементів – об'єктів цих систем. Наприклад, для систем теплопостачання міст можна виділити такі підсистеми:

1. Підсистема генерування – включає в себе об'єкти, що генерують теплову енергію – ТЕЦ та котельні;

2. Підсистема розподілу – комплекс трубопроводів різного діаметру, насосних станцій тощо, який забезпечує передачу теплоносія від об'єкту генерування до споживачів;

3. Підсистема перетворення – відповідає за зміну характеристик теплоносія при його передачі до споживача – центральні та індивідуальні теплові пункти.

Подібну класифікацію також можна застосувати до інших інфраструктурних систем. Так, для систем електропостачання у якості об'єктів генерування будуть виступати електростанції, розподілу – лінії електропередачі, перетворення – трансформаторні підстанції. Для систем газопостачання об'єкти розподілу – трубопроводи та компресорні станції, перетворення – газорегуляторні станції та пункти. Варто відмітити, що підсистему генерування для систем газопостачання недоцільно враховувати в контексті реалізації проєктів та програм з реконструкції інженерної інфраструктури, оскільки об'єктами таких підсистем є установки комплексної підготовки газу, які не входять до складу міських газорозподільчих мереж.

За рахунок взаємозв'язку елементів зміна характеристик об'єкту в складі підсистеми буде впливати на характеристики як інших об'єктів, так і системи в цілому. Так, заміна насосів на котельній на більш потужні або збільшення з

подальшою зміною гідравлічних параметрів системи спричинить зміни гідравлічних параметрів підсистем розподілу та перетворення. Встановлення резервних генераторів та баків-акумуляторів на ТЕЦ забезпечить безперебійну подачу теплоносія до споживачів у випадку виникнення аварійних ситуацій.

Відповідно, підсистеми є взаємопов'язаними від об'єкту генерування до споживача енергії. Тому заміна параметрів обладнання на початку ланцюга буде прямо впливати як на подальші його ланки, так і на кінцевого споживача.

Реконструкція систем інженерної інфраструктури здійснюється в рамках реалізації відповідних програм. За рахунок взаємопов'язаності елементів систем впроваджувані проєкти є взаємопов'язаними та не можуть розглядатись у відриві один від одного. Враховуючи це, важливе застосування саме програмного підходу як холістичного та такого, що забезпечує досягнення заданих цілей в рамках системи. Застосування методологій управління проєктами можливе лише на об'єктному рівні.

Категоризацію таких проєктів доцільно здійснювати відповідно до складу підсистем інфраструктурних систем. Так, проєкти з реконструкції інженерної інфраструктури можна розділити на проєкти з реконструкції об'єктів генерування енергії, об'єктів розподілу енергії та об'єктів перетворення енергії.

Програми з реконструкції інженерної інфраструктури спираються на параметри наявного в системах обладнання, тому будь-які зміни таких параметрів будуть впливати на відбір обладнання до встановлення на об'єктах в рамках запланованих робіт. Відповідно, це впливатиме на процеси управління такими програмами:

– Управління змістом – в результаті зовнішнього або внутрішнього впливу на елемент або елементи системи-об'єкту реконструкції може виникнути необхідність виконання додаткових робіт або реалізації додаткових проєктів;

– Управління вартістю – впровадження додаткових проєктів, або робіт, або необхідність зміни характеристик обладнання, що планується до встановлення, може мати вплив на загальну вартість проєкту або програми;

- Управління розкладом – необхідність впровадження додаткових проєктів або робіт може збільшити терміни виконання програми або проєкту;
- Управління поставками – впровадження додаткових проєктів або робіт спричинить розширення плану поставок тощо.

Обмеженнями при впровадженні програм виступають наявність фінансових ресурсів та технічна доцільність впровадження проєктів. Останнє обмеження пов'язане із можливістю включення до складу програми таких проєктів, які виконують однакові функції у процесі досягнення стратегічних цілей програми або не сприяють досягненню таких цілей при наявних умовах зовнішнього середовища. Обмеження за фінансами та за технічною доцільністю відображені відповідно формулами (1.1) та (1.2)-(1.3).

$$\sum_{i=1}^n Cf_i \leq Inv_p, \quad (1.1)$$

де Cf_i – сума грошових потоків проєкту i , що є частиною архітектури програми;

Inv_p – загальні інвестиції на реалізацію програми;

n – загальна кількість проєктів у архітектурі програми.

$$Ef_{Pr_i} \neq Ef_{Pr_{i+1}} \quad (1.2)$$

$$\sum_{i=1}^n I_{Pr_i}^S = 1, I_{Pr_i}^S \geq 0, \quad (1.3)$$

де Ef_{Pr_i} – ефект від впровадження проєкту i ;

$I_{Pr_i}^S$ – індекс досягнення стратегічних цілей програми для проєкту i .

При цьому, Ef_{Pr_i} відобразимо у вигляді множини (1.4).

$$Ef_{Pr_i} = \{PA_1, PA_2, \dots, PA_m\}, \quad (1.4)$$

де PA_m – зміна параметру m об'єкту управління.

Застосування стандартного підходу до управління програмами, який не передбачає адаптивності, є широко розповсюдженим для різних типів програм [25-27]. Проте ПРІІ як програмам, об'єктами яких є складні організаційно-технічні системи, властивий високий рівень структурної та динамічної складності, що при синтезі системи адаптації призводить до виникнення наступних проблем:

- проблема нестачі апріорної інформації, коли інваріантна модель ПРІІ та адекватна модель системи управління не можуть бути побудовані на основі наявної інформації;

- проблема неможливості побудови аналітичної математичної моделі традиційними засобами (функції, диференціальні рівняння) [1].

У кореляції з обмеженнями (1.1)-(1.3) ці проблеми прямо впливають на процеси планування змісту в контексті розробки архітектури програми. Архітектура, в свою чергу, впливає на процеси планування розкладу програми, оцінки витрат, планування поставок.

Застосування стандартного підходу до планування та управління ПРІІ підвищує ймовірність ризиків, серед яких:

- ризики витрат – помилки при розробці архітектури програми та відсутність адаптації до збурень зовнішнього середовища можуть призвести до перевищення бюджету програми та/або недосягнення її стратегічних цілей;

- ризики графіку – неможливість адаптації до збурень зовнішнього середовища при управлінні архітектурою програми може призвести до перевищення термінів впровадження програми та підвищує вірогідність виникнення ризиків витрат;

- операційні ризики – можуть виникнути в процесі впровадження програми, пов'язані із впливом зовнішніх збурень; відсутність механізму адаптації до таких збурень може негативно вплинути на ефективність реалізації програми;

- технологічні ризики – неможливість адаптації до змін у впроваджуваних технологіях, появи більш ефективних технологічних засобів може призвести до неповного досягнення стратегічних цілей ПРІІ.

Таким чином, для ефективної розробки та управління архітектурою програми доцільним є використання адаптивного підходу до управління ПРП.

1.2 Аналіз теоретичних аспектів адаптивного управління програмами

F. Heylighen [28], розглядаючи питання самоорганізації систем, визначає адаптацію як досягнення стану відповідності між системою та зовнішнім середовищем. При цьому, термін «відповідність» відображає конфігурацію системи, за якої остання може підтримувати свій стан або зростати за конкретних умов навколишнього середовища. Невідповідність, у свою чергу, призводить до зростання ентропії в системі та її руйнування при поточних граничних умовах. Для складних систем адаптація визначається здатністю системи пристосовуватись до нових граничних умов, підтримуючи максимально можливий рівень стійкості їх організації.

В кібернетиці адаптація визначається як задача контролю, що полягає у мінімізації відхилень від цільової конфігурації системи шляхом реагування на збурення з боку зовнішнього середовища до того, як такі збурення поставлять під загрозу базову організацію системи [28]. Тоді адаптивність – характеристика системи, що визначає її можливість до адаптації.

Відповідно, адаптивну систему розуміємо як систему, що пристосовується до змін навколишнього середовища для контролю рівня ентропії. У випадку штучних систем серед задач адаптивності виділяють також наступне:

- підтримка здатності системи реалізовувати свої функції під впливом зовнішніх збурень;
- здатність системи підтримувати початковий рівень ефективності її функціонування відповідно до умов зовнішнього середовища.

Однак не можна розглядати адаптивність як характеристику, що притаманна штучним системам, які не керуються людиною або не застосовують технологію штучного інтелекту. Організаційно-технічні системи можуть адаптуватись до збурень зовнішнього середовища через здійснення керівного впливу, подібний вплив також може здійснюватись за допомогою штучного інтелекту [29-32].

Системи управління програмами відносяться до складних організаційно-технічних систем. З огляду на вищенаведене, розглядаємо таку систему як потенційно адаптивну, за умови застосування принципів адаптивного управління.

R.M. Argent [33] виділяє 4 компоненти адаптивного управління екосистемами:

- навчання – моніторинг та оцінка даних;
- опис – агрегація інформації про систему-об'єкт управління та її репрезентація;
- прогнозування – «тестування політик та пропонованих дій»;
- діяння – реалізація управлінських експериментів.

Навчання як процес аналізу «досвіду», отриманого при реалізації впливу, та коригування подальших дій з урахуванням такого «досвіду» для максимізації ефективності впливу, а також прогнозування результатів дій при визначених умовах є невід'ємною частиною адаптації загалом.

В цілому, можна застосувати таку декомпозицію процесу адаптивного управління також і для інших систем. Тоді навчання системи управління у цьому випадку буде полягати у циклічному зборі даних зворотного зв'язку від об'єкту управління та подальшому коригуванні керівного впливу.

У контексті управління системами О.А. Фельдбаум визначає адаптацію третьою ієрархією. При цьому, перша ієрархія – управління як реалізація керівного впливу, друга – регулювання як реалізація керуючого впливу з використанням зворотного зв'язку [1].

У випадку першої ієрархії завдання управління виражається формулою (1.5) [1].

$$Q(x, \omega) \xrightarrow{x \in X} \max(x), \quad (1.5)$$

де Q – функція якості системи;

x – керуючий вплив;

ω – збурення зовнішнього середовища.

Відповідно, основним завданням системи управління є знаходження керуючих впливів, які максимізують функцію якості системи Q при впливі зовнішніх збурень. Параметр якості системи включає придатність ПРП до реалізації та її цінність, тобто доведення значення індексу виконання стратегічних цілей до одиниці $I^s=1$; максимізацію фінансової, технологічної та агрегованої цінностей ПРП [1].

У випадку відкритої системи, така модель повинна передбачувати вплив на об'єкт всього комплексу впливів зовнішнього середовища. Подібне обмеження призводить до надмірного зростання складності системи управління.

Зниження вимог до системи управління можливо при введенні зворотного зв'язку. Його застосування забезпечує систему управління інформацією про розрив між фактичним виходом системи та тим виходом, що вимагається згідно завдання управління.

Формальна постановка завдання управління для випадку застосування зворотного зв'язку [1]:

$$Q(S, x, y, \omega) \xrightarrow{x \in X, y \in Y} \max(x), \quad (1.6)$$

де S – завдання, план управління;

y – стан об'єкта управління.

У нестационарних умовах, коли ПРП піддається впливу різних зовнішніх факторів, істотним стає питання якості управління. Згідно методу модифікаційної мінливості, до підвищення якості управління призводить як зниження ентропії, так і розширення методологічної бази, що формує алгоритм управління. Таким чином, формально завдання управління перетворюється до вигляду [1]:

$$Q(S, x, y, m, \omega) \xrightarrow{x \in X, y \in Y, m \in M} \max(x), \quad (1.7)$$

де m – закон управління.

Необхідно знайти такий закон управління, при якому забезпечується максимальне значення індексу виконання стратегічних цілей у заданому діапазоні керуючих впливів. При цьому, зовнішні збурення викликають порушення оптимуму та падіння якості управління.

Подальше зниження якості управління, через збільшення розриву між новим оптимальним законом управління (законом, що забезпечує екстремальне значення Q) та фактично діючим законом, може призвести до нестійкості та некерованості системи [1].

Для ПРП адекватним рішенням даної проблеми є синтез адаптивної системи управління, що перебудовує закон управління в залежності від збурень [1].

Вимоги до якості регулювання ПРП як організаційно-технічних систем, вимагають оптимізації параметрів системи управління, що можливе лише при наявності достатньо формалізованої моделі об'єкта управління. Введення контуру адаптації (третьої ієрархії або зворотного зв'язку за якістю) дозволяє змодельовати систему управління, що реалізує оптимальне управління в динаміці.

Необхідність до адаптації виникає в умовах неповноти інформації [1]. В процесі адаптації знання накопичуються, а система вдосконалюється. Адаптація в управлінні системою полягає у зміні параметрів системи, структурних елементів та зв'язків, а також алгоритмів управління з метою забезпечення необхідних значень критеріїв якості.

Проблеми, пов'язані з високим рівнем структурної та динамічної складності ПРП, відображені у підрозділі 1.1 даної дисертаційної роботи, можуть бути вирішені за допомогою моделювання системи, що є об'єктом управління, за методом «чорного ящика». При цьому для входів системи N та виходів Y будуть актуальні залежності (1.8) (статична модель), (1.9) (динамічна модель) [1].

$$y_i = f_i(n_1, n_2, \dots, n_i), n \in N \quad (1.8)$$

де y_i – i -й вихід об'єкту управління;

n_i – i -й вхід об'єкту управління.

$$\begin{aligned} y_i(T) &= F(n_1(T), n_2(T), \dots, n_n(T)), \\ \forall T \in T^{\max} &= \{T^{St}, T^{Fin}\}, n \in N \end{aligned} \quad (1.9)$$

де T – час функціонування об'єкту управління;

T^{\max} – максимальне значення часу функціонування об'єкту управління;

T^{St} – початковий момент функціонування об'єкту управління;

T^{Fin} – кінцевий момент функціонування об'єкту управління.

Під час реалізації ПРІІ накопичується інформація про входи об'єкту управління, також уточнюється інформація про його виходи. Така інформація акумулюється в базі знань та передається як у системі управління, так і у системі адаптації.

Схема процесу адаптивного управління ПРІІ згідно [1] наведена на рисунку 1.1.

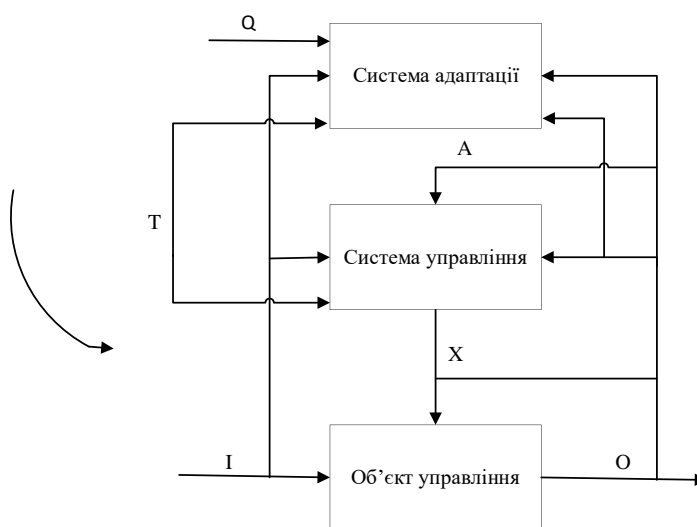


Рисунок 1.1 – Схема адаптивного управління ПРІІ: I – вхідні дані (відома інформація про об'єкт); O – вихідні дані (стан об'єкту управління); T – завдання управління; Q – заданий рівень якості управління; X – керівний вплив; A – адаптуючий вплив

Модель системи управління програмами при застосуванні адаптивного підходу буде мати наступний вигляд:

$$PM = \{MD, MP, ID, K, AM\}, \quad (1.10)$$

де PM – система управління програмою;

MD – множина управлінських рішень;

MP – множина процесів управління програмою;

ID – множина вихідних даних програми;

K – множина знань;

AM – множина засобів адаптивного управління програмами.

Засоби адаптивного управління доцільно класифікувати відповідно до класифікації елементів адаптивного управління за R. Argent [33]. Множина відповідних засобів відображена формулою (1.11).

$$AM = AM_{learn} \cup AM_{om} \cup AM_{for} \cup AM_{ex} \quad (1.11)$$

де AM_{learn} – методи навчання;

AM_{om} – моделі та засоби моделювання об'єкту управління;

AM_{for} – методи та інструменти прогнозування;

AM_{ex} – управлінські експерименти.

Важливо відмітити різний рівень доцільності окремих засобів, що входять до відповідних підмножин, для різних видів програм та фаз їх реалізації.

1.3 Аналіз інструментарію адаптивного управління програмами з реконструкції інженерної інфраструктури

Під час впровадження програми системою управління можуть використовуватись активний або пасивний підходи до адаптивного управління програмами [34]. Сутність пасивного адаптивного управління полягає у

впровадженні процесу навчання в існуючий підхід, активного – у попередньому проведенні експериментів для визначення найкращого підходу до управління.

Спрощену схему процесу пасивного адаптивного управління ПРІІ зобразимо графічно (рисунок 1.2).



Рисунок 1.2 – Схема процесу пасивного адаптивного управління ПРІІ

Пасивне адаптивне управління ПРІІ передбачає використання зворотного зв'язку для максимізації ефективності здійснюваних керуючих впливів та реалізації цілей програми. Отримані дані застосовуються для прогнозування результатів майбутніх керуючих впливів, коригування проміжних цілей програми тощо. Також, завдяки накопиченню досвіду при управлінні відкритою динамічною системою, якою є ПРІІ, пасивний адаптивний підхід дозволяє краще адаптуватися до зовнішніх збурень та мінімізувати негативний вплив зовнішнього середовища на процес реалізації програми [16].

Схему процесу активного адаптивного управління ПРІІ наведено на рисунку 1.3.



Рисунок 1.3 – Схема процесу активного адаптивного управління ПРП

Основна відмінність від пасивного адаптивного управління полягає у попередньому прогнозуванні результатів здійснення керівного впливу та виборі найкращого з можливих варіантів.

Для максимізації ефективності реалізації ПРП доцільне використання елементів обох типів адаптивного управління: застосування системою управління програмою процесів як прогнозування, так і навчання. Схему процесу комбінованого адаптивного управління наведено на рисунку 1.4.

Таким чином, наявне як використання зворотного зв'язку та накопичення отриманого досвіду реалізації керуючих впливів під час реалізації ПРП, так і застосування подібного досвіду при проведенні їх моделювання та аналізу.

Завдяки застосуванню комбінованого підходу до адаптивного управління можлива максимізація ефективності адаптивного управління програмою [16].



Рисунок 1.4 – Схема процесу комбінованого адаптивного управління ПРІІ

Серед існуючих засобів адаптивного управління програмами, запропонованих у [5], для ПРІІ доцільно використовувати наступне:

- Адаптивні логіко-структурні матриці – зміна цільових показників та структури програми з урахуванням умов зовнішнього середовища;
- Використання даних в реальному часі – постійний збір інформації про хід реалізації програми;
- Гнучкі фінансові рамки програми – змінна структура витрат, вбудовані можливості для перерозподілу бюджету;
- Структуровані цикли навчання – відповідають концепції пасивного адаптивного управління програмами, передбачають впровадження циклічного процесу навчання на даних зворотного зв'язку;
- Дослідження дії – постійне накопичення та аналіз даних стосовно результатів здійснених керівних впливів для подальшого коригування процесу управління.

При класифікації за R. Argent [33], використаної у множині (1.11), з описаних засобів методам навчання відповідають структуровані цикли навчання. Інші засоби є такими, що дають змогу накопичувати інформацію для подальшого навчання (дослідження дії, використання даних у реальному часі) та здійснювати коригування процесів управління програмою в ході адаптації (адаптивні логіко-структурні матриці, гнучкі фінансові рамки). Відповідно, можна виділити їх в підмножини методів збору даних AM_{dg} та методів здійснення адаптивного впливу AM_{imp} .

Питання адаптивного управління проектами та програмами розглядається дослідниками у застосуванні до різних сфер діяльності. При цьому, більше уваги приділено саме адаптивному управлінню проектами.

У роботі [35] запропоновано адаптивну модель управління проектами для створення професійної докторантури з управління бізнесом. У результаті дослідження було розроблено адаптивну модель управління проектами з постійним плануванням діяльності, що відбувається в кожному циклі взаємодії, використанням інкрементального підходу до впровадження проекту, регулярним проведенням перевірок проміжних результатів та можливістю адаптації до зміни змісту проекту протягом фази виконання.

Модель розподіляє «практики адаптивного управління проектами» на чотири фази реалізації проекту:

1. Планування – стартова зустріч проекту, пріоретизація робіт, розподіл пакетів робіт між фазами проекту;
2. Впровадження – реалізація робіт, контроль та моніторинг реалізації, щоденні зустрічі;
3. Валідація – перевірка досягнення цілей;
4. Закриття – аналіз досвіду, накопиченого при впровадженні проекту.

У роботі [36] описується адаптивна програма для реінтродукції земноводних, що знаходяться під загрозою зникнення, в Італії. Автори застосували адаптивний підхід, щоб визначити, чи слід використовувати розведення в неволі, висаджування пуголовків або пряму транслокацію яєць з метою створення нової популяції при

мінімізації впливу вилову з диких популяцій. Підхід було реалізовано шляхом побудови кількісної моделі системи, невизначеність параметрів моделі було сформульовано за допомогою розподілу ймовірностей, переваги навчання було оцінено за допомогою моделювання. Автори відмічають підвищення ефективності моніторингу та зміни дій в рамках проєкту, а також забезпечення можливості більш безпечного реагування на негативні зовнішні впливи.

Робота [37] аналізує внутрішні та зовнішні змінні в управлінні великими програмами для підвищення ефективності управління ризиками програм. Авторами розроблено системну динамічну модель програми, що враховує наведені змінні, яка може використовуватися при управлінні великими програмами.

Не дивлячись на те, що питання адаптивного управління проєктами та програмами [38-40] та управління реконструкцією інженерної інфраструктури [41-45] є достатньо дослідженими, відсутні дослідження стосовно засобів адаптивного управління, що враховували б специфіку програм з реконструкції інженерної інфраструктури.

При розгляді інструментів адаптивного управління за [33], у якості таких інструментів можуть застосовуватись засоби для моделювання об'єктів-систем реконструкції в контексті моделювання системи та прогнозування для подальшого прийняття управлінських рішень при плануванні та управлінні змістом програм. Вони дозволяють здійснювати опис системи за допомогою методів математичного моделювання та прогнозування значення цільової функції в залежності від наявних обмежень для подальшого вибору необхідних параметрів елементів об'єкту та розробки архітектури програми.

Прикладом такого засобу є модель, представлена X. Zheng, G. Wu, Y. Qiu, X. Zhan, N. Shah, N. Li, Y. Zhao [10]. Авторами розроблена багатоцільова оптимізаційна модель системи централізованого теплопостачання та охолодження, що базується на методі змішаного цілочисельного нелінійного програмування.

Дана модель також ставить за мету мінімізацію витрат на капітальні вкладення та підтримку функціонування системи через підбір оптимальної потужності обладнання. В цьому випадку не оптимізується розподіл енергії між

будівлями, проте є можливість формування сценаріїв не за кількістю будівель та проектними обмеженнями на розподіл технологій всередині мікрорайону, а за цільовими критеріями. Конкретно в [10] розглядається чотири сценарію: базовий, найнижчі витрати на енергію, найнижчі викиди CO₂, інтегрований.

Цільова функція представлена формулою (1.12).

$$NPV = \min \left[\sum_y \frac{CC_y + OM_y - RE_y}{(1+r)^y} \right], \quad (1.12)$$

де NPV – чиста приведена вартість системи теплопостачання та охолодження, EUR;

CC_y – капітальні вкладення за рік y , EUR;

OM_y – операційні витрати за рік y , EUR;

RE_y – дохід від продажу електроенергії в мережу за рік y , EUR;

r – ставка дисконтування.

Обмеження поділяються на декілька груп: пов'язані з енергопотребою, технологічні, пов'язані з відновлюваною енергією, пов'язані з технологіями зберігання, пов'язані з викидами CO₂, пов'язані з витратами на енергоспоживання.

Використання цієї моделі та подібних [8, 9] в процесах управління ПРП дозволяє здійснювати підтримку прийняття управлінських рішень шляхом прогнозування значення цільової функції при наявних обмеженнях та моделювання системи-об'єкта реконструкції у якості методу її опису, проте є малоефективним. Основною причиною цього є характер вихідних даних моделей та їх структура в цілому, вони не враховують взаємозв'язок елементів систем. Відповідно, стає неможливим прогнозування взаємного впливу змін параметрів окремих елементів систем, на основі чого неможливо моделювати та оцінювати управлінські впливи та приймати відповідні управлінські рішення.

Переважає більшість існуючих моделей у якості обмежень використовує технічні параметри системи та дуже обмежено – екологічні, що негативно впливає на якість прийняття рішень при реконструкції складних відкритих динамічних

систем. Відсутній комплексний підхід, який враховував би вплив системи на навколишнє середовище (викиди парникових газів в цілому, вплив трубопроводу на ґрунт тощо), складові енергетичної безпеки та експлуатаційної надійності, енергоефективності.

Користування моделями відбувається за допомогою середовища GAMS, самі моделі являють собою комплекс рівнянь та нерівностей. Таке представлення моделей дозволяє користуватися ними особам, що володіють специфічними знаннями та навичками. Дециденти в системах управління інфраструктурними програмами не мають повної можливості користуватися ними через брак компетентності у користуванні методами математичного програмування та спеціалізованими програмними продуктами.

Доцільно розглянути інші методи моделювання. Порівняльний аналіз наведено у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Порівняльний аналіз методів моделювання

Метод моделювання	Переваги	Недоліки
Моделі на основі генетичних алгоритмів	1. Врахування нелінійних зв'язків між цільовим показником та вхідними даними; 2. Можливість визначення оптимальних комбінацій характеристик модельованого об'єкту.	1. Необхідність використання виключно кількісних даних; 2. Широкий розкид результатів обчислень відносно абсолютного екстремуму.
Метод Декартового добутку множин	1. Висока точність обчислень; 2. Можливість врахування залежностей між характеристиками модельованого об'єкту.	1. Необхідність використання виключно кількісних даних; 2. Необхідність застосування великих розрахункових потужностей для обчислення цільового показника.
Регресійні моделі	1. Висока точність обчислень; 2. Можливість визначення ступеню важливості змінних завдяки коефіцієнтам.	1. Необхідність використання виключно кількісних даних;

Таким чином, беручи до уваги недоліки вищенаведених моделей, існує потреба у створенні засобу, який буде базуватись на наступних принципах:

– Комплексності – елементи інфраструктурних систем мають широкий ряд параметрів, що не обмежуються їх технічними характеристиками; відповідно, засіб

повинен застосовувати комплексний підхід до моделювання та враховувати також екологічні, економічні параметри елементів систем тощо;

– Простоти і зручності – користування засобом повинно бути доступне особі, яка приймає управлінські рішення при реалізації програм та проєктів з реконструкції інженерної інфраструктури, без необхідності застосування програмних продуктів, що вимагають наявності у користувача спеціальних компетенцій та знань;

– Застосовуваності в процесах управління – результати моделювання мають нести елементи підказок для децидента, які можна застосовувати при прийнятті управлінських рішень;

– Масштабованості – засіб повинен мати потенціал до масштабування модельованих систем за необхідності;

– Можливості застосування категорій даних – засіб повинен передбачати застосування як кількісних, так і якісних даних.

Необхідно забезпечити можливість адаптації процесів управління програмою до внутрішніх та зовнішніх впливів, тому доцільно виділити адаптивність додатковим принципом розробки засобу підтримки прийняття рішень.

Підтримка прийняття рішень повинна реалізовуватись як при розробці архітектури програм шляхом відбору проєктів, що входять до їх складу, так і при управлінні архітектурою в процесі впровадження програми.

Розробку засобу доцільно проводити з використанням технологій машинного навчання [46-50], оскільки їх застосування дозволяє забезпечити його відповідність до вищенаведених критеріїв. З-поміж методів машинного навчання доцільно обрати штучні нейронні мережі [51-54], оскільки моделі на їх основі найбільш досконало реалізують процес обробки категорій даних, що дозволяє забезпечити обробку моделлю як кількісних, так і якісних ознак об'єктів систем.

1.4 Постановка задач дослідження

Відповідно до представленого аналізу особливостей управління програмами з реконструкції систем інженерної інфраструктури, існує проблема створення

засобу підтримки прийняття рішень для використання у процесах планування та управління змістом програми у контексті підбору таких параметрів систем, при яких виконувались би вимоги програми, забезпечувався б адаптивний підхід до впровадження програм.

З урахуванням вищенаведеного, метою дисертації є підвищення ефективності прийняття рішень при плануванні та управлінні змістом програм з реконструкції інженерної інфраструктури завдяки використанню моделі і методу на основі штучної нейронної мережі.

Досягнення поставленої мети вимагає виконання таких завдань:

1) проаналізувати структуру та обмеження програм з реконструкції інженерної інфраструктури;

2) проаналізувати теоретико-методичні засади адаптивного управління програмами;

3) проаналізувати наявні методи та засоби адаптивного управління програмами в контексті їх застосування у програмах з реконструкції інженерної інфраструктури;

4) розробити модель підтримки прийняття рішень при управлінні програмами з реконструкції інженерної інфраструктури на основі штучної нейронної мережі;

5) розробити метод прийняття рішень при управлінні програмами з реконструкції інженерної інфраструктури за допомогою використання моделі;

6) виконати програмну реалізацію запропонованих моделі та методу;

7) виконати апробацію і впровадження результатів дослідження.

1.5 Висновки до розділу 1

В рамках першого розділу проведено аналіз комплексів інженерної інфраструктури як складних організаційно-технічних систем, що дозволило обґрунтувати доцільність застосування програмного підходу при їх реконструкції. Було визначено основні обмеження ПРІ та проблеми, пов'язані з управлінням такими програмами, до яких відносяться нестача апріорної інформації та

неможливість побудови аналітичної математичної моделі системи стандартними засобами формалізації. Це робить доцільним застосування методів адаптивного управління при реалізації ПРІІ.

Проаналізовано розвиток теорії адаптивного управління програмами та засоби адаптивного управління проєктами та програмами. Це дозволило створити необхідне методологічне підґрунтя для визначення місця адаптивного підходу в управлінні програмами.

Проведено формалізацію завдання управління для здійснення управління як реалізації керівного впливу, реалізації керуючого впливу з використанням зворотного зв'язку та реалізації керуючого впливу з використанням зворотного зв'язку в нестационарних умовах, що дозволило визначити необхідність синтезу адаптивної системи управління програмами.

Розглянуто процеси пасивного та активного управління програмами, розроблено схему процесу комбінованого адаптивного управління програмами. Застосування комбінованого адаптивного управління підвищує ефективність управління програмами, оскільки забезпечує одночасно навчання на досвіді здійснення керівних впливів та проведення їх попереднього моделювання для прогнозування результатів таких впливів.

Проведено категоризацію засобів адаптивного управління, проведено аналіз деяких адаптивних засобів управління проєктами і програмами, що дозволило визначити доцільність їх застосування для реалізації ПРІІ.

Визначено доцільність застосування засобів моделювання систем-об'єктів реконструкції як засобів підтримки прийняття рішень при управлінні ПРІІ. Такі засоби не відповідають принципам адаптивності, застосовуваності в процесах управління, комплексності у відображенні параметрів модельованих систем, простоти і зручності, та масштабованості, тому їх використання в процесах управління ПРІІ є неефективним.

Сформульовано мету та задачі дисертаційної роботи.

Основні результати розділу опубліковано в роботах [12, 18-20].

РОЗДІЛ 2. МОДЕЛЬ ТА МЕТОД ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ПРИ УПРАВЛІННІ ПРОГРАМАМИ З РЕКОНСТРУКЦІЇ ІНЖЕНЕРНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

2.1 Модель підтримки прийняття управлінських рішень при реалізації програм з реконструкції інженерної інфраструктури

Для підвищення ефективності управління ПРП через реалізацію адаптивного управління, окрім засобів, зазначених у підрозділі 1.3 даної дисертаційної роботи, пропонується також застосування прогностичної моделі підтримки прийняття управлінських рішень AM_{DSM} .

Підтримка прийняття рішення при використанні моделі, що розглядається у даній дисертаційній роботі, відбувається на основі моделювання системи-об'єкту реконструкції. Інженерні інфраструктурні системи є складними організаційно-технічними системами, для яких формалізація за допомогою стандартних методів, таких, як математичне моделювання, є важкореалізованою [55, 56]. Відповідно, доцільне зображення її у вигляді масиву елементів із заданими параметрами. Для створення подібної моделі застосовується штучна нейронна мережа. Проведення децидентом математичних розрахунків значення цільової функції при заданих значеннях вхідних даних не є необхідним, оскільки його прогнозування відбувається без участі користувача на підставі наявних історичних даних.

Це створює ряд переваг для моделі:

– Комплексність відображення характеристик систем – через відсутність прив'язки до засобів формалізації можливе врахування більшої кількості як кількісних так і якісних показників, що сприяє більш точному відображенню систем;

– Масштабованість модельованої системи – використання методів машинного навчання дозволяє розширювати модельовані системи за рахунок збільшення кількості параметрів, що використовуються у прогнозуванні значення цільової функції;

– Можливість застосування категорій даних при здійсненні прогнозування значення цільового показника – використання штучної нейронної мережі дозволяє використовувати при прогнозуванні як кількісні, так і якісні показники.

Також необхідно виділити універсальність моделі, що полягає у можливості її використання при управлінні програмами з реконструкції різних видів інженерних систем, оскільки метод розробки моделі не передбачає застосування фіксованих змінних, на відміну від розглянутих у [8-10].

Через присутність потенційного впливу на системи-об'єкти моделювання турбулентного зовнішнього середовища, впливу внутрішнього середовища для розробки моделі використано метод прогнозування з дисконтуванням. Регресійні [57] та авторегресійні моделі [58] добре відбивають стійкі тенденції прогнозованих показників. Для того щоб моделі добре відображали тенденції, необхідно при моделюванні використовувати вибіркoву статистичну сукупність параметрів матриці параметрів моделі X і вектору прогнозованих значень цільового показника \bar{Y} в досить великій розмірності вибірки N так, щоб $N \gg n$, де n – число незалежних параметрів.

Однак у цьому випадку можливе перенесення на етап прогнозування деяких тенденцій зміни прогнозованих показників, характерних для далеких часових інтервалів минулого та не характерних для найближчих та прогнозованих часових інтервалів. Для того, щоб зменшити зазначений недолік моделей тренду, не зменшуючи розмірності вибірки, використовується модель прогнозування з дисконтуванням.

Якщо позначити помилку часового інтервалу t через ε_t , то для оцінки коефіцієнтів моделі регресії використовується умова $\min \sum_{t=1}^N \varepsilon_t^2 \beta_t$, де β_t – коефіцієнт дисконтування.

Для багатовимірного випадку $\bar{Y} = \bar{X}\bar{A}$, де \bar{A} – вектор коефіцієнтів моделі, необхідно ввести поняття вектору дисконтування \bar{B} (2.1).

Тоді система нормальних рівнянь (найменших квадратів) матиме вигляд (2.2).

$$\vec{B} = \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_t \\ \vdots \\ \beta_N \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

$$X^t B_d X \vec{A} = X^t B_D \vec{Y}_B \quad (2.2)$$

Тут B_D – діагональна матриця, на головній діагоналі якої знаходяться коефіцієнти вектору \vec{B} ,

$$B_D = \begin{bmatrix} \beta_1 & & & & \\ & \ddots & & & \\ & & \beta_t & & \\ & & & \ddots & \\ & & & & \beta_N \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Тепер, якщо ввести поняття дисконтованого вектору спостережень \vec{Y}_β та дисконтованої матриці X_β , отримаємо

$$\vec{Y}_\beta = \begin{bmatrix} y_{e1} \sqrt{\beta_1} \\ \vdots \\ y_{et} \sqrt{\beta_t} \\ \vdots \\ y_{eN} \sqrt{\beta_N} \end{bmatrix}, X_\beta = \sqrt{B_D} X = \begin{bmatrix} x_{11} \sqrt{\beta_1} & x_{12} \sqrt{\beta_1} & \cdots & x_{1n} \sqrt{\beta_1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{t1} \sqrt{\beta_t} & x_{t2} \sqrt{\beta_t} & \cdots & x_{tn} \sqrt{\beta_t} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{N1} \sqrt{\beta_N} & x_{N2} \sqrt{\beta_N} & \cdots & x_{Nn} \sqrt{\beta_N} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Систему рівнянь можна переписати у матричному вигляді:

$$X_\beta^t X_\beta \vec{A} = X_\beta^t \vec{Y}_\beta \quad (2.5)$$

Прогнозування за моделями з дисконтуванням вимагає визначення на етапі прогнозування $(t + N)$ дисконтованого вектору $X_{\beta(t+N)}$ та, відповідно, визначення прогнозних значень коефіцієнтів дисконтування $\beta_{i(N+T)}$, на етапі $(t + N)$, $i = N+1, \dots, N+T$, де T – термін прогнозування.

Для спрощення цього завдання застосовується формалізоване визначення вектору дисконтування \bar{V} на етапі навчальної вибірки, тоді ця є сама закономірність може бути апроксимована на перспективу.

Регресійні моделі прогнозування параметрів систем [57] дозволяють виконувати прогнози для автономних систем та не враховують структуру інженерних систем – ієрархічний взаємозв'язок між великими вузлами, об'єктами та їх об'єднаннями в рамках системи.

Під час прогнозування в ієрархічних системах необхідно забезпечити узгодженість прогнозних оцінок показників на сусідніх ієрархічних рівнях. Прогнозоване значення показника $y_{\Sigma t}$ для об'єднаної системи на часовий етап t має бути узгоджене із сумою прогнозованих значень тих самих показників y_{it} для всіх $i = 1, 2, \dots, m$ об'єктів, які входять у систему той самий етап t .

Вказану умову можна записати для всього терміну прогнозування $t = t_{N+1}, \dots, t_T$ у наступному вигляді:

$$\sum_{i=1}^m y_{it} = y_{\Sigma t} \quad (2.6)$$

Для узгодження прогнозів застосовуються часові залежності з урахуванням лінійних регресійних моделей прогнозування.

Припустимо, що сформована вибіркова сукупність параметрів x_j , $j=1, 2, \dots, n$, що включає всі величини, що впливають на прогнозовані показники y_i , $i = 1, 2, \dots, m$ та y_{Σ} .

Тоді математичне очікування прогнозованого показника $M(y_i)$ для кожного з об'єктів $i = 1, 2, \dots, m$ і математичне очікування прогнозованого показника для

системи $M_{y\Sigma}$ можна записати в залежності від однієї вибіркової сукупності параметрів $x_j, j = 1, 2, \dots, n$:

$$\begin{aligned} M(y_i) &= \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j, i = 1, 2, \dots, m \\ M(y\Sigma) &= \sum_{j=1}^n a_{\Sigma j} x_j \end{aligned} \quad (2.7)$$

Слід зазначити, що для деяких об'єктів і вибіркова сукупність параметрів $x_j, j = 1, 2, \dots, n$ може виявитися надмірною. У цьому випадку моделі прогнозованого показника y_i при надмірних параметрах x_i матимуть нульові коефіцієнти.

Для отримання узгодженого прогнозу для об'єктів і та системи достатньо врахувати додатково систему обмежень виду:

$$a_{\Sigma j} = \sum_{i=1}^m a_{ij}, j = 1, 2, \dots, n \quad (2.8)$$

Введемо позначення векторів прогнозованих показників $\vec{Y}_i, i = 1, 2, \dots, m$ для окремих об'єктів і \vec{Y}_Σ для системи. Розмірність векторів \vec{Y}_i та \vec{Y}_Σ однакова і дорівнює розмірності вибіркової сукупності N . Вектори помилок моделювання \vec{E}_i та \vec{E}_Σ відповідно для об'єктів $i = 1, 2, \dots, m$ та системи:

$$\vec{Y}_i = \begin{bmatrix} y_{i1} \\ y_{i2} \\ \vdots \\ y_{ik} \\ \vdots \\ y_{iN} \end{bmatrix}, \vec{Y}_\Sigma = \begin{bmatrix} y_{\Sigma 1} \\ y_{\Sigma 2} \\ \vdots \\ y_{\Sigma k} \\ \vdots \\ y_{\Sigma N} \end{bmatrix}, \vec{E}_i = \begin{bmatrix} \varepsilon_{i1} \\ \varepsilon_{i2} \\ \vdots \\ \varepsilon_{ik} \\ \vdots \\ \varepsilon_{iN} \end{bmatrix}, \vec{E}_\Sigma = \begin{bmatrix} \varepsilon_{\Sigma 1} \\ \varepsilon_{\Sigma 2} \\ \vdots \\ \varepsilon_{\Sigma k} \\ \vdots \\ \varepsilon_{\Sigma N} \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

При побудові моделей прогнозування $\vec{Y}_i, i = 1, 2, \dots, m$ та \vec{Y}_Σ використовується матриця параметрів X :

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1j} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2j} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{k1} & x_{k2} & \cdots & x_{kj} & \cdots & x_{kn} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{N1} & x_{N2} & \cdots & x_{Nj} & \cdots & x_{Nn} \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Вектори коефіцієнтів моделей для об'єктів i та системи \bar{A}_i , $i = 1, 2, \dots, m$ та \bar{A}_Σ мають вигляд:

$$\bar{A}_i = \begin{bmatrix} a_{i1} \\ a_{i2} \\ \vdots \\ a_{in} \end{bmatrix}; \bar{A}_\Sigma = \begin{bmatrix} a_{\Sigma 1} \\ a_{\Sigma 2} \\ \vdots \\ a_{\Sigma n} \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Запишемо моделі прогнозування показників \bar{Y}_i для окремих об'єктів $i = 1, 2, \dots, m$ та системи \bar{Y}_Σ у матричній формі:

$$\begin{aligned} \bar{Y}_i &= X \bar{A}_i + \bar{E}_i, i = 1, 2, \dots, m; \\ \bar{Y}_\Sigma &= X \bar{A}_\Sigma + \bar{E}_\Sigma \end{aligned} \quad (2.12)$$

Вирази для векторів помилок моделювання:

$$\begin{aligned} \bar{E}_i &= \bar{Y}_i - X \bar{A}_i, i = 1, 2, \dots, m; \\ \bar{E}_\Sigma &= \bar{Y}_\Sigma - X \bar{A}_\Sigma \end{aligned} \quad (2.13)$$

Для оцінки коефіцієнтів моделей застосовується метод найменших квадратів з урахуванням системи обмежень, тоді якщо об'єднаній системі присвоїти номер «0», то функція помилок моделювання має вигляд:

$$\Phi = \sum_{i=0}^m \sum_{k=1}^N \varepsilon_{ik}^2 = \sum_{i=1}^m (\vec{Y}_i - X \vec{A}_i)' (\vec{Y}_i - X \vec{A}_i) + (\vec{Y}_\Sigma - X \vec{A}_\Sigma)' (\vec{Y}_\Sigma - X \vec{A}_\Sigma) \rightarrow \min \quad (2.14)$$

При врахуванні обмежень,

$$\Phi = \sum_{i=1}^m (\vec{Y}_i - X \vec{A}_i)' (\vec{Y}_i - X \vec{A}_i) + (\vec{Y}_\Sigma - X \sum_{i=1}^m \vec{A}_i)' (\vec{Y}_\Sigma - X \sum_{i=1}^m \vec{A}_i) \rightarrow \min \quad (2.15)$$

Прирівнявши приватні похідні $\partial\Phi/\partial a_i$ до нуля, можна отримати систему нормальних рівнянь розмірністю $m \times n$, де m – число об'єктів, а n – розмірність моделей прогнозування:

$$(X'X)(\vec{A}_i + \sum_{i=1}^m \vec{A}_i) = X'(\vec{Y}_i + \vec{Y}_\Sigma), i = 1, 2, \dots, m \quad (2.16)$$

Таким чином, отримана система рівнянь із невідомими векторами \vec{A}_i , $i = 1, 2, \dots, m$.

Для спрощення введемо позначення інформаційної матриці $X'X = M$:

$$\begin{aligned} M \vec{A}_i + M \sum_{i=1}^m \vec{A}_i &= X' \vec{Y}_i + X' \vec{Y}_\Sigma; \\ M \sum_{i=1}^m \vec{A}_i - X' \vec{Y}_\Sigma &= \vec{Z}_\Sigma; \\ M \vec{A}_i &= X' \vec{Y}_i - \vec{Z}_\Sigma, i = 1, 2, \dots, m \end{aligned} \quad (2.17)$$

Система рівнянь окремо для об'єкту $i=1$:

$$M \vec{A}_1 = X' \vec{Y}_1 - \vec{Z}_\Sigma \quad (2.18)$$

При відніманні цієї системи із рівнянь попередньої:

$$M(\vec{A}_i - \vec{A}_1) = X'(\vec{Y}_i - \vec{Y}_1) \quad (2.19)$$

При поверненні до нормальної системи рівнянь та відніманні від неї отриманого об'єкту отримаємо:

$$(m+1)M\vec{A}_1 = X'(\vec{Y}_i + \vec{Y}_\Sigma - \Delta\vec{Y}_{i1}), \quad (2.20)$$

де $\Delta\vec{Y}_{i1} = \vec{Y}_i - \vec{Y}_1$,

$$(m+1)M\vec{A}_1 = X'(\vec{Y}_1 + \vec{Y}_\Sigma - \sum_{i=2}^m \Delta\vec{Y}_i) \quad (2.21)$$

Таким чином, отримана система рівнянь для оцінки вектору коефіцієнтів моделі \vec{A}_1 . При виконанні аналогічних розрахунків для інших об'єктів $i = 1, 2, \dots, m$ із врахуванням умови $\sum_{i=1}^m a_{ij}, j = 1, 2, \dots, n$ завдання отримання узгодженого точкового прогнозу вирішено.

У якості прогнозного параметру пропонується прийняти питомі річні викиди оксидів вуглецю m_{CO} . Даний параметр надає можливість врахування екологічної компоненти при прийнятті рішень щодо вибору складу параметрів системи \vec{X} .

Підготовка даних моделі відбувається згідно методу імітаційного доповнення за параметрами вкладу. Згідно нього відбувається змішування N некорельованих наборів випадкових чисел, що у ймовірнісному сенсі еквівалентно підсумовуванню функцій густини з відповідними ваговими коефіцієнтами. Оскільки спочатку задається однаковий обсяг для всіх вкладів, вагові коефіцієнти однакові та рівні $1/N$:

$$\hat{f}(x) = \frac{1}{A} \sum_{q=1}^N f^*(x, x_q), \quad (2.22)$$

де $f^*(x, x_q)$ – густина імовірностей вкладу з центром у точці x_q ;

A – коефіцієнт нормування.

$$A = \int_{-\infty}^{\infty} \left[\sum_{q=1}^N f^*(x, x_q) \right] dx = \sum_{q=1}^N \int_{-\infty}^{\infty} f^*(x, x_q) dx = N \quad (2.23)$$

Таким чином, оцінка шуканої густини ймовірностей виражається наступним чином:

$$\hat{f}(x) = \frac{1}{N} \sum_{q=1}^N f^*(x, x_q) \quad (2.24)$$

Враховуючи обраний вище розподіл елементів вкладу,

$$\hat{f}(x) = \frac{1}{N} \sum_{q=1}^N \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(x-x_q)^2}{2\sigma^2}} = \frac{1}{N \cdot \sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \sum_{q=1}^N e^{-\frac{(x-x_q)^2}{2\sigma^2}}, \quad (2.25)$$

де σ – стандартне відхилення елементів вкладу.

Виразимо міру близькості між оцінюваною функцією густини ймовірностей $f(x)$ та її оцінкою $\hat{f}(x)$ за допомогою наступної статистики:

$$\varphi = \int_{-\infty}^{\infty} (f(x) - \hat{f}(x))^2 dx \quad (2.26)$$

Дану міру близькості називають квадратом нев'язки [59]. Перетворимо 2.26, розкривши дужки:

$$\varphi = \int_{-\infty}^{\infty} \hat{f}^2(x) dx - 2 \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \cdot \hat{f}(x) dx + \int_{-\infty}^{\infty} f^2(x) dx \quad (2.27)$$

Перший доданок визначається тільки виглядом вихідного розподілу та не залежить від досліджуваного коефіцієнта. Відповідно, його можна виключити із розгляду, переписавши критерій:

$$\varphi^* = \int_{-\infty}^{\infty} \hat{f}^2(x) dx - 2 \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \cdot \hat{f}(x) dx \quad (2.28)$$

Розглянемо кожний із доданків, що залишилися, окремо.

$$\varphi_1 = \int_{-\infty}^{\infty} \hat{f}^2(x) dx = \int_{-\infty}^{\infty} \left[\frac{1}{N} \sum_{q=1}^N f^*(x, x_q) \right]^2 dx = \frac{1}{N^2} \int_{-\infty}^{\infty} \left[\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N f^*(x, x_i) \cdot f^*(x, x_j) \right] dx \quad (2.29)$$

Оскільки інтеграл суми дорівнює сумі інтегралів,

$$\varphi_1 = \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \int_{-\infty}^{\infty} f^*(x, x_i) \cdot f^*(x, x_j) dx \quad (2.30)$$

Елементи вкладу розподілені за нормальним законом, тому інтеграл з (2.30) запишемо наступним чином:

$$\int_{-\infty}^{\infty} f^*(x, x_i) \cdot f^*(x, x_j) dx = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-x_i)^2}{2\sigma^2}} \cdot \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-x_j)^2}{2\sigma^2}} dx, \quad (2.31)$$

де σ^2 – дисперсія вкладу;

x_i, x_j – елементи вихідної вибірки.

Розглянемо окремо підінтегральний виразу у формулі (2.31):

$$f^*(x, x_i) \cdot f^*(x, x_j) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-x_i)^2}{2\sigma^2}} \cdot \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-x_j)^2}{2\sigma^2}} = \frac{1}{\sigma^2 \cdot 2\pi} e^{-\frac{(x-x_i)^2 + (x-x_j)^2}{2\sigma^2}} \quad (2.32)$$

Показник ступеня експоненти:

$$\begin{aligned}
 (x-x_i)^2 + (x-x_j)^2 &= x^2 - 2x \cdot x_i + x_i^2 + x^2 - 2x \cdot x_j + x_j^2 = \\
 &= 2x^2 + x_i^2 + 2x_i \cdot x_j + x_j^2 - 2x_i \cdot x_j - 2x \cdot x_i - 2x \cdot x_j = \\
 &= 2x^2 + (x_i + x_j)^2 - 2x_i \cdot x_j - 2x \cdot x_i - 2x \cdot x_j = \\
 &= 2 \cdot \left[x^2 + \frac{1}{2}(x_i + x_j)^2 - x_i \cdot x_j - x + x_i - x + x_j \right] = \\
 &= 2 \cdot \left[x^2 + \frac{1}{4}(x_i + x_j)^2 + \frac{1}{4}(x_i + x_j)^2 - x(x_i + x_j) - x_i \cdot x_j \right] = \\
 &= 2 \cdot \left[\left(x - \frac{x_i + x_j}{2}\right)^2 + \frac{1}{4}(x_i + x_j)^2 - x_i \cdot x_j \right]
 \end{aligned} \tag{2.33}$$

Підставимо цей результат у (2.32) та перетворимо отриманий вираз:

$$\frac{1}{\sigma^2 \cdot 2\pi} \cdot e^{-\frac{x_i \cdot x_j}{\sigma^2}} \cdot e^{-\frac{\frac{1}{4}(x_i + x_j)^2}{\sigma^2}} \cdot e^{-\frac{(x - \frac{x_i + x_j}{2})^2}{\sigma^2}} = K' \cdot \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x - m(x_i, x_j))^2}{2\sigma^2}}, \tag{2.34}$$

$$\text{де } m(x_i, x_j) = \frac{x_i + x_j}{2}$$

$$2\sigma^2 = \sigma^2 \Rightarrow \sigma = \frac{\sigma}{\sqrt{2}}$$

Знайдемо K' :

$$\begin{aligned}
 K' &= \frac{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}}{\sigma^2 \cdot 2\pi} \cdot e^{-\frac{4x_i \cdot x_j - (x_i + x_j)^2}{(2\sigma)^2}} = \frac{\sigma}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\sqrt{2\pi}}{\sigma^2 \cdot 2\pi} \cdot e^{-\frac{4x_i \cdot x_j - x_i^2 - 2x_i x_j - x_j^2}{(2\sigma)^2}} = \\
 &= \frac{\sqrt{\pi}}{\sigma \cdot 2\pi} \cdot e^{-\frac{x_i^2 - 2x_i x_j - x_j^2}{(2\sigma)^2}} = \frac{1}{\sigma \cdot 2\sqrt{\pi}} \cdot e^{-\frac{(x_i^2 - x_j^2)^2}{2\sigma^2}}
 \end{aligned} \tag{2.35}$$

Для зручності запису перевизначимо:

$$K = \frac{1}{K'} = \sigma \cdot 2\sqrt{\pi} \cdot e^{-\frac{(x_i^2 - x_j^2)^2}{2\sigma^2}} \quad (2.36)$$

Підставимо отримані результати у формулу (2.30):

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \int_{-\infty}^{\infty} \left[\frac{1}{K} \cdot \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-m(x_i, x_j))^2}{2\sigma^2}} \right] dx = \\ &= \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \left\{ \frac{1}{K} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \left[\frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-m(x_i, x_j))^2}{2\sigma^2}} \right] dx \right\} \end{aligned} \quad (2.37)$$

Згідно властивості нормованості, інтеграл густини ймовірностей у безкінечних границях дорівнює 1, тоді з урахуванням (2.36) отримуємо:

$$\varphi_1 = \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \left[\frac{1}{\sigma \cdot 2\sqrt{\pi} \cdot e^{-\frac{(x_i^2 - x_j^2)^2}{2\sigma^2}}} \right] = \frac{1}{N^2 \cdot \sigma \cdot 2\sqrt{\pi}} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \left[e^{-\frac{(x_i^2 - x_j^2)^2}{2\sigma^2}} \right] \quad (2.38)$$

Розглянемо інтеграл у другому доданку формули (2.28):

$$\varphi_2 = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \cdot \hat{f}(x) dx \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \hat{f}(x_i) \quad (2.39)$$

З урахуванням (2.24),

$$\varphi_2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[\frac{1}{N \cdot \sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq i}}^N e^{-\frac{(x_i - x_q)^2}{2\sigma^2}} \right] = \frac{1}{N^2 \cdot \sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \sum_{i=1}^N \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq i}}^N e^{-\frac{(x_i - x_q)^2}{2\sigma^2}} \quad (2.40)$$

Умову $q \neq i$ тут необхідно прийняти для усунення зміщення аналізованої статистики [60, 61].

Запишемо вираз для квадрату нев'язки, підставивши (2.39) та (2.40) у (2.28):

$$\varphi^* = \frac{1}{N^2 \cdot \sigma \cdot 2\sqrt{\pi}} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \left[e^{-\frac{(x_i^2 - x_j^2)^2}{2\sigma}} \right] - \frac{2}{N^2 \cdot \sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \sum_{i=1}^N \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq i}}^N e^{-\frac{(x_i - x_q)^2}{2\sigma^2}} \quad (2.41)$$

Для спрощення виразу запишемо перший доданок наступним чином:

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= \frac{1}{N^2 \cdot \sigma \cdot 2\sqrt{\pi}} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \left[e^{-\frac{(x_i^2 - x_j^2)^2}{2\sigma}} \right] = \frac{1}{N^2 \cdot \sigma \cdot 2\sqrt{\pi}} \left[\sum_{i=1}^N \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N \left[e^{-\frac{(x_i^2 - x_j^2)^2}{2\sigma}} \right] + N \right], \\ \varphi_1 &= \frac{1}{N^2 \cdot \sigma \cdot 2\sqrt{\pi}} \sum_{i=1}^N \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N \left[e^{-\frac{(x_i^2 - x_j^2)^2}{2\sigma}} \right] + \frac{1}{N \cdot \sigma \cdot 2\sqrt{\pi}} \end{aligned} \quad (2.42)$$

Таке перетворення викликано тим, що при розгляді $e^{-\frac{(x_i^2 - x_j^2)^2}{2\sigma}}$ у вигляді квадратної матриці при $i = 1, 2, \dots, N, j = 1, 2, \dots, N$, головна діагональ ($i = j$) містить тільки одиниці. Підставимо (2.42) до (2.41), перевизначивши індекс у другому доданку:

$$\varphi^* = \frac{1}{N^2 \cdot \sigma \cdot 2\sqrt{\pi}} \sum_{i=1}^N \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N \left[e^{-\frac{(x_i^2 - x_j^2)^2}{2\sigma}} \right] + \frac{1}{N^2 \cdot \sigma \cdot 2\sqrt{\pi}} - \frac{\sqrt{2}}{N^2 \cdot \sigma \cdot \sqrt{\pi}} \sum_{i=1}^N \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N e^{-\frac{(x_i - x_j)^2}{2\sigma^2}} \quad (2.43)$$

або

$$\varphi^* = \frac{1}{N^2 \cdot \sigma \cdot \sqrt{\pi}} \sum_{i=1}^N \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N \left[\frac{1}{2} \cdot e^{-\frac{(x_i^2 - x_j^2)^2}{2\sigma}} - \sqrt{2} \cdot e^{-\frac{(x_i - x_j)^2}{2\sigma^2}} \right] + \frac{1}{N \cdot \sigma \cdot 2\sqrt{\pi}} \quad (2.44)$$

З цієї формули необхідно вивести критерій оптимізації коефіцієнта дисперсії. Середньоквадратичне відхилення вкладу визначається як доля від розмаху випадкової величини:

$$\sigma = k \cdot r, 0 < k < 1 \quad (2.45)$$

Розмах вважаємо відомим, оскільки при його визначенні мусимо виходити із апріорних відомостей. Запишемо φ^* як функцію від k , підставивши $\sigma = k \cdot r$ до (2.45).

$$\varphi^* = \frac{1}{N^2 k r 2 \sqrt{\pi}} \sum_{i=1}^N \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N \left[e^{-\frac{(x_i^2 - x_j^2)^2}{2k \cdot r}} \right] + \frac{1}{N k \cdot r \cdot 2 \sqrt{\pi}} - \frac{\sqrt{2}}{N^2 k r \sqrt{\pi}} \sum_{i=1}^N \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N e^{-\frac{(x_i - x_j)^2}{2k^2 \cdot r^2}} \quad (2.46)$$

Умови досягнення мінімуму функцією:

$$\begin{cases} \frac{df(x)}{dx} = 0 \\ \frac{d^2 f(x)}{dx^2} \geq 0 \end{cases} \quad (2.47)$$

Продиференціюємо (2.47) по k :

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varphi^*}{\partial k} &= \frac{a1}{k^2} \left(\sum_{i=1}^N \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N \left[e^{-\frac{(a2)^2}{k}} \cdot \left(2 \cdot \left(\frac{a2}{k} \right)^2 - 1 \right) - 2\sqrt{2} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{a3}{k} \right)^2} \cdot \left(\left(\frac{a3}{k} \right)^2 - 1 \right) \right] - N \right); \\ \frac{\partial^2 \varphi^*}{\partial k^2} &= \frac{2 \cdot a1}{k^3} \left(\sum_{i=1}^N \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N \left[e^{-\frac{(a2)^2}{k}} \cdot \left(2 \cdot \left(\frac{a2}{k} \right)^4 - 5 \left(\frac{a2}{k} \right)^2 + 1 \right) - \sqrt{2} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{a3}{k} \right)^2} \cdot \left(\left(\frac{a3}{k} \right)^4 - 5 \left(\frac{a3}{k} \right)^2 + 2 \right) \right] + N \right) \end{aligned}$$

(2.48)

де

$$a1 = \frac{1}{N^2 \cdot r \cdot 2 \sqrt{\pi}}; \quad a2 = \frac{x_i^2 - x_j^2}{2 \cdot r}; \quad a3 = \frac{x_i - x_j}{r}.$$

В результаті маємо наступний критерій досягнення мінімуму функцією $\varphi^*(k)$

:

$$\left\{ \begin{aligned} & \frac{a1}{k^2} \left(\sum_{i=1}^N \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N \left[e^{-\left(\frac{a2}{k}\right)^2} \cdot \left(2 \cdot \left(\frac{a2}{k}\right)^2 - 1 \right) - 2\sqrt{2} \cdot e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{a3}{k}\right)^2} \cdot \left(\left(\frac{a3}{k}\right)^2 - 1\right) \right] - N \right) = 0; \\ & \frac{2 \cdot a1}{k^3} \left(\sum_{i=1}^N \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N \left[e^{-\left(\frac{a2}{k}\right)^2} \left(2\left(\frac{a2}{k}\right)^4 - 5\left(\frac{a2}{k}\right)^2 + 1 \right) - \sqrt{2} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{a3}{k}\right)^2} \cdot \left(\left(\frac{a3}{k}\right)^4 - 5\left(\frac{a3}{k}\right)^2 + 2\right) \right] + N \right) \geq 0. \end{aligned} \right. \quad (2.49)$$

З урахуванням того, що $a1$ і k за визначенням позитивні, спростимо критерій:

$$\left\{ \begin{aligned} & \sum_{i=1}^N \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N \left[e^{-\left(\frac{a2}{k}\right)^2} \cdot \left(2 \cdot \left(\frac{a2}{k}\right)^2 - 1 \right) - 2\sqrt{2} \cdot e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{a3}{k}\right)^2} \cdot \left(\left(\frac{a3}{k}\right)^2 - 1\right) \right] = N, \\ & \sum_{i=1}^N \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N \left[e^{-\left(\frac{a2}{k}\right)^2} \left(2\left(\frac{a2}{k}\right)^4 - 5\left(\frac{a2}{k}\right)^2 + 1 \right) - \sqrt{2} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{a3}{k}\right)^2} \cdot \left(\left(\frac{a3}{k}\right)^4 - 5\left(\frac{a3}{k}\right)^2 + 2\right) \right] + N \geq 0 \end{aligned} \right. , \quad (2.50)$$

де

$$a1 = \frac{1}{N^2 \cdot r \cdot 2\sqrt{\pi}}; \quad a2 = \frac{x_i^2 - x_j^2}{2 \cdot r}; \quad a3 = \frac{x_i - x_j}{r}.$$

Вираз 2.50 є критерієм оптимізації параметру ширини вкладу k .

Структура моделі підтримки прийняття рішень при управлінні ПРІ виражається кортежем (2.51).

$$DSM = \langle B, I, T_F, P_A \rangle, \quad (2.51)$$

де B – множина переваг децидента;

I – множина вхідних даних;

T_F – завдання прогнозування значання цільової функції моделі;

P_A – множина прикладних програмних компонентів.

До множини переваг децидента [62] входять обмеження програми або проекту, особистий досвід та експертиза.

До множини вхідних даних належить наступне:

$$I = \{I_{obj}, I_{lim}\}, \quad (2.52)$$

де I_{obj} – тип об'єкту;

I_{lim} – множина обмежень моделі, $I_{lim} = \bar{X}$.

I_{obj} є якісною змінною, значення якої визначає склад обмежень моделі, що використовуються для прогнозування значення цільової функції. Інфраструктурні об'єкти різних типів характеризуються відмінностями у призначенні та структурному складі, що передбачає наявність унікальних параметрів для різних типів об'єктів. Таким чином, I_{obj} виступає у якості параметру, що визначає склад параметрів \bar{X} для конкретної системи.

Обмеженнями моделі є значення параметрів елементів об'єкту, що підлягає реконструкції, на основі яких відбувається прогнозування значення цільової функції. Тип об'єкту як елемент вхідних даних дозволяє здійснити перерозподіл параметрів для здійснення прогнозування в залежності від мети здійснення керівного впливу. Таким чином, при управлінні програмою з реконструкції інженерних систем, можливе прийняття рішень у рамках розробки та управління архітектурою шляхом підбору проєктів з реконструкції підсистем або окремих об'єктів підсистем з такими характеристиками, що задовольняли б загальні обмеження програми.

Модель прогнозування значень параметрів системи відображена формулою (2.53):

$$F = \{ANN, DS, VPRC, PPM\}, \quad (2.53)$$

де ANN – штучна нейронна мережа;

DS – датасет;

$VPRC$ – компоненти перерозподілу варійованих параметрів;

PPM – механізм пост-обробки.

Компоненти перерозподілу варійованих параметрів є елементами моделі, що здійснюють її адаптацію до цілей моделювання.

Метою програми з реконструкції інженерної інфраструктури є реконструкція системи в цілому, однієї або декількох підсистем. В рамках управління такими програмами існує необхідність прийняття рішень стосовно підбору проєктів з реконструкції об'єктів, які входять до складу підсистем. Такі об'єкти, знаходячись у складі однієї підсистеми, можуть мати технічні і технологічні відмінності, що вимагає індивідуального підходу до підтримки прийняття рішень з їх реконструкції. Прикладом таких об'єктів можуть бути котельні і ТЕЦ у системах тепlopостачання, конденсаційні, атомні, гідроелектростанції у системах електропостачання тощо. Отже, необхідне забезпечення можливості адаптації процесу прийняття рішень до наявності таких об'єктів у складі системи, що підлягає реконструкції в рамках програми. При впровадженні проєктів з реконструкції окремих об'єктів, поза складом програми, також існує необхідність у формуванні такого складу обмежень моделі \bar{X} , який буде відповідати обмеженням відповідного типу об'єкту.

Вищезазначені компоненти моделі здійснюють перерозподіл параметрів моделі для різних типів об'єктів підсистем. Першочерговий склад параметрів моделі представлено множиною 2.54 [21]:

$$Par_T = \{Par_G, Par_{El_1}, Par_{El_2}, \dots, Par_{El_k}\}, \quad (2.54)$$

де Par_T – повний склад параметрів моделі;

Par_G – параметри, що є спільними для об'єктів різних типів;

Par_{El} – параметри, що є унікальними для окремого типу об'єкту;

k – кількість унікальних типів об'єктів системи.

При цьому, датасет DS є набором значень параметрів Par_T для деякого числа об'єктів різних типів.

Перерозподіл відбувається на основі значення лінгвістичної змінної I_{obj} . Його сутність полягає у видаленні з датасету тих параметрів, що є унікальними для всіх типів об'єктів, окрім обраного, та не є спільними для всіх типів об'єктів. Результатом здійснення операції є датасет, що є унікальним для обраного типу об'єкту.

Механізм пост-обробки даних надає децидентові додаткові можливості для урахування взаємозв'язку елементів системи при коригуванні її параметрів шляхом надання інформації про вплив основних параметрів на цільовий показник у вигляді графіків залежностей показників [21].

Для прогнозування значення цільової функції моделлю застосовується нейронна мережа. Для виконання завдань прогнозування доцільне застосування нейронних мереж через їх гнучкість, адаптивність та точність прогнозування [63-66]. Можливе також застосування для малих виборок даних [67-69], що доцільне при застосуванні для навчання моделей даних, що стосуються об'єктів інженерної інфраструктури, через обмеження у доступі до таких даних. Окрім цього, штучні нейронні мережі дозволяють застосовувати як числові дані, так і якісні, що дозволяє підвищити точність прогнозування завдяки використанню більш широкого спектру вхідних параметрів.

Математична модель нейронної мережі описується виразом (2.55):

$$Y = m_{CO} = \sum_{i=1}^m \omega_{jk} y_i, \quad (2.55)$$

де ω_{jk} – вагові коефіцієнти виходів мережі.

$$y_i = \phi(net_i) = \phi\left(\sum_{i=1}^m \omega_{ij} X_i\right) \quad (2.56)$$

де $\phi(net_j)$ – функція активації нейронів прихованого шару.

Згідно методу найменших квадратів, помилка функціонування мережі визначається за наступним виразом:

$$\sum E_p = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m (Y_i - D_i)^2, \quad (2.57)$$

де D_i – фактичні значення вихідної функції.

Також необхідно виділити можливість масштабування модельованих систем при використанні штучних нейронних мереж. Оскільки нейронні мережі, як і інші методи машинного навчання, спираються на використання датасету для здійснення прогнозування, існує можливість внесення до нього додаткових вхідних параметрів при подальшому повторному навчанні моделі. При цьому, ці параметри можуть бути як кількісними, так і якісними. Таким чином, можливе моделювання систем більш високого рівня при застосуванні даної моделі.

Схему процесу прийняття рішень при управлінні ПРІІ у нотації Business Process Model and Notation (BPMN) наведено на рисунку 2.1.

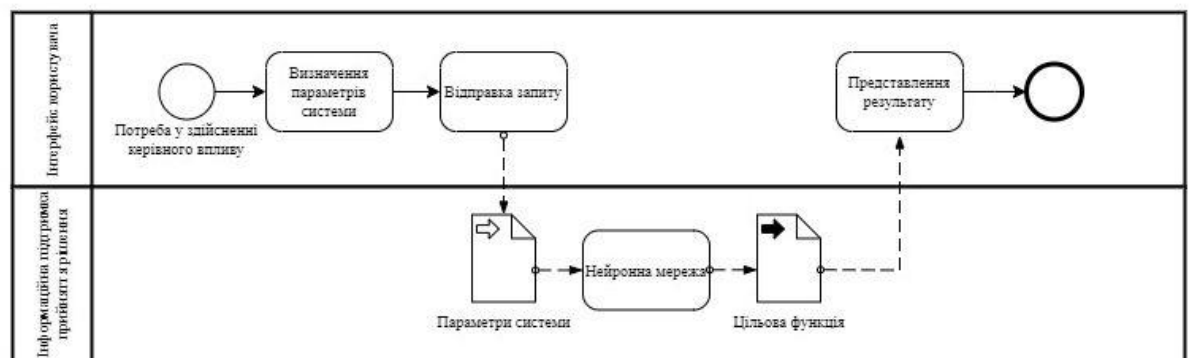


Рисунок 2.1 – Схема процесу прийняття рішень при управлінні програмами з реконструкції інженерної інфраструктури у нотації BPMN

У випадку, що розглядається у даній дисертаційній роботі, прийняття рішень полягає у виборі такого складу та конфігурації системи з-поміж наявних альтернатив, при якому буде досягатись мінімальне значення цільової функції m_{CO} , через прогнозування її значень при різних значеннях параметрів елементів системи для дотримання обмежень програми. Керівний вплив виражається у виборі

проектів до архітектури програми або розробки змісту та ієрархічної декомпозиції робіт проектів, що стосуються заміни або встановлення обладнання на об'єктах інфраструктурної системи.

Таким чином, m_{co} є функцією мінімізації:

$$m_{co} = \min(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (2.58)$$

При виникненні потреби у здійсненні керівного впливу децидент визначає параметри системи та наявні обмеження, відправляє відповідний запит до моделі. Дані запиту оброблюються нейронною мережею, відбувається прогнозування значення цільової функції, після чого отриманий результат передається до інтерфейсу користувача.

Варто відзначити, що внесення змін до архітектури програми з реконструкції інженерної інфраструктури доцільне лише при наявності зовнішніх або внутрішніх впливів, які спричиняють зміни значень параметрів елементів систем. При цьому, модель може застосовуватись також як інструмент прогнозування результатів можливих управлінських впливів та впливів середовищ як один з елементів адаптивного підходу до управління програмами.

Суттєвими відмінностями даної моделі від інших моделей, розглянутих у підрозділі 1.3 даної дисертаційної роботи та таких, що можуть використовуватись при управлінні програмами з реконструкції інженерної інфраструктури, є наступне:

- можливість для масштабування: склад параметрів у моделі може розширюватись для охоплення більшої кількості підсистем, об'єктів у складі підсистем тощо;
- наявність засобів пост-обробки: до функціоналу моделі можуть входити побудова графіків залежностей параметрів, розрахунок додаткових параметрів системи тощо;
- наявність компонентів перерозподілу варійованих параметрів: компоненти моделі надають децидентові можливість здійснювати вибір типу модельованого

об'єкту, що дозволяє адаптувати процес прийняття рішень при управлінні ПРІ до цілей таких програм [21].

Тоді множина засобів адаптивного управління програмами, наведена у (1.11) буде мати наступний вигляд:

$$AM = \{AM_{learn} \cup AM_{om} \cup AM_{for} \cup AM_{ex} \cup AM_{dg} \cup AM_{imp}\} \cup AM_{DSM}, \quad (2.59)$$

де AM_{dg} – адаптивні засоби збору даних про стан системи;

AM_{imp} – адаптивні засоби здійснення керівних впливів;

AM_{DSM} – модель підтримки прийняття управлінських рішень

Впровадження моделі підтримки прийняття управлінських рішень у процеси адаптивного управління ПРІ дозволяє підвищити ефективність загального управління програмою через взаємодію між моделлю та іншими засобами адаптивного управління. Схему цієї взаємодії наведено на рисунку 2.2.



Рисунок 2.2 – Схема взаємодії моделі підтримки прийняття управлінських рішень та інших засобів адаптивного управління програмами

Модель є одночасно засобом моделювання об'єкту управління та засобом прогнозування результатів здійснення управлінських впливів. З огляду на це, результатом використання моделі в процесах управління програмою будуть модель системи, що підлягає реконструкції в рамках реалізації ПРП, та прогнозні значення цільової функції, що використовуються для прийняття рішень при управлінні ПРП.

Для управління програмами, метою яких є здійснення впливів на складні організаційно-технічні системи, якими є інженерні інфраструктурні системи, важливою є наявність опису даних систем. Такий опис може бути представлений у наступному вигляді:

- текстовому – у формі документів, що містять текстовий опис систем та їх компонентів;
- графічному – у формі креслень, схем та 3D-моделей систем та їх компонентів.

Текстова форма здійснення опису систем передбачає використання як вербальних, так і числових компонентів. При цьому, числові компоненти стосуються вираження технічних, економічних характеристик систем, їх впливу на зовнішнє середовище тощо.

Використання моделі підтримки прийняття рішень при реалізації ПРП дозволяє здійснювати опис системи-об'єкту реконструкції у вигляді таблиць, що містять значення параметрів як системи в цілому, так і окремих її елементів, розподілених за категоріями. Наочність подання інформації децидентові забезпечує підвищення ефективності прийняття рішень при управлінні ПРП.

Прогнозування результатів управлінських впливів забезпечується використанням штучної нейронної мережі, що лежить в основі моделі. Підтримка прийняття рішень при її використанні спирається на розрахунок значень цільової функції при різних конфігураціях модельованої системи.

Відповідно, модель підтримки прийняття рішень при управлінні ПРП поєднує в собі характеристики засобу прогнозування результатів управлінських рішень та моделювання системи-об'єкту управління.

Адаптивні засоби збору даних про стан системи використовуються для формування пакету вхідних даних для подальшого проведення моделювання системи. З-поміж засобів адаптивного управління, описаних у підрозділі 1.3 даної дисертаційної роботи, необхідно виділити в цьому контексті використання даних у реальному часі. Відповідно, при використанні моделі підтримки прийняття рішень при управлінні ПРП застосування даного засобу дозволяє забезпечити актуальність інформації про стан системи для прогнозування значення цільової функції.

Зміна стану системи можлива внаслідок внутрішніх або зовнішніх впливів [70-72]. В умовах турбулентного зовнішнього середовища для складних організаційно-технічних систем використання актуальних даних про систему є важливим для формулювання та прийняття ефективних управлінських рішень. До таких даних відноситься наступне:

- поточні значення параметрів елементів системи;
- стан елементів системи;
- ймовірність виникнення несприятливих внутрішніх впливів;
- рівень стійкості системи до внутрішніх та зовнішніх впливів;
- дані стосовно ефективності функціонування системи;
- дані стосовно впливу системи на навколишнє середовище тощо.

Стан елементів системи визначає їх здатність до функціонування за належних умов експлуатації на момент впровадження програми або проєкту. На стан елементів системи можуть впливати як зовнішні фактори (руйнування внаслідок обстрілів, стихійних лих), так і внутрішні (руйнування внаслідок аварій на об'єктах системи, пошкодження обладнання внаслідок недотримання технологічних умов користування, фізичний знос обладнання тощо).

Ймовірність виникнення несприятливих внутрішніх впливів пов'язана із умовами користування об'єктами системи, дотримання необхідних технологічних умов на об'єктах, загальним станом елементів системи. При високому зносі обладнання, недотриманні технологічних режимів підвищується ймовірність виникнення аварійних ситуацій, що впливають як на стан відповідних об'єктів, так

і на стан інженерної системи в цілому, що викликане тісним взаємозв'язком елементів у системі.

Рівень стійкості системи до внутрішніх та зовнішніх впливів пов'язаний із енергетичною безпекою об'єктів системи. Він визначається наявністю на об'єктах системи відповідних засобів захисту обладнання, засобів забезпечення функціонування об'єктів при виникненні аварійних ситуацій.

Значення параметрів елементів системи визначаються комплексом техніко-технологічних параметрів обладнання, що встановлене на об'єктах системи. До даних стосовно ефективності функціонування системи можна віднести як економічні параметри (питоме споживання палива при виробництві енергії, обсяг використання енергії для власних потреб тощо), так і параметри енергоефективності (обсяги втрат енергії, параметри енергетичної ефективності обладнання тощо).

Дані стосовно впливу системи на навколишнє середовище відображають ступінь шкідливого впливу системи на наступне:

- повітря – обсяги викидів оксидів вуглецю, сірки, азоту, золи;
- воду – обсяги стічних вод, що генеруються об'єктами системи;
- ґрунт – температура на поверхні трубопроводів;
- інше – рівні вібрації, шуму, що генеруються об'єктами системи.

При використанні моделі підтримки прийняття управлінських рішень при управлінні програмами зв'язок із методами навчання здійснюється через використання інформації про здійснення керуючих впливів у процесі навчання системи управління програмою. Схему цього процесу наведено на рисунку 2.3.

Як було зазначено раніше, входами для моделі є множина вхідних даних I , виходом – значення цільової функції m_{CO} , на основі якого здійснюється формулювання та прийняття управлінського рішення. Відповідно, при застосуванні моделі при управлінні програмою входом для методів навчання, що можуть застосовуватись системою управління програмою, буде інформація про результати здійснення керуючих впливів під час управління програмою, сформульованих за допомогою моделі. Враховуючи можливість використання

моделі у різних фазах управління програмою, застосування таких методів навчання, як структуровані цикли навчання, дозволяє підвищити ефективність управління програмою за рахунок врахування наявного досвіду здійснення керівних впливів при формулюванні та прийнятті управлінських рішень.

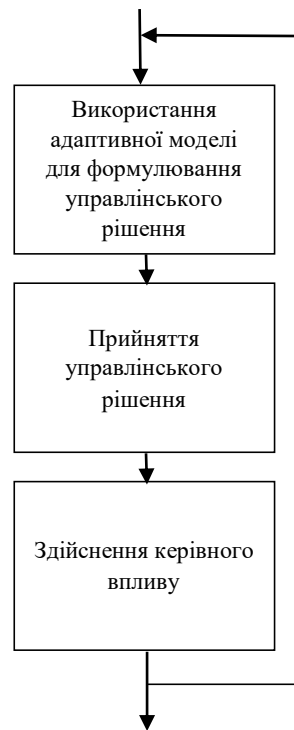


Рисунок 2.3 – Схема реалізації навчання системи управління програмою при використанні моделі підтримки прийняття управлінських рішень

Адаптивні засоби здійснення керівних впливів забезпечують гнучкість впровадження прийнятих рішень у процеси управління програмою. При управлінні ПРП з використанням моделі підтримки прийняття рішень у якості входу для них виступає відповідне управлінське рішення, прийняте за допомогою моделі.

В умовах турбулентного зовнішнього середовища для складних організаційно-технічних систем можливість адаптації до наявних зовнішніх та внутрішніх впливів важлива як при формулюванні управлінського рішення, так і при його впровадженні. Останнє забезпечується використанням таких засобів адаптивного управління, як адаптивні логіко-структурні матриці, гнучкі фінансові рамки програми тощо. Відповідно, одночасне впровадження адаптивної моделі

підтримки прийняття рішень та адаптивних засобів здійснення керівних впливів дозволяє забезпечити адаптивність процесів управління програмою від моменту формулювання управлінських рішень децидентом до їх впровадження.

Таким чином, застосування моделі підтримки прийняття рішень разом з іншими методами та засобами адаптивного управління програмами дозволяє підвищити ефективність управління ПРП завдяки забезпеченню холістичного підходу до адаптивного управління програмою.

2.2 Метод прийняття рішень при управлінні програмами з реконструкції інженерної інфраструктури з використанням моделі підтримки прийняття рішень

Застосування моделі підтримки прийняття рішень при управлінні програмами з реконструкції інженерної інфраструктури можливе у фазах планування та виконання програми. Для фази планування програми доцільне використання моделі в процесах розробки архітектури програми, для фази виконання програми – в процесі управління архітектурою.

При розробці архітектури програми модель використовується для визначення структури компонентів програми, що є однією із цілей даної групи процесів. При цьому, вимоги до програми виступають входом як для процесів розробки архітектури, так і для моделі.

Загальна структура компонентів програми визначається за наявними вимогами, що були сформовані з урахуванням потреб стейкхолдерів. Аналіз змісту компонентів, визначення їх структури та взаємозв'язків при застосуванні стандартного підходу, визначеного РМІ [73] відбувається лише за використання технічних знань розробників продукту програми. Модель підтримки прийняття рішень виступає у якості додаткового інструменту для цієї групи процесів, що дозволяє підвищити ефективність формування структури компонентів програми та врахування їх взаємозв'язків.

Застосовуючи вимоги до програми, технічні знання та додаткові дані стосовно стану системи-об'єкту реконструкції у якості входів, вона дає змогу

визначити цільові значення параметрів об'єктів системи та системи в цілому, провести порівняльний аналіз альтернатив рішень для окремих об'єктів. Відповідно, це дозволяє також визначити характеристики продуктів компонентів програми з урахуванням їх відповідності вимогам. Здійснення підтримки прийняття управлінських рішень шляхом моделювання системи та застосування методів машинного навчання для прогнозування значення цільової функції дозволяють врахувати взаємозв'язки елементів системи, що підвищує ефективність визначення взаємозв'язків компонентів архітектури.

Виникнення потреби у внесенні змін до архітектури програм з реконструкції інженерної інфраструктури може бути пов'язане з рядом факторів, серед яких – виникнення зовнішніх або внутрішніх впливів на систему, що підлягає реконструкції в рамках реалізації програми, або її елементи, впливів на систему управління програмою тощо. Для адаптації до впливів та формулювання відповідних змін у архітектурі програми доцільне використання моделі підтримки прийняття рішень.

При необхідності внесення змін до архітектури програми модель підтримки прийняття рішень використовується для повторного визначення структури компонентів архітектури з урахуванням відповідних змін. Застосування методів машинного навчання дозволяє визначити параметри системи, сформовані відповідними зовнішніми або внутрішніми впливами та розробити управлінські рішення, що дозволяють адаптувати структуру проєктів, що входять до складу програми, до таких впливів для досягнення цілей програми [22].

Застосування моделі підтримки прийняття рішень при управлінні програмами має опосередкований вплив на такі групи процесів фази планування програм, як розробка розкладу, оцінювання та бюджетування витрат. Вплив на ці групи процесів відбувається через прямий вплив на групи процесів, описані вище.

Реалізація програм з реконструкції інженерної інфраструктури пов'язана із заміною обладнання на об'єктах системи. Відповідно, від характеристик такого обладнання, його обсягів та обсягів супутніх робіт на об'єктах залежать обсяги витрат на реалізацію програми та терміни виконання робіт. Застосування моделі

для формування компонентів програми дозволяє визначити перелік обладнання, що доцільно встановлювати на об'єктах системи для досягнення цілей програми. Таким чином, це дозволяє визначити вартість такого обладнання, тривалість робіт з його встановлення, налагодження тощо та застосувати цю інформацію при розробці бюджету та розкладу програми [22].

Схему взаємодії моделі з процесами управління програмами [73] наведено на рисунку 2.4.

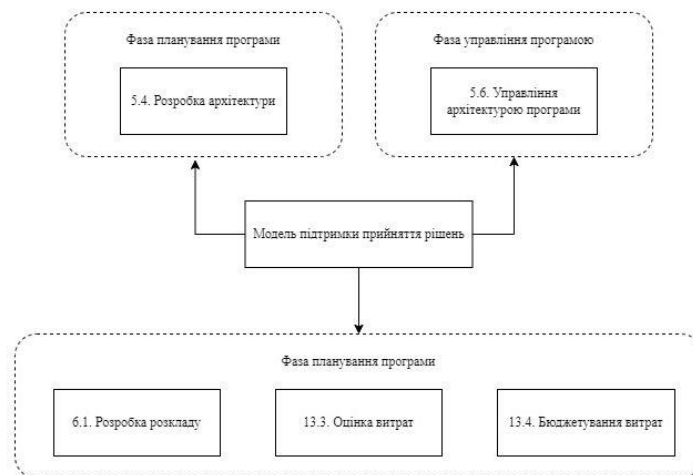


Рисунок 2.4 – Схема взаємодії моделі підтримки прийняття рішень та процесів управління програмами

Метод прийняття управлінських рішень при управлінні програмами з реконструкції інженерної інфраструктури за допомогою моделі, описаної в підрозділі 2.1 даної дисертаційної роботи для фази планування програми складається з чотирьох етапів.

На першому етапі відбувається збір даних стосовно складів об'єктів реконструкції шляхом аналізу документації – паспортів обладнання, звітної документації підприємства тощо. Дані визначаються для кожного об'єкту підсистем, що реконструюються в рамках програми. Таким чином, визначається множина обмежень моделі I для базового стану системи [22].

Визначається обмеження за фінансами для програми, що розподіляється на обмеження за фінансами для кожного проєкту (2.60) та обсяг енергопотреби Q_{end} .

$$Inv_P = \sum_{i=1}^m Inv_{P_i} \quad (2.60)$$

де Inv_{P_i} – загальний обсяг фінансування для окремого проєкту;

m – кількість проєктів у програмі.

Також визначається обмеження за значенням цільової функції $m_{CO_{max}}$. Дане обмеження являє собою максимальне значення m_{CO} для кожного об'єкту підсистеми та визначається наявними нормативними вимогами та вимогами стейкхолдерів проєкту.

До переліку об'єктів можуть входити як об'єкти в межах однієї підсистеми (генерування, розподілу або перетворення), так і в межах декількох підсистем при впровадженні програм комплексної реконструкції інженерних систем.

За допомогою моделі здійснюється прогнозування значення цільової функції, що визначена показником питомих викидів оксидів вуглецю m_{CO} , для поточного складу системи. На даному етапі для значення цільової функції може не виконуватись умова $m_{CO} > m_{CO_{max}}$, оскільки воно відповідає стану системи до впровадження робіт з реконструкції.

На другому етапі методу здійснюється підбір обладнання до встановлення на об'єктах. Визначення переліку обладнання відбувається за технічною та економічною доцільністю для окремого об'єкту, що визначається (1.1-1.2). Так, при наявності на об'єкті застарілих або пошкоджених елементів генеруючого обладнання (котлів, турбін тощо) відбувається підбір обладнання на заміну з урахуванням наявних потреб – зменшення викидів забруднюючих речовин, адаптація потужностей виробництва енергії до наявної потреби з боку споживачів, забезпечення підвищення рівня енергетичної безпеки або енергетичної ефективності тощо, зменшення споживання палива при виробництві енергії та

зниження собівартості енергії тощо. Також визначається перелік допоміжного обладнання, яке планується до встановлення на об'єкті.

Готовий перелік обладнання для програми являє собою множину альтернатив, яка відображається формулами (2.61)-(2.62) [22]:

$$Eq_p = \{Eq_{Pr_1}, Eq_{Pr_2}, \dots, Eq_{Pr_m}\}, \quad (2.61)$$

де Eq_p – множина альтернатив обладнання для програми;

Eq_{Pr} – множина альтернатив обладнання для проєкту.

$$Eq_{Pr} = \{\sum Eq_1, \sum Eq_2, \dots, \sum Eq_n\} \quad (2.62)$$

де Eq – множина альтернатив обладнання одного типу, що планується до встановлення в рамках проєкту;

n – кількість типів обладнання для проєкту.

Формування альтернативних комплектів обладнання проводиться технічними фахівцями у складі команд проєктів на основі результатів маркетингового дослідження ринку обладнання. При цьому, фахівці спираються на дані стосовно технічного стану об'єктів, цілей програми та проєктів у її складі, діючих нормативів стосовно захисту навколишнього середовища, проєктування та експлуатації об'єктів інженерної інфраструктури.

Переліки підбраного обладнання передаються децидентові для подальшого аналізу та підготовки управлінського рішення [22].

Третім етапом методу є проведення порівняльного аналізу отриманих альтернатив обладнання на основі відповідних значень цільової функції. Під час реалізації цього етапу децидент формує моделі об'єктів на основі отриманого обладнання, відбувається прогнозування значень цільової функції для кожної з моделей. Загальний склад параметрів об'єкту відображено формулою (2.63) [22]:

$$Par = \{Par_1, Par_2, \dots, Par_k\}, \quad (2.63)$$

Для вихідного стану об'єкту множина параметрів визначається формулою (2.64).

$$Par_b = \{Par_{b_1}, Par_{b_2}, \dots, Par_{b_k}, OF_b\}, \quad (2.64)$$

де Par_b – базове значення параметру;

OF_b – базове значення цільової функції

Для кожної з альтернатив стан системи буде визначатись множиною (2.65):

$$Par_a = \{Par_{a_1}, Par_{a_2}, \dots, Par_{a_k}, OF_a\} \quad (2.65)$$

де Par_{a_k} – значення параметру об'єкту при використанні альтернативи;

OF – значення цільової функції при використанні альтернативи.

Отримані значення заносяться в порівняльну таблицю, представлену на рисунку 2.5.

Параметр	Базове значення	Значення при використанні альтернативи 1	Значення при використанні альтернативи 2	...	Значення при використанні альтернативи n
Par_1	Par_{b_1}	Par_{a1_1}	Par_{a2_1}	...	Par_{an_1}
Par_2	Par_{b_2}	Par_{a1_2}	Par_{a2_2}	...	Par_{an_2}
...
Par_k	Par_{b_k}	Par_{a1_k}	Par_{a2_k}	...	Par_{an_k}
OF	OF_b	OF_{a1}	OF_{a2}	...	OF_{an}

Рисунок 2.5 – Порівняльна таблиця аналізу альтернативних комплектів обладнання для проєкту

Четвертий етап методу полягає у виборі такої альтернативи, яка відповідає мінімальному значенню цільової функції. Таким чином, при розробці архітектури програми з реконструкції інженерної інфраструктури за допомогою моделі підтримки прийняття рішень додатковим обмеженням стає обмеження за питомими викидами оксидів вуглецю m_{CO} .

Після прийняття рішення про вибір необхідного комплексу обладнання для всіх проєктів відбувається розробка та затвердження архітектури програми.

Процес реалізації методу прийняття рішень для фази планування програми зображено на рисунку 2.6.

Для фази виконання програми метод може застосовуватись при управлінні архітектурою програми для адаптації до змін, викликаних впливом зовнішнього або внутрішнього середовища на системи-об'єкти реконструкції, що прямо впливають на стан об'єктів або процеси управління програмою. Прикладами таких змін може бути наступне:

- здорожчання обладнання, що відбувається до завершення процедур закупівель обладнання;
- пошкодження обладнання, встановленого на об'єктах;
- зміна державних нормативів стосовно викидів забруднюючих речовин;
- зміна потреби споживачів у енергії тощо.

Відповідно, етапи реалізації методу для фази виконання програми схожі з такими для фази планування програми і є наступними:

1. Аналіз поточного стану системи – збір даних про параметри системи на момент виникнення змін;
2. Підбір альтернативних комплектів обладнання, що формуються з урахуванням змін;
3. Порівняльний аналіз комплектів обладнання, вибір комплексу, якому відповідає найнижче значення цільової функції;
4. Здійснення вибору комплексу обладнання із найменшим значенням цільової функції та прийняття рішення про внесення відповідних змін до архітектури програми [22].



Рисунок 2.6 – Процес реалізації методу прийняття управлінських рішень для фази планування програми

Використання даного методу є універсальним для різних типів систем, при цьому різниця буде полягати у складі окремих компонентів моделі. Таким чином, доцільно його застосування для таких інфраструктурних систем, як система тепло-, газо-, водо-, електропостачання, водовідведення тощо.

Підвищення ефективності прийняття рішень при впровадженні програм з реконструкції інженерної інфраструктури при використанні даного методу забезпечується за рахунок зниження планованих термінів впровадження програми та реалізації мети програми [1].

Відобразимо загальні плановані терміни програми у вигляді формули (2.66).

$$T_p = \sum_{i=1}^m T_{Pr_i} \quad (2.66)$$

$$T_{Pr_i} = \sum_{j=1}^k (T_{w_j} + T_{cont_j})$$

де T_{Pr_i} – час реалізації i -го проєкту;

T_{w_j} – час реалізації j -ї роботи;

T_{cont_j} – резервний час, закладений для j -ї роботи;

m – загальна кількість проєктів у програмі;

k – загальна кількість робіт у i -му проєкті.

Застосування моделі підтримки прийняття рішень дозволяє скоротити резервний час, закладений для впровадження робіт з реконструкції. Такий час визначається за допомогою методу експертних оцінок для кожного проєкту в рамках архітектури програми. Оцінювання резервного часу здійснюють фахівці-члени команд проєктів, що входять до архітектури програми.

Кількість членів експертної групи m згідно [1] визначається за співвідношенням дисперсії вибіркової середньої μ^2 та дисперсії σ^2 . Відповідно, при обсязі вибірки $n > 30$ значення m визначається за формулою (2.67) та за формулою (2.68) при $n < 30$ [1].

$$\mu = \sqrt{\frac{\sigma^2}{n}} \quad (2.67)$$

$$\mu = \sqrt{\frac{\sigma^2}{n-1}} \quad (2.68)$$

Тоді кількість членів експертної групи при $n > 30$:

$$m = \frac{\sigma^2}{\mu^2} \quad (2.69)$$

При $n < 30$:

$$m = \frac{\sigma^2}{\mu^2} + 1 \quad (2.70)$$

Рекомендовану кількість членів експертної групи за [1] наведено у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Рекомендована кількість членів експертної групи [1]

(μ^2 / σ^2)	0,05	0,06	0,07	0,075	0,08	0,09	0,10	0,15	0,20	0,25
n	21	18	16	15	14	12	11	8	6	5

Відповідно, кількість фахівців визначається за допустимою точністю здійснюваного оцінювання.

Формування узагальненої оцінки здійснюється за методом середніх арифметичних рангів [74].

Для оцінки узгодженості членів експертної групи застосовуються варіаційний розмах R (2.71), середньоквадратичне відхилення σ (2.72) та коефіцієнт варіації V (2.73) [74].

$$R = x_{\max} - x_{\min} \quad (2.71)$$

де x_{\max} – максимальна оцінка;

x_{\min} – мінімальна оцінка.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^m (x_j - \bar{x})^2}{m-1}} \quad (2.72)$$

де x_j – оцінка, надана j -м експертом;

\bar{x} - середнє арифметичне оцінок групи експертів;

m – кількість членів експертної групи.

$$V = \frac{\sigma}{\bar{x}} \cdot 100\% \quad (2.73)$$

Скорочення резерву досягається за рахунок зниження ймовірності виникнення невідповідностей між вимогами програми та значеннями параметрів системи, що досягаються при впровадженні програми.

Більш ефективна реалізація мети програми досягається за рахунок застосування моделі для підбору таких значень параметрів системи, за яких повністю дотримуються обмеження програми, виконуються всі наявні вимоги.

Також застосування методу дозволяє:

- Запобігти впливу суб'єктивних суджень фахівців при формуванні переліку обладнання до встановлення на об'єктах завдяки впровадженню вибору переліку обладнання з декількох альтернатив за найменшим відповідним значенням цільового показника;

- Врахувати екологічну компоненту у прийнятті рішення – використання питомих викидів оксидів вуглецю у якості цільового показника дозволяє прийняти таке рішення, при якому буде забезпечено найменший вплив системи на довкілля після закінчення впровадження програми.

2.3 Висновки до другого розділу

В рамках другого розділу розроблено модель підтримки прийняття управлінських рішень при управлінні програмами з реконструкції інженерної інфраструктури, де підтримка прийняття рішення відбувається на основі моделювання інженерної системи-об'єкту реконструкції шляхом відображення відповідної системи у вигляді масиву елементів із заданими параметрами. Для створення такої моделі передбачається використання методу прогнозування з дисконтуванням та штучної нейронної мережі, для підготовки вхідних даних моделі використовується метод імітаційного доповнення за параметрами вкладів. Це дозволяє прогнозувати значення цільової функції при заданих значеннях вхідних даних без проведення користувачем математичних розрахунків.

Розроблено компоненти розподілу варійованих параметрів, що дозволяють адаптувати процес прийняття рішень при реалізації програм з реконструкції інженерних інфраструктурних систем до індивідуальних умов та обмежень експлуатації через модифікацію датасету моделі для різних типів об'єктів.

Визначено взаємозв'язок моделі підтримки прийняття рішень із наявними засобами адаптивного управління програмами, що дозволяє визначити механізм взаємодії даних засобів при реалізації програм для підвищення ефективності адаптивного управління ПРІІ.

Розроблено метод прийняття рішень при управлінні програмами та проектами з реконструкції інженерної інфраструктури, що дозволяє застосовувати модель підтримки прийняття рішень у фазах планування та виконання програми та у фазі планування проекту.

Визначено прямий та опосередкований зв'язок моделі з процесами управління програмами та проектами, що створило теоретичне підґрунтя для подальшої розробки методу.

Метод прийняття рішень при управлінні ППРІ для фази планування програми складається з чотирьох етапів. Перший етап полягає у зборі даних про поточний стан системи та наявні обмеження – обмеження за фінансами, енергопотребою, питомим обсягом викидів оксидів вуглецю m_{CO} , з подальшим прогнозуванням

значення m_{CO} для базового стану системи. На другому етапі реалізується підбір обладнання до встановлення на об'єктах системи за економічною та технічною доцільністю для окремих об'єктів, з урахуванням рекомендацій технічних фахівців. Сформовані альтернативні комплекти обладнання передаються децидентові для подальшого аналізу та підготовки управлінського рішення. На третьому етапі здійснюється порівняльний аналіз наявних альтернативних комплектів обладнання для кожного об'єкту. Четвертий етап полягає у виборі альтернативного комплекту обладнання, якому відповідає найменше значення цільової функції. Після підбору комплектів для всіх об'єктів системи відбувається формування компонентів архітектури програми.

Застосування розробленого методу у фазі виконання програми має ідентичну структуру та спрямоване на реалізацію процесів управління архітектурою програми.

Застосування методу дозволяє скоротити резервний час для робіт проєктів у складі програми за рахунок зниження ймовірності виникнення невідповідностей між вимогами програми та значеннями параметрів системи, що досягаються при впровадженні програми, врахувати екологічну компоненту при прийнятті рішень, запобігти виникненню можливої корупційної складової при формуванні конфігурації реконструйованої підсистеми, підвищити ефективність прийнятих управлінських рішень за рахунок використання методів порівняльного аналізу, моделювання системи-об'єкту реконструкції, штучної нейронної мережі для прогнозування значення цільової функції.

Основні результати розділу опубліковано в роботах [13-22].

РОЗДІЛ 3. ФУНКЦІОНАЛЬНА КОМПОЗИЦІЯ МОДЕЛІ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ, ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА АПРОБАЦІЯ РОЗРОБЛЕНОГО МЕТОДУ

3.1 Функціональна композиція моделі підтримки прийняття рішень при управлінні змістом програм з реконструкції інженерної інфраструктури

Основна мета практичного застосування моделі підтримки прийняття рішень при управлінні ПРП полягає у підборі таких параметрів системи-об'єкта реконструкції, при яких буде досягатись найменше прогнозоване значення цільової функції та будуть дотримані задані обмеження. Відповідно, впровадження такого інструменту до системи управління дозволить вирішити наступні задачі управління ПРП:

- забезпечення технічної доцільності проєктів, що входять до її складу, та дотримання фінансових обмежень;
- забезпечення можливості адаптації до внутрішніх та зовнішніх впливів на параметри об'єкта реконструкції при управлінні архітектурою ПРП;
- зниження ймовірності виникнення операційних, технологічних ризиків, також ризиків витрат і графіку при впровадженні ПРП, що можуть бути викликані відсутністю механізмів адаптації в системі управління ПРП.

Реалізація забезпечення доцільності проєктів відбувається шляхом визначення параметрів системи з дотриманням наявних обмежень. Це дозволяє визначити склад архітектури програми, включивши до неї такі проєкти, які будуть найбільш актуальними для поточного стану системи. Також, при виникненні зовнішніх або внутрішніх впливів на систему, що призводять до змін її параметрів у процесі впровадження програми, існує можливість застосування описуваного інструменту для повторного підбору скоригованого переліку проєктів та внесення змін у архітектуру.

Модель підтримки прийняття рішень при управлінні програмами та проєктами з реконструкції інженерної інфраструктури розроблено за допомогою

Студії машинного навчання Microsoft Azure. Використання даного сервісу зумовлене наступними факторами:

- Простота у використанні – компоненти системи машинного навчання представлені блоками, що мають входи та виходи, відповідно вихідні дані одного блоку є вхідними для іншого; таким чином, відсутня необхідність написання коду для створення моделі;

- Широкий функціонал – Студія має велику кількість методів прогнозування та класифікації даних для навчання моделі;

- Можливість додання до моделі користувацьких скриптів – додаткові засоби обробки та аналізу даних реалізуються за допомогою скриптів на мовах програмування Python та R;

- Зручність аналізу якості навчання моделі – Студія надає можливість аналізу якості моделі за допомогою ряду метрик: середньоквадратичної похибки, відносної абсолютної похибки, коефіцієнту детермінації тощо [17].

Робоча назва моделі – «HeatOptiGuide».

Значення кінцевого споживання енергії користувачами Q_{end} пропонується використовувати як референтне значення при визначенні обмежень моделі [17]. Таким чином, приймаємо:

$$Q_{end} = kQ \quad (3.1)$$

де Q – сумарна теплова потужність джерел енергії, МВт;

k – коефіцієнт, що враховує втрати енергії при транспортуванні до кінцевих користувачів

Застосування Q_{end} у такому визначенні дозволить змоделювати таку інженерну систему, в якій генеруючі потужності будуть обрані відповідно до обсягів кінцевого споживання. Це дозволить запобігти виникненню надлишкового виробництва енергії та мінімізувати витрати енергоресурсів для подальшого функціонування системи.

Визначення обмежень моделі є функцією користувача, при цьому можливе визначення обмежень як для кількісних, так і для якісних показників. Таким чином, для наявної системи, що підлягає реконструкції в рамках реалізованої програми, наявних збурень зовнішнього середовища можлива адаптація окремих параметрів моделі [17]. Можливі обмеження для підсистем генерування об'єктів комунальної енергетики представлені формулами (3.2)-(3.5).

$$Q = 4,5 \quad (3.2)$$

$$Q_{los} \leq 0,01, \quad (3.3)$$

де Q_{los} – сумарна втрати теплової енергії в підсистемі, МВт.

$$P_{out} \geq 1,4 \quad (3.4)$$

де P_{out} – тиск теплоносія на виході з підсистеми, МПа.

$$FCon = 1 \quad (3.5)$$

де $FCon$ – наявність перетворювача частоти

Перелік обмежень, наведених вище, не є вичерпним і може доповнюватись за необхідності.

Робота моделі передбачає задання всіх значень параметрів, що виступають в якості обмежень. Це пов'язано з обмеженнями технології машинного навчання, що використовуються, та Студії машинного навчання Microsoft Azure.

Створено дві окремі моделі для кожного з типів об'єктів. Дані моделі є ідентичними за архітектурою і відрізняються вмістом двох із наявних блоків. Архітектуру моделі для котельних наведено на рисунку 3.1.

Вхідні дані для навчання моделі подаються у вигляді датасета, створеного у форматі CSV.

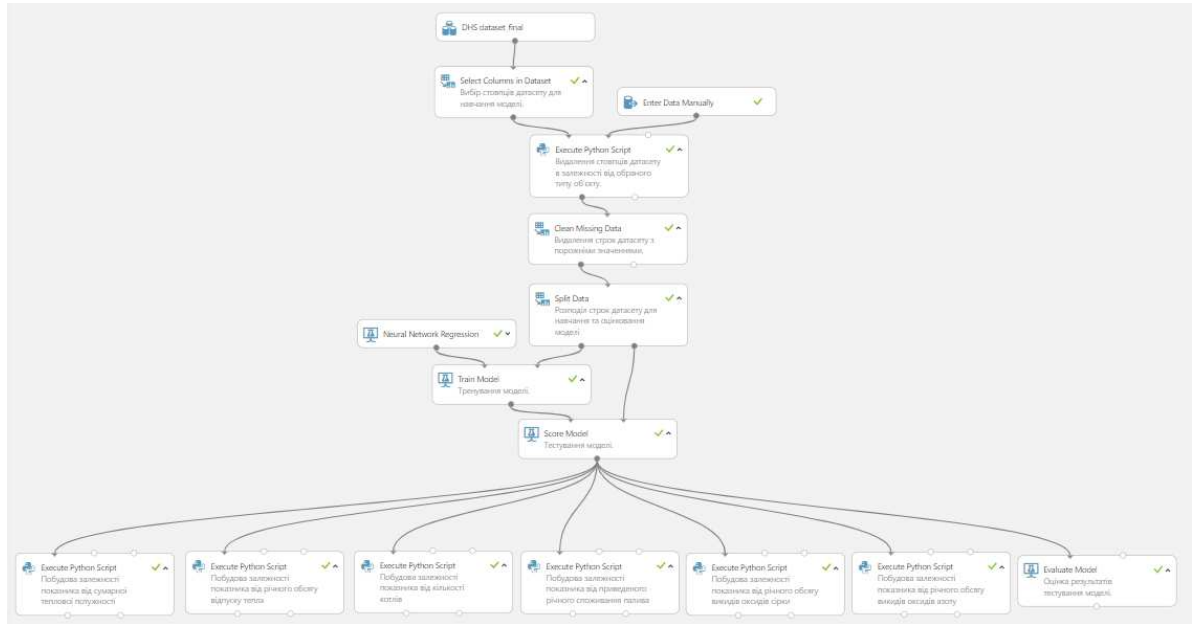


Рисунок 3.1 – Архітектура моделі

Дані датасету подаються на вхід блоку, який реалізує вибір стовпців, що використовуються для подальшого навчання. В даному випадку блок здійснює вибір всіх стовпців, окрім «Num», що містить порядкові номери об'єктів. Вибір стовпців відбувається за допомогою інструменту «Column selector», інтерфейс якого наведено на рисунку 3.2.

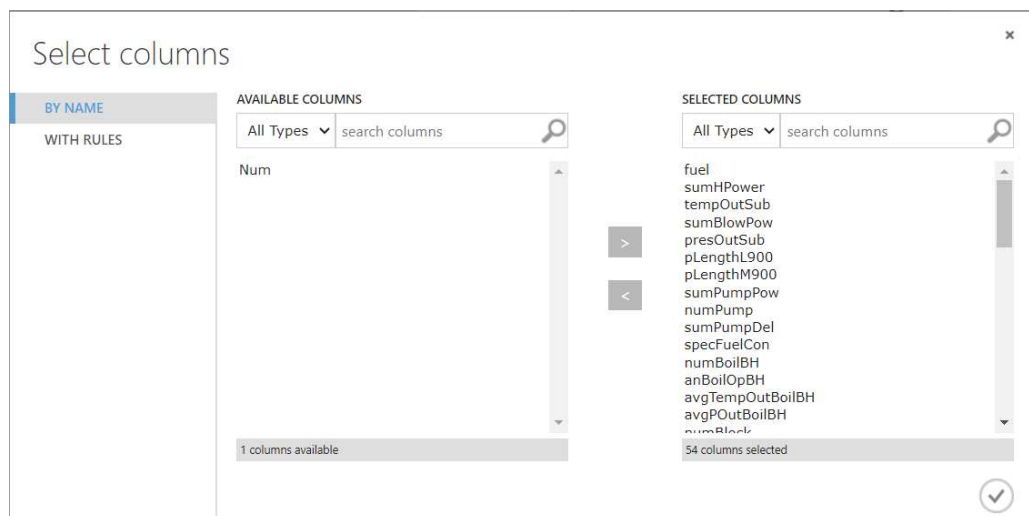


Рисунок 3.2 – Інтерфейс засобу «Column selector» Студії машинного навчання Microsoft Azure

За допомогою скрипта, написаного на мові програмування Python, відбувається видалення стовпців датасету, що містять унікальні параметри об'єктів іншого типу, на основі значення параметру *isCGP*, заданого у блоці «Enter Data Manually». Так, наприклад, при виборі типу об'єкта «Котельна» відбувається видалення стовпців датасету, що містять параметри, унікальні для ТЕЦ. Сам блок являє собою спрощену версію датасета, що містить тільки одне значення одного параметра. При цьому, вибору котельної відповідає значення $isCGP = 0$, ТЕЦ – $isCGP = 1$.

Блок «Clean Missing Data» видаляє строки датасету, в яких присутні порожні значення. Очищений датасет поступає на вхід блоку «Split Data», що розділяє строки датасету на дані для навчання моделі та дані для тестування. В даній моделі для навчання моделі виділено 75% строк.

Для прогнозування вихідних значень використовується регресія з використанням нейронної мережі. Нейронно-мережевий підхід має переваги перед традиційними методами у трьох випадках:

- Коли завдання, що розглядається, в силу конкретних особливостей не піддається адекватній формалізації, оскільки містить елементи невизначеності, що не формалізуються традиційними математичними методами;

- Коли завдання, що розглядається, формалізується, але на даний час відсутня апарат для її вирішення;

- Коли для розглянутої, добре формалізованої задачі існує відповідний математичний апарат, але реалізація обчислень з його допомогою на базі обчислювальних систем не задовольняє вимогам отримання рішень за часом, розміром, вагою, енергоспоживанням та ін. У такій ситуації доводиться або робити спрощення методів розрахунку, що знижує якість рішень або застосовувати відповідний нейронно-мережевий підхід за умови, що він забезпечить необхідну якість виконання завдання.

Через відсутність можливості чіткої комплексної формалізації інженерних систем, в тому числі, систем теплопостачання, доцільним є вибір саме регресії з використанням нейронної мережі.

Параметри нейронної мережі, що використовується в даних моделях, наведені у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Параметри нейронної мережі

Параметр	Значення
Кількість схованих шарів	60
Швидкість навчання	0,005
Кількість циклів навчання	60
Діаметр первинних вагів	0,1
Градiєнт	0

Після навчання моделі за допомогою блока «Train Model» та її тестування за допомогою блока «Score Model» відбувається її оцінка у блоці «Evaluate Model». Результати оцінювання даної моделі для котельних наведено у таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Результати оцінювання моделі для котельних

Параметр	Значення
Середня абсолютна похибка	0,086892
Середньоквадратична похибка	0,110108
Відносна абсолютна похибка	0,29382
Відносна квадратична похибка	0,07819
Коефіцієнт детермінації	0,92181

Відповідно, точність прогнозування значення цільової функції за допомогою моделі для котельних – 92,18%. Результати оцінювання моделі для ТЕЦ наведено у таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Результати оцінювання моделі для ТЕЦ

Параметр	Значення
Середня абсолютна похибка	0,187581
Середньоквадратична похибка	0,204058
Відносна абсолютна похибка	0,159744
Відносна квадратична похибка	0,015198
Коефіцієнт детермінації	0,984802

Точність прогнозування значення цільової функції для ТЕЦ – 98,38%.

Також з блоку «Score Model» дані подаються на вхід шести блоків «Execute Python Script», що відповідають за генерацію графіків залежностей значень цільової функції від значень деяких основних обмежень. Функція генерування графіків є елементом пост-обробки даних моделі та детально описана у підрозділі 3.3 даної дисертаційної роботи.

Після завершення навчання, тестування та оцінки відбувається встановлення веб-служби на основі моделі за допомогою опції «Set Up Web Service» – «Predictive Web Service». Архітектуру створеної веб-служби наведено на рисунку 3.3.

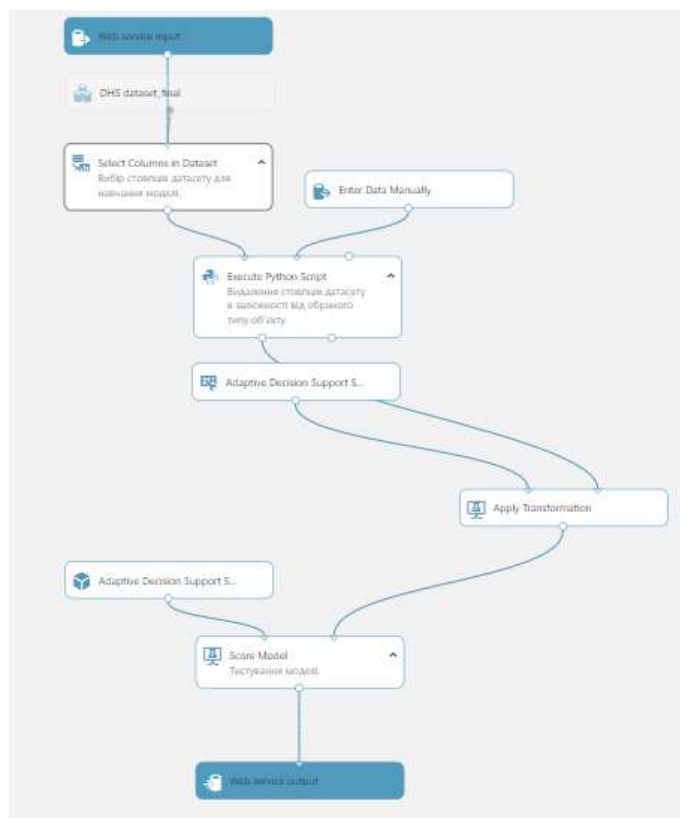


Рисунок 3.3 – Архітектура веб-служби, створеної на основі моделі

Доцільне спрощення архітектури шляхом видалення деяких блоків та додання трансформованого датасету. Спрощену архітектуру веб-служби наведено на рисунку 3.4.

До складу служби входять: навчена модель, трансформований датасет, блок тестування моделі, а також вхід та вихід веб-служби. Трансформований датасет

являє собою вхідний датасет, до якого було застосовано всі операції з обробки даних.



Рисунок 3.4 – Спрощена архітектура веб-служби

Після завершення роботи над веб-службою відбувається її розгортання. Надалі можливе її застосування як у браузері, так і за допомогою файла Microsoft Excel з надбудовою Студії машинного навчання. Під час створення та навчання моделі Студія машинного навчання створює поліном, який застосовується для подальшого прогнозування значень параметрів системи на основі вхідних даних. При введенні вхідних даних Microsoft Excel здійснює звернення до даного полінома, розгорнутого у якості веб-служби, після проведення розрахунків вихідні дані повертаються до користувача у числовому та текстовому вигляді.

Інтерфейс надбудови Студії машинного навчання представлено на рисунку 3.5.

В пункті 1 представлена інформація про структуру моделі – перелік вхідних та вихідних параметрів, також перелік глобальних параметрів. В пункті 2 визначаються дані для прогнозування: вказуються адреси комірок, в яких представлені значення вхідних параметрів, та комірок, в які буде здійснено вивід вихідних даних. Прапорець «Auto-predict» дозволяє ввімкнути функцію автоматичного прогнозування вихідних значень при введенні вхідних даних у задані комірки. Запуск процедури прогнозування в ручному режимі відбувається при натисканні кнопки «Predict». В пункті 3 відображаються повідомлення про помилки у разі, якщо такі виникають при прогнозуванні.

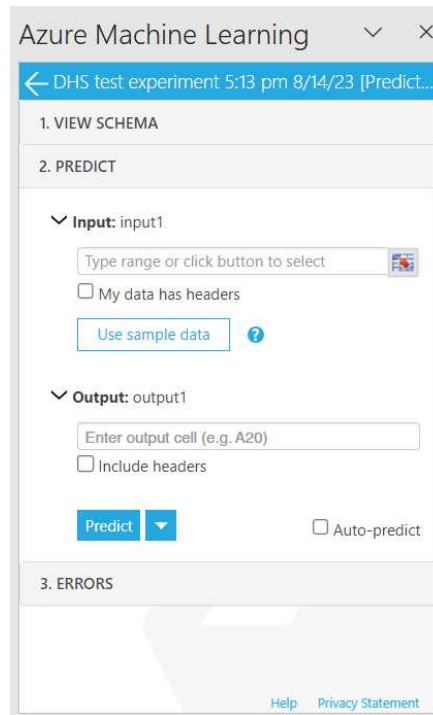


Рисунок 3.5. – Інтерфейс надбудови Azure Machine Learning для Microsoft Excel

Для «HeatOptiguide» розроблено дві моделі, що відповідають двом типам об'єктів, відповідно для прогнозування значень цільової функції створено два розрахункові файли Microsoft Excel.

Інтерфейс користувача представлений в окремому файлі Microsoft Excel. Обрання цього програмного забезпечення у якості середовища для користування моделлю підтримки прийняття рішень доцільне через простоту у використанні для кінцевого користувача-децидента. Також важливою перевагою такого підходу є відсутність необхідності створення окремого програмного продукту з графічним інтерфейсом для інтеграції до нього навченої моделі.

Функції внесення даних та управління моделлю розроблено за допомогою вбудованого засобу Visual Basic for Applications. Книга Microsoft Excel має два листи, що доступні користувачеві та використовуються для введення та виведення даних.

Інтерфейс введення даних наведено на рисунку 3.6.

HeatOptiGuide	
Техніко-технологічні параметри	
Основний вид палива	
Сумарна теплова потужність, Гкал/год.	
Температура теплоносія на виході з підсистеми, °C	
Сумарна потужність тягодвигунової машини, кВт	
Тиск теплоносія на виході з підсистеми, МПа	
Довжина трубопроводів діаметром до 900 мм, м	
Довжина трубопроводів діаметром більше 900 мм, м	
Сумарна потужність насосів, кВт	
Кількість насосів	
Сумарна подана насосів, м3/год.	
Кількість котлів (для котельної)	
Річна кількість годин роботи котлів, год. (для котельної)	
Середня температура теплоносія на виході котлів, °C (для котельної)	
Середній тиск теплоносія на виході котлів, МПа (для котельної)	
Кількість блоків (для ТЕЦ)	
Середня температура пари на виході котлів, °C (для ТЕЦ)	
Середній тиск пари на виході котлів, МПа (для ТЕЦ)	
Річна кількість годин роботи котлів, год. (для ТЕЦ)	
Число турбін (для ТЕЦ)	
Тип турбін (для ТЕЦ)	
Економічні параметри	
Собівартість теплоти, грн./кВт·год.	
Сумарні річні витрати теплової енергії на власні потреби, Гкал	
Річний відпуск теплоти споживачам, Гкал	
Питома річна споживання палива на виробництво теплової енергії, кг/Гкал	
Інвестиційна вартість об'єкту, грн.	
Параметри експлуатаційної надійності	
ККД системи золошлаковиділення	
Коефіцієнт готовності обладнання за часом	
Вид водопідготовки (фізична/хімічна)	
Коефіцієнт технічного використання за часом	
Навантаження за часом наповнення на трубопроводах	
Ймовірність безвідмовної роботи	
Навантаження за часом електронного захисту котлів	
Екологічні параметри	
Максимальний розмір частинок, що пропусковуються фільтрами, мкм	
Річні обсяги викидів оксидів вуглецю, т/рік	
Річні обсяги викидів оксидів сірки, т/рік	
Річні обсяги викидів оксидів азоту, т/рік	
Річні обсяги викидів твердих часток, т/рік	
Відсоток біомаси, що використовується, % (для котельних)	
Сумарний річний обсяг стічних вод, м3/рік (для ТЕЦ)	
Параметри енергоефективності	
Приведена теплопровідність теплоізоляції труб та запірної арматури, Вт/(м*К)	
Клас енергоефективності насосів	
Навантаження перетворювача частоти	
Навантаження приладів обліку витрати ресурсів	
Питома постійні втрати теплової енергії, Гкал	
Клас енергоефективності котлів (для котельної)	
Навантаження погодозалежного регулювання (для котельної)	
Теплопровідність теплоізоляції котлів, Вт/(м*К) (для котельної)	
Клас енергоефективності котлів (для ТЕЦ)	
Параметри енергетичної безпеки	
Сумарний обсяг банк-акумуляторів, м3	
Сумарна потужність резервних насосів, кВт	
Навантаження автоматизації регулювання	
Матеріал трубопроводів	
Навантаження резервних дизельних генераторів	
Ввести вхідні дані	
Розрахунок	

Рисунок 3.6 – Інтерфейс введення даних користувача

Інтерфейс введення даних являє собою ряд таблиць на листі Excel, що містять назви параметрів, розбиті за категоріями, та поля для введення даних. Кожна з таблиць, відтак, кожна з категорій параметрів виділені окремим кольором для зручності користування. В середині кожної з таблиць загальні параметри та параметри, унікальні для кожного з типів об'єктів генерування теплової енергії – котельної та ТЕЦ, розділені жирними рисками. У верхній частині листа зазначено назву моделі.

При запуску книги Excel відбувається виклик діалогового вікна з привітанням користувача. Вигляд діалогового вікна наведено на рисунку 3.7.

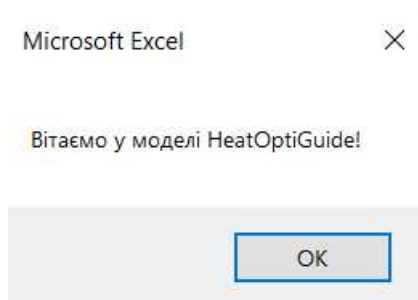


Рисунок 3.7 – Зовнішній вигляд діалогового вікна з привітанням користувача

Введення даних користувачем напряму у комірки листа не передбачене. Натомість, для цього застосовується форма, створена за допомогою вбудованого інструменту Visual Basic for Applications, що викликається натисканням на кнопку «Ввести вхідні дані».

Зовнішній вигляд форми наведено на рисунку 3.8.

Параметри кожної категорії розділені рамками з відповідними назвами. Для введення даних використовуються елементи типу TextBox для числових даних та ComboBox – для текстових. Таким чином, для якісних параметрів користувач має можливість вибору значень із попередньо заданого переліку.

Рисунок 3.8 – Зовнішній вигляд форми введення даних моделі

Приклад вибору значень якісних параметрів наведено на рисунку 3.9.

Рисунок 3.9 – Приклад реалізації елемента ComboBox

Всі поля типу ComboBox заповнюються значеннями при ініціалізації форми.

Значення параметрів, що є загальними для обох типів об'єктів, є обов'язковими до внесення, такі параметри відмічені зірочкою. Унікальні параметри котельних та ТЕЦ є необов'язковими.

Вибір типу об'єкта відбувається за допомогою елементів OptionButton, за одну сесію користування можливо вибрати тільки один тип об'єкта. Під час здійснення вибору змінній *selectedOption* присвоюється значення 0, якщо обрано тип «Котельна» та 1, якщо обрано тип «ТЕЦ».

При натисканні кнопки «Готово» відбуваються перевірки заповнення обов'язкових полів, вибору типу об'єкта, передача даних до листа Excel та закриття форми.

При наявності хоча б одного незаповненого обов'язкового поля викликається діалогове вікно з попередженням, перевірка припиняється, користувач повертається до роботи з формою. Зовнішній вигляд діалогового вікна з попередженням про необхідність заповнення всіх обов'язкових полів наведено на рисунку 3.10.

Для кожного з незаповнених обов'язкових полів відсутнє значення при перенесенні до листа Excel замінюється на 0 для елементів TextBox або залишається порожнім для елементів ComboBox.

Окреме задання умов для ComboBox 16, 17 та 18 викликано технічними обмеженнями засобу.

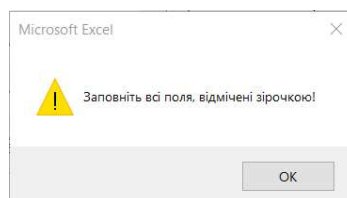


Рисунок 3.10 - Діалогове вікно з попередженням про необхідність заповнення всіх обов'язкових полів

При відсутності обраного типу об'єкта викликається діалогове вікно з попередженням, користувач повертається до роботи з формою. Зовнішній вигляд даного діалогового вікна наведено на рисунку 3.11.

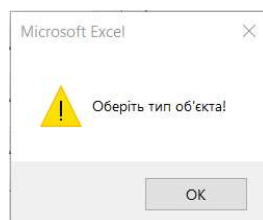


Рисунок 3.11 – Діалогове вікно з попередженням про відсутність вибору типу об'єкта

При успішній перевірці відбувається перенесення даних з полів форми до відповідних комірок листа Excel. При успішному завершенні процесу перенесення викликається діалогове вікно з повідомленням про успішне внесення даних. Зовнішній вигляд вікна наведено на рисунку 3.12.

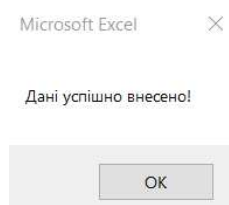


Рисунок 3.12 – Діалогове вікно з повідомленням про успішне внесення даних

Значення змінної *selectedOption*, що відповідає за вибір типу об'єкта, заноситься до комірки O90 та відповідає змінній *isCGP* датасету. Параметр є службовим, для зручності користування моделлю його значення винесено за межі користувацького інтерфейсу.

При натисканні на кнопку «Розрахунок» дані з комірок листа «Введення даних» переносяться до листа 1 відповідного розрахункового файлу.

У моделі реалізовано функцію перекладу текстових значень показників з української мови на англійську. Її впровадження викликано неможливістю використання кирилических шрифтів у датасеті.

Після перевірки значення параметру *isCGP* визначається необхідний розрахунковий файл, далі значення комірок у користувацькому інтерфейсі переносяться до відповідних комірок у ньому. При відсутності потрібного файлу у папці програми викликаються діалогові вікна із повідомленням про помилку та попередженням про необхідність відсутності кирилиці у шляху до файлів програми. Після автоматичного проведення прогнозування результат передається до комірки на листі «Вивід даних» користувацької книги, розрахунковий файл закривається без збереження змін.

Після успішної передачі спрогнозованого значення цільової функції дані, введені користувачем, передаються до листа «Вивід даних». Інтерфейс листа виводу даних наведено на рисунку 3.13.

HeatOptiGuide	
Техніко-технологічні параметри	
Основний вид палива	
Сумарна теплова потужність, Гкал/год.	
Температура теплоносія на виході з підсистеми, °C	
Сумарна потужність тягодвигунової машини, кВт	
Тиск теплоносія на виході з підсистеми, МПа	
Довжина трубопроводів діаметром до 500 мм, м	
Довжина трубопроводів діаметром більше 500 мм, м	
Сумарна потужність насосів, кВт	
Кількість насосів	
Сумарна подача насосів, м ³ /год.	
Кількість котлів (для котельні)	
Річна кількість годин роботи котлів, год. (для котельні)	
Середня температура теплоносія на виході котлів, °C (для котельні)	
Середній тиск теплоносія на виході котлів, МПа (для котельні)	
Кількість блоків (для ТЕЦ)	
Середня температура пари на виході котлів, °C (для ТЕЦ)	
Середній тиск пари на виході котлів, МПа (для ТЕЦ)	
Річна кількість годин роботи котлів, год. (для ТЕЦ)	
Число турбін (для ТЕЦ)	
Тип турбін (для ТЕЦ)	
Економічні параметри	
Собівартість теплоти, грн./кВт·год.	
Сумарні річні витрати теплової енергії на власні потреби, Гкал	
Річний відпуск теплоти споживачам, Гкал	
Питома річна споживання палива на виробництво теплової енергії, кг/Гкал	
Інвестиційна вартість об'єкту, грн.	
Параметри експлуатаційної надійності	
ККД системи золошлакочовдлення	
Коефіцієнт готовності обладнання за часом	
Вид водопідготовки (фізична/хімічна)	
Коефіцієнт технічного використання за часом	
Наявність залежного навілення на трубопроводах	
Ймовірність безвідмовної роботи	
Наявність електронного захисту котлів	
Екологічні параметри	
Максимальний розмір частинки, що пропусканься фільтрами, мм	
Річні обсяги викидів оксиду вуглецю, т/рік	
Річні обсяги викидів оксиду сірки, т/рік	
Річні обсяги викидів оксиду азоту, т/рік	
Річні обсяги викидів твердих часток, т/рік	
Відсоток біомаси, що використовується, % (для котельні)	
Сумарний річний обсяг стічних вод, м ³ /рік (для ТЕЦ)	
Параметри енергоефективності	
Приведена теплопровідність теплоізоляції труб та запірної арматури, Вт/(м ² ·К)	
Клас енергоефективності насосів	
Наявність перетворювача частоти	
Наявність приладів обліку витрати ресурсів	
Питома постійна витрата теплової енергії, Гкал	
Клас енергоефективності котлів (для котельні)	
Наявність погодозалежного регулювання (для котельні)	
Теплопровідність теплоізоляції котлів, Вт/(м ² ·К) (для котельні)	
Клас енергоефективності ПГУ (для ТЕЦ)	
Параметри енергетичної безпеки	
Сумарний обсяг банків-акумуляторів, м ³	
Сумарна потужність резервних насосів, кВт	
Наявність автоматизації регулювання	
Матеріал трубопроводів	
Наявність резервних дизельних генераторів	
Тип об'єкта	
Питома річна викиди оксиду вуглецю, т/Гкал	

Рисунок 3.13 – Інтерфейс виводу даних

Вхідні дані передаються до відповідних комірок з листа «Введення даних» без змін. Значення поля «Тип об'єкта» визначається за значенням показника *isCGP*, заповнення відбувається шляхом копіювання відповідної службової комірки на листі «Введення даних», винесеної за рамки користувацького інтерфейсу.

Спрогнозоване значення переноситься в поле «Питомі річні викиди оксидів вуглецю, т/Гкал» із розрахункового файлу.

Після отримання результатів прогнозування користувач має можливість змінювати значення показників у комірках на листі «Введення даних» та за натисканням кнопки «Розрахунок» отримувати відповідне значення цільової функції.

Відповідно, користувач може змінювати параметри модельованої системи, орієнтуючись на отримане значення.

3.2 Характеристика датасету моделі підтримки прийняття рішень

Датасет являє собою сукупність пов'язаних, окремих елементів пов'язаних даних, до яких можна отримати доступ окремо чи в поєднанні, або керувати ними як цілим об'єктом [75]. У контексті даної моделі сприймаємо його як набір значень параметрів існуючих інженерних систем, яка застосовується для тренування моделі та подальшого прогнозування значень параметрів системи-об'єкта реконструкції.

Дані датасету спираються на нормативи, наведені у ДБН В.2.5-39:2008, ДБН В.2.5-77:2014, ДБН В.2.5-22:2002, СНіП 2.04.14-88* [76-79] тощо. Таким чином, проектування параметрів системи, що здійснюється на основі історичних даних вже функціонуючих систем теплопостачання міст, дозволяє отримати результат, що відповідає існуючій в Україні нормативній базі, без проведення відповідного комплексу розрахунків.

Існуючі математичні моделі, приклад яких наведено у розділі 1 цієї дисертаційної роботи, враховують переважно техніко-технологічні параметри систем, обмежено – економічні та екологічні. При цьому, відсутній комплексний підхід до моделювання систем, що викликане обмеженнями, накладеними методологією моделювання. Застосування машинного навчання дозволяє розширити набір параметрів для більш комплексного відображення структури систем та врахування більшої кількості аспектів їх функціонування.

Відповідно, доцільно розділити параметри на такі категорії:

- Техніко-технологічні параметри – включають в себе характеристики устаткування та комунікацій;
- Екологічні параметри – пов’язані з впливом системи на навколишнє середовище (викиди парникових газів, аерозольних частинок, вплив на ґрунт тощо);
- Параметри енергетичної ефективності – пов’язані з втратами енергії в системі, загальною ефективністю генерації, розподілення та перетворення енергії;
- Економічні параметри – пов’язані з економічною ефективністю роботи системи, окупністю витрат на її реконструкцію, собівартістю виробленої енергії;
- Параметри енергетичної безпеки – пов’язані з впливами зовнішнього середовища на систему, ефективністю її реагування на подібні впливи;
- Параметри експлуатаційної надійності – пов’язані з впливом внутрішніх факторів на функціонування системи та ефективністю її реагування на подібні впливи [17].

Для підсистем генерування енергії об’єктів комунальної енергетики техніко-технологічні параметри включають в себе наступне:

1. Основний вид палива FT – якісний показник, що визначає основний вид енергоресурсу, що використовується підсистемою генерування для виробництва енергії: кам’яне вугілля, природний газ, торф, тверда біомаса тощо.

2. Сумарна теплова потужність Q , Гкал/год.:

$$Q = \sum_{i=1}^n Q_i, \quad (3.6)$$

де Q_i – теплова потужність i -го джерела енергії (парогазової установки, котла), Гкал/год.;

n – загальна кількість джерел енергії

3. Температура теплоносія на виході з підсистеми t_{out} , °С.

4. Сумарна потужність тягодуттєвих машин $P_{ДВМ}$, кВт:

$$P_{DBM} = \sum_{i=1}^n P_{DBM_i}, \quad (3.7)$$

де P_{DBM_i} – потужність i -ї тягодуттвової машини, кВт;

n – загальна кількість тягодуттвових машин

5. Тиск теплоносія на виході з підсистеми P_{out} , МПа;
6. Довжина трубопроводів діаметром менше 900 мм d_s , м.
7. Довжина трубопроводів діаметром більше 900 мм d_l , м.
8. Сумарна потужність насосів P_P , кВт:

$$P_P = \sum_{i=1}^n P_{P_i}, \quad (3.8)$$

де P_{P_i} – потужність i -го насоса, кВт;

n – загальна кількість насосів.

9. Кількість насосів n_P .
10. Сумарна подача насосів $Q_{сум.нас.}$, м³/год.:

$$Q_{сум.нас.} = \sum_{i=1}^n Q_{нас_i}, \quad (3.9)$$

де $Q_{нас_i}$ – подача i -го насоса, м³/год.;

n – загальна кількість насосів

Екологічні параметри:

1. Максимальний розмір часток, що пропускаються фільтрами $DPart_{max}$, мкм – визначається за найменшим значенням показника для фільтрів твердих часток, що встановлені на об'єкті;
2. Річні обсяги викидів оксидів вуглецю M_{CO} , т/рік; наприклад, для котельних [80]:

$$M_{CO} = 0.001C_{CO}B(1 - \frac{q_4}{100})K_p, \quad (3.10)$$

де C_{CO} – вихід оксиду вуглецю при спалюванні твердого і рідкого або газоподібного палива, кг/т;

B – витрата натурального палива за рік, т/рік;

q_4 – втрати теплоти від механічної неповноти згорання палива з відхідними газами, %;

K_p – режимний коефіцієнт

3. Річні обсяги викидів оксидів сірки M_{SO} , т/рік; наприклад, для котельних [80]:

$$M_{SO} = 0.02B \cdot S_p (1 - \eta_{SO_2}^I)(1 - \eta_{SO_2}^{II})((1 - \eta_{SO_2}^C \frac{n_{OЧ}}{n_K})), \quad (3.11)$$

де S_p – вміст сірки в паливі на робочу масу, %;

$\eta_{SO_2}^I$ – частка оксидів сірки, що зв'язуються легкою золою в котлі;

$\eta_{SO_2}^{II}$ – частка оксидів сірки, що уловлюються в мокрому золоуловлювачі попутно з твердими частками;

$\eta_{SO_2}^C$ – частка оксидів сірки, що уловлюються в установці для сіркоочищення;

$n_{OЧ}$ – тривалість роботи сіркоочисної установки, год/рік;

n_K – тривалість роботи котла, год/рік

4. Річні обсяги викидів оксидів азоту M_{NO} , т/рік; наприклад, для котельних [80]:

$$M_{NO_x} = 10^{-6} k_{NO_x} Q_H^P \cdot B \cdot \beta (1 - \eta_1)(1 - \eta_{A3} \frac{n_{A3}}{n_K}), \quad (3.12)$$

де k_{NO_x} – коефіцієнт, що характеризує вихід оксидів азоту без урахування заходів по скороченню викидів;

Q_H^p – нижча теплота згорання палива;

β_1 – коефіцієнт, що враховує вид шлаковидалення;

η_1 – ефективність первинних (режимно-технологічних) заходів по скороченню викидів;

η_{AZ} – частка оксидів азоту, що уловлюються в азотоочисній установці;

n_{AZ} – тривалість роботи азотоочисної установки

5. Річні обсяги викидів твердих часток M_{TB} , т/рік; наприклад, для котельних [80]:

$$M_{TB} = B \frac{A^p}{100 - \Gamma_{вин}} a_{вин} (1 - \eta_3), \quad (3.13)$$

де A^p – зольність палива на робочу масу, %;

$\Gamma_{вин}$ – вміст горючих речовин у відхідних газах, %;

$a_{вин}$ – частка золи палива, що виноситься з топки відхідними газами;

η_3 – частка твердих часток, що уловлюються в золоуловлювачах

6. Основний вид палива FT – якісний показник, що визначає основний вид енергоресурсу, що використовується підсистемою генерування для виробництва енергії. Показник відноситься як до техніко-технологічних, так і до екологічних параметрів моделі;

7. Питомі річні викиди оксидів вуглецю m_{CO} , т/Гкал:

$$m_{CO} = \frac{M_{CO}}{Q_{вир.}} \quad (3.14)$$

Параметри енергоефективності:

1. Приведена теплопровідність теплоізоляції труб та запірної арматури R_p , Вт/(м*К):

$$R_p = \frac{F_{sum}}{\sum_{i=1}^n \frac{F_i^p}{R_i^p}}, \quad (3.15)$$

де F_{sum} – сумарна площа утеплення, м²;

F_i^p – площа утеплення окремого елемента трубопроводу, м²;

R_i^p – теплопровідність утеплення для окремого елемента трубопроводу, Вт/(м*К);

n – загальна кількість елементів трубопроводу з утепленням з різною теплопровідністю.

2. Клас енергоефективності насосів EEC_p – якісний показник, який визначається найменшим існуючим значенням для конкретної системи;

3. Наявність перетворювача частоти $FCon$ – якісний параметр, логічна змінна;

4. Наявність приладів обліку ресурсів RCM – якісний параметр, логічна змінна;

5. Питомі постійні втрати теплової енергії q_h , Гкал:

$$q_h = \frac{Q_{m.m.}}{Q_{вир.}}, \quad (3.16)$$

де $Q_{m.m.}$ – обсяг втрат теплової енергії в теплових мережах за рік, Гкал;

$Q_{вир.}$ – обсяг виробництва теплової енергії сумарно за рік, Гкал.

$$Q_{m.m.} = Q_{вир.} + Q_{o.m.}, \quad (3.17)$$

де $Q_{вт.}$ – обсягу втрат теплової енергії з витоком теплоносія з трубопроводів за рік, Гкал;

$Q_{о.т.}$ – обсягу втрат теплової енергії за рахунок охолодження теплоносія в трубопроводах за рік, Гкал.

Параметри енергетичної безпеки:

1. Сумарний обсяг баків-акумуляторів V_{AT} , л:

$$V_{AT} = \sum_{i=1}^n V_{AT_i}, \quad (3.18)$$

де V_{AT_i} – обсяг і-го бака-акумулятора, л;

n – загальна кількість баків-акумуляторів на об'єкті комунальної енергетики.

2. Сумарна потужність резервних насосів :

$$P_{RP} = \sum_{i=1}^n P_{RP_i}, \quad (3.19)$$

де P_{RP_i} – потужність і-го резервного насоса, кВт;

n – загальна кількість резервних насосів на об'єкті комунальної енергетики.

3. Наявність автоматизації регулювання RA – якісний параметр, логічна змінна, яка відображає наявність на об'єкті комунальної енергетики пристроїв автоматичного регулювання процесів.

4. Матеріал трубопроводів PM – якісний показник.

5. Наявність резервних дизельних генераторів $RDies$ – якісний показник, логічна змінна.

Економічні параметри:

1. Собівартість теплової енергії C_e , грн./кВт-год [81]:

$$C_e = \frac{C_F + C_{EE} + C_W + C_A + C_M}{Q_{\text{вир.}}}, \quad (3.20)$$

де C_F – витрати на паливо, грн./рік;

C_{EE} – витрати на електричну енергію, грн./рік;

C_W – витрати на заробітну платню з нарахуваннями, грн./рік;

C_A – витрати на амортизацію, грн./рік;

C_M – витрати на ремонт і поліпшення основних засобів, грн./рік

2. Питоме річне споживання палива на виробництво теплової енергії $b_{\text{кот.}}^{\text{вир.}}$, кг/Гкал. Визначається на основі розрахунку витрат палива для технологічних потреб виробництва теплової енергії, наприклад, для котельних [82]:

$$b_{\text{кот.}}^{\text{вир.}} = \frac{B_{\text{кот.}}^{\text{ум.}}}{Q_{\text{кот.}}^{\text{вир.}}}, \quad (3.21)$$

де $B_{\text{кот.}}^{\text{ум.}}$ – плановані витрати умовного палива котельнею, кг;

$Q_{\text{кот.}}^{\text{вир.}}$ – обсяг виробництва теплової енергії сумарно котельнями за рік, Гкал.

3. Сумарні річні витрати теплової енергії на власні потреби $Q^{\text{в.л.п.}}$, Гкал; наприклад, для котельних на газоподібному паливі [82]:

$$Q^{\text{в.л.п.}} = Q_{\text{вир.}} (\eta_{\text{П}} + \eta_{\text{ТП}}), \quad (3.22)$$

де $\eta_{\text{П}}$ – частка витрат виробленої теплової енергії на продувку парових котлів, %;

$\eta_{\text{ТП}}$ – частка витрат виробленої теплової енергії на технологічні потреби хімоводоочистки, деаерації, опалення і господарські потреби котельні, витрати з опромінюванням теплоти паропроводами, насосами, баками тощо, витік,

випарення при опробуванні і виявленні пошкоджень в устаткуванні і невраховані витрати, %.

4. Річний обсяг відпуску теплової енергії споживачам $Q_{від.}$, Гкал; наприклад, для котельних [82]:

$$Q_{від.} = Q_p + Q_{т.м.}, \quad (3.23)$$

де Q_p – річний обсяг реалізації теплової енергії власним споживачам ліцензіата і на господарські потреби для провадження ліцензованої діяльності у сфері тепlopостачання, Гкал.

5. Поточна інвестиційна вартість системи Inv , тис. грн. – значення показника визначається за фактичними даними для об'єкта на момент проведення моделювання.

Параметри експлуатаційної надійності:

1. ККД системи золошлаковидалення η_{ARS} , наприклад, для гідравлічних систем[83]:

$$\eta_{ARS} = \varphi^2 \eta_d \frac{Q_e}{Q_e + 2(Q_{Ш.П.кан.} + Q_{З.П.кан.})}, \quad (3.24)$$

де φ – коефіцієнт витрати сопла гідроапарату;

η_d – ККД дифузору гідроапарату;

Q_e – кількість ежекторної води, що подається ежекторним насосом до апарату, м³;

$Q_{Ш.П.кан.}$ – сумарний обсяг шлакової пульпи в каналі гідроапарату, м³;

$Q_{З.П.кан.}$ – сумарний обсяг золової пульпи в каналі гідроапарату, м³.

2. Коефіцієнт готовності обладнання за часом K_T [84]:

$$K_{\Gamma} = \frac{T_B}{T_B + T_{\text{від}}}, \quad (3.25)$$

де T_B – напрацювання на відмову;

$T_{\text{від}}$ – середній період відновлення

3. Вид водопідготовки WP – якісний параметр, що визначає вид водопідготовки на об'єкті комунальної енергетики: фізичну або хімічну;

4. Коефіцієнт технічного використання за часом K_{TB} [84]:

$$K_{TB} = \frac{T_O}{T_O + T_{\text{від}} + T_{TO}}, \quad (3.26)$$

де T_O – період працездатного стану;

T_{TO} – період технічного обслуговування.

5. Наявність захисного наплення на трубопроводах PPC – якісний параметр, логічна змінна;

6. Ймовірність безвідмовної роботи $P(t)$ [84]:

$$P(t) = 1 - F_0\left(\frac{\bar{T} - t_0}{\sigma}\right), \quad (3.27)$$

де $F_0\left(\frac{\bar{T} - t_0}{\sigma}\right)$ – функція розподілу напрацювання до відмови;

\bar{T} – середнє арифметичне значення напрацювання;

t_0 – задане значення напрацювання;

σ – середнє квадратичне відхилення напрацювання до відмови

7. Наявність електронного захисту котлів EPB – якісний параметр, логічна змінна.

Відповідно, зведений перелік параметрів, що пропонуються для моделювання підсистем генерування систем тепlopостачання, наведений у таблиці 3.3.

Таблиця 3.4 – Зведений перелік параметрів моделі підсистеми генерування системи тепlopостачання міста

Категорія параметрів	Параметр
1	2
Техніко-технологічні параметри	Основний вид палива
	Сумарна теплова потужність, Гкал/год.
	Температура теплоносія на виході з підсистеми, °С
	Сумарна потужність тягодуттьових машин, кВт
	Тиск теплоносія на виході з підсистеми, МПа
	Довжина трубопроводів діаметром до 900 мм, м
	Довжина трубопроводів діаметром більше 900 мм, м
	Сумарна потужність насосів, кВт
	Кількість насосів
	Сумарна подача насосів, м ³ /год.
	Питоме річне споживання палива на виробництво теплової енергії, кг/Гкал
Екологічні параметри	Максимальний розмір частинок, що пропускаються фільтрами, мкм
	Обсяги викидів оксидів вуглецю, т/рік
Екологічні параметри	Обсяги викидів оксидів сірки, т/рік
	Обсяги викидів оксидів азоту, т/рік
	Обсяги викидів твердих часток, т/рік
	Питомі річні викиди оксидів вуглецю, т/Гкал
	Приведена теплопровідність теплоізоляції трубопроводів та запірної арматури, Вт/(м*к)
Параметри енергоефективності	Клас енергоефективності насосів
	Наявність перетворювача частоти
	Наявність приладів обліку витрати енергоресурсів
	Питомі постійні втрати теплової енергії, Гкал
	Сумарний обсяг баків-акумуляторів, м ³
Параметри енергетичної безпеки	Сумарна потужність резервних насосів, кВт
	Наявність автоматизації регулювання
	Матеріал трубопроводів
	Наявність резервних дизельних генераторів
	Собівартість теплоти, грн./кВт-год.
Економічні параметри	Питоме річне споживання палива на виробництво теплової енергії, кг/Гкал
	Сумарні річні витрати теплової енергії на власні потреби, Гкал
	Річний відпуск теплоти споживачам, Гкал
	Поточна інвестиційна вартість об'єкта, грн.

Завершення таблиці 3.4

1	2
Параметри експлуатаційної надійності	ККД системи золошлаковидалення
	Коефіцієнт готовності обладнання за часом
	Наявність перетворювача частоти
	Вид водопідготовки
	Коефіцієнт технічного використання за часом
	Наявність захисного наплення на трубопроводах
	Ймовірність безвідмовної роботи

Джерелом генерування теплової енергії в системах централізованого теплопостачання можуть бути теплоелектроцентралі та котельні. Відповідно, модель повинна враховувати можливість її застосування при реалізації програм з реконструкції систем джерелом будь-якого виду. Для забезпечення такої можливості передбачається використання двох підготованих моделей машинного навчання: для ТЕЦ та котельних. Відповідно, кожна з моделей міститиме як параметри, наведені у таблиці 3.3, так і ряд параметрів, властивих обраному джерелу генерування.

Для ТЕЦ група техніко-технологічних параметрів також включатиме наступне:

1. Кількість блоків n_B – визначається за фактичними даними;
 2. Температура пари на виході парогенераторної установки $t_{boilCGP,out}$, °C – визначається за фактичними даними;
 3. Тиск пари на виході парогенераторної установки $P_{boilCGP,out}$, МПа – визначається за фактичними даними;
 4. Річна кількість годин роботи котлів $T_{boilCGP}$, год. – визначається за фактичними даними;
 5. Кількість турбін n_{turb} – визначається за фактичними даними;
 6. Тип турбін $type_{turb}$ – якісний показник;
- Екологічні параметри:
1. Сумарний річний обсяг стічних вод Q_{sew} , м³; для ТЕС[85]:

$$Q_{sew} = Q_{cool} + Q_{CWP} + Q_{ARS} + Q_{chem} + Q_{fuel} + Q_{surf}, \quad (3.28)$$

де Q_{cool} – сумарний річний обсяг продувочних вод систем оборотного водопостачання і стічних вод від охолодження конденсаторів парових турбін, м³;

Q_{CWP} – сумарний річний обсяг стічних вод від установок хімічної підготовки води, м³;

Q_{ARS} – сумарний річний обсяг вод систем гідрозоловидалення, м³;

Q_{chem} – сумарний річний обсяг відпрацьованих розчинів після хімічної очистки теплосилового обладнання та його консервації;

Q_{fuel} – сумарний річний обсяг стічних вод від сховищ мазуту, м³;

Q_{surf} – сумарний річний обсяг поверхнево-зливових стічних вод з території підприємств.

Параметри енергоефективності:

1. Клас енергоефективності парогенераторної установки EEC_{SGP} – якісний показник.

Параметри енергетичної безпеки:

1. Наявність резервних дизельних генераторів RDG – якісний показник, логічна змінна.

Зведений перелік унікальних параметрів для ТЕЦ за групами наведено у таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 – Зведений перелік унікальних параметрів для ТЕЦ

Категорія параметрів	Параметр
1	2
Техніко-технологічні параметри	Кількість блоків
	Середня температура теплоносія на виході котлів, °С
	Середній тиск теплоносія на виході котлів, МПа
	Річна кількість годин роботи котлів, год.
	Кількість турбін
	Тип турбін
Екологічні параметри	Сумарний річний обсяг стічних вод, л
Параметри енергоефективності	Клас енергоефективності котлів
Параметри енергетичної безпеки	Наявність резервних дизельних генераторів

Для котельних перелік унікальних техніко-технологічних параметрів наведено нижче:

1. Річна кількість годин роботи котлів T_b , год.:

$$T_b = \sum_{i=1}^n T_{b_i}, \quad (3.29)$$

де T_{b_i} – сумарна річна тривалість роботи і-го котла, год.;

n – загальна кількість котлів в котельній.

2. Середня температура теплоносія на виході котлів $\bar{t}_{b,out}$, °С:

$$\bar{t}_{b,out} = \frac{\sum_{i=1}^n t_{b,out_i}}{n}, \quad (3.30)$$

де t_{b,out_i} – температура теплоносія на виході і-го котла, °С.

3. Середній тиск теплоносія на виході котлів $\bar{P}_{b,out}$, МПа:

$$\bar{P}_{b,out} = \frac{\sum_{i=1}^n P_{b,out_i}}{n} \quad (3.31)$$

де P_{b,out_i} – тиск теплоносія на виході і-го котла, °С.

Екологічні параметри:

1. Відсоток використовуваної біомаси BP – показник, що визначає відсоток біомаси в паливі, що використовується в котельній, визначається за фактичними даними.

Параметри енергоефективності:

1. Клас енергоефективності котлів EES_b – якісний показник, визначається за найменшим значенням для конкретного об'єкта;

2. Наявність погодозалежного регулювання WDR_b – якісний показник, логічна змінна;

3. Приведена теплопровідність теплоізоляції котлів :

$$R_b = \frac{F_{sum,b}}{\sum_{i=1}^n \frac{F_i^b}{R_i^b}} \quad (3.32)$$

де $F_{sum,b}$ – сумарна площа утеплення котлів, м²;

F_i^b – площа утеплення окремого котла, м²;

R_i^b – теплопровідність утеплення для окремого котла, Вт/(м*К);

n – загальна кількість котлів з утепленням з різною теплопровідністю.

Параметри експлуатаційної надійності:

1. Наявність електронного захисту котлів EBP – якісний параметр, логічна змінна.

Зведений перелік унікальних параметрів для котельних наведено у таблиці 3.6.

Таблиця 3.6 – Зведений перелік унікальних параметрів для котельної

Категорія параметрів	Параметр
Техніко-технологічні параметри	Річна кількість годин роботи котлів, год.
	Середня температура теплоносія на виході котлів, °С
	Середній тиск теплоносія на виході котлів, МПа
Екологічні параметри	Відсоток використання біомаси, %
Параметри енергоефективності	Клас енергоефективності котлів
	Наявність погодозалежного регулювання
	Теплопровідність теплоізоляції котлів, Вт/(м*К)
Параметри експлуатаційної надійності	Наявність електронного захисту котлів

Параметри, зазначені в таблицях 3.3-3.5 стосуються об'єктів комунальної енергетики, проте використання подібного підходу можливе для моделювання будь-яких інженерних систем, при незмінній структурі параметрів за категоріями. Таким чином, для систем електропостачання міст датасети будуть також відрізнятися за видом електростанції, техніко-технологічні параметри будуть

включати в себе тип енергетичних агрегатів, сумарну робочу потужність, сумарну наявну потужність, сумарну встановлену потужність тощо.

Необхідність застосування двох окремих датасетів для двох конфігурацій підсистем генерування теплової енергії відсутня. Механізм видалення стовпців датасету, що містять унікальні параметри об'єкта, не обраного користувачем, наведено у підрозділі 3.1.

Модель, розроблена в рамках даної дисертаційної роботи враховує виключно підсистеми генерування теплової енергії, при цьому не враховуються підсистеми розподілу та перетворення енергії, які представлені тепловими мережами та тепловими пунктами відповідно. Однак, за рахунок використання методів машинного навчання, модель може бути масштабована як в межах однієї підсистеми за рахунок врахування більшої кількості параметрів однієї підсистеми, так і в межах системи в цілому за рахунок додання до моделі параметрів інших підсистем. Це можливо при повторному навчанні моделі з використанням оновленого датасету, при цьому загальна архітектура моделі не змінюється.

Використання у дисертаційній роботі однієї підсистеми викликано неможливістю повного відображення міської системи тепlopостачання в рамках прототипу програми через обмежений доступ до вихідних даних. При цьому, визначено перелік параметрів для підсистем розподілу та перетворення теплової енергії. Параметри систем розподілу енергії наведено у таблиці 3.7.

Таблиця 3.7 – Параметри підсистеми розподілу теплової енергії

Категорія параметрів	Параметр
1	2
Техніко-технологічні параметри	Кількість насосів
	Сумарна подача насосів
	Сумарна потужність насосів
	Тиск теплоносія на вході до підсистеми
	Середньозважений напір
	Середньозважена температура теплоносія
	Приведені постійні втрати теплової енергії
	Середньозважена витрата теплоносія
	Середньозважений тиск на ділянці
	Сумарна довжина трубопроводів діаметром більше 700 мм

Завершення таблиці 3.7

1	2
Техніко-технологічні параметри	Сумарна довжина трубопроводів діаметром менше 700 мм
	Середня швидкість теплоносія
	Кількість насосних станцій
	Тиск теплоносія на виході з підсистеми
Екологічні параметри	Приведена теплопровідність теплоізоляції трубопроводів
Параметри енергоефективності	Приведена теплопровідність теплоізоляції трубопроводів та арматури
	Наявність приладів обліку витрати енергоресурсів
	Наявність перетворювача частоти
	Клас енергоефективності насосів
Параметри енергетичної безпеки	Розміщення труб (надземне/підземне)
	Кількість джерел тепла для однієї мережі
	Протяжність резервних ділянок трубопроводу
	Наявність взаємного резервування суміжних теплових районів
	Наявність перетворювача частоти
	Розміщення насосних станцій відносно нульової відмітки
	Наявність автономного джерела живлення електрообладнання
Економічні параметри	Поточна інвестиційна вартість об'єкта
Параметри експлуатаційної надійності	Матеріал трубопроводів
	Наявність захисного напилення на трубопроводах
	Наявність анодного захисту
	Наявність катодного захисту
	Водонепроникність теплоізоляції трубопроводів
	Наявність індикаторів корозії
	Середня температура води за ділянкою
	Ймовірність безвідмовної роботи
	Наявність автоматизації регулювання

Підсистеми перетворення теплової енергії розподіляються на два види: підсистеми з центральним тепловим пунктом (ЦТП) та індивідуальним тепловим пунктом (ІТП). Загальні параметри підсистем перетворення теплової енергії наведено у таблиці 3.8.

Таблиця 3.8 – Параметри підсистем перетворення теплової енергії

Категорія параметрів	Параметр
1	2
Техніко-технологічні параметри	Кількість насосів
	Сумарна подача насосів
	Сумарна потужність насосів
	Сумарна теплова потужність теплообмінників
	Температурний графік

Завершення таблиці 3.8

1	2
Техніко-технологічні параметри	Кількість теплообмінників
	Тиск теплоносія на вході до підсистеми
	Тиск теплоносія на виході з підсистеми
	Приведені постійні втрати теплової енергії
	Середня швидкість теплоносія у підсистемі
Параметри енергоефективності	Теплопровідність утеплення приміщення
	Теплопровідність утеплення трубопроводів та арматури
	Наявність приладів обліку витрати ресурсів
	Клас енергоефективності насосів
	Наявність перетворювача частоти
Параметри енергетичної безпеки	Матеріал труб
	Наявність автономного джерела живлення обладнання
	Наявність автоматизації регулювання
Економічні параметри	Поточна інвестиційна вартість об'єкта
Параметри експлуатаційної надійності	Матеріал трубопроводів
	Наявність захисного напилення на трубопроводах
	Середня температура теплоносія у підсистемі
	Ймовірність безвідмовної роботи
Параметри експлуатаційної надійності	Тиск теплоносія на виході з насосів
	Наявність автоматизації регулювання

3.3 Функціонал пост-обробки моделі

Сутність функціоналу пост-обробки полягає у створенні на основі результатів обробки даних датасету графіків залежностей між значеннями цільової функції та деяких основних обмежень та виведення їх до користувацького інтерфейсу. До переліку таких обмежень належать:

- Річний відпуск теплоти споживачам;
- Питоме річне споживання палива на виробництво теплової енергії;
- Сумарна теплова потужність;
- Обсяги викидів оксидів сірки;
- Обсяги викидів оксидів азоту;
- Кількість котлів (для типу об'єкта «котельна»);
- Кількість блоків (для типу об'єкта «ТЕЦ»).

Генерування графіків відбувається у Студії машинного навчання Microsoft Azure за допомогою блоків «Execute Python Script».

Формат графіків – точкова діаграма. Вибір такого формату пов’язаний із більшою наочністю результату для користувача при використанні обраних показників.

Вибір графіків для відображення в користувацькому інтерфейсі відбувається у залежності від значення параметру *isCGP*. За допомогою засобу Visual Basic for Applications у файлі Microsoft Excel після проведення прогнозування значення цільової функції, його перенесення та закриття розрахункового файлу відбувається вставка відповідних зображень у форматі .jpg із потрібної папки в межах папки програми до листа «Вивід даних».

Графіки залежностей для котельної наведено на рисунку 3.14. Графіки залежностей для ТЕЦ наведено на рисунку 3.15.

За згенерованими графіками спостерігається пряма залежність питомих викидів оксидів вуглецю від наведених параметрів. Обсяги викидів корелюють із встановленою тепловою потужністю, яка залежить, в тому числі, від кількості елементів теплогенеруючого обладнання.

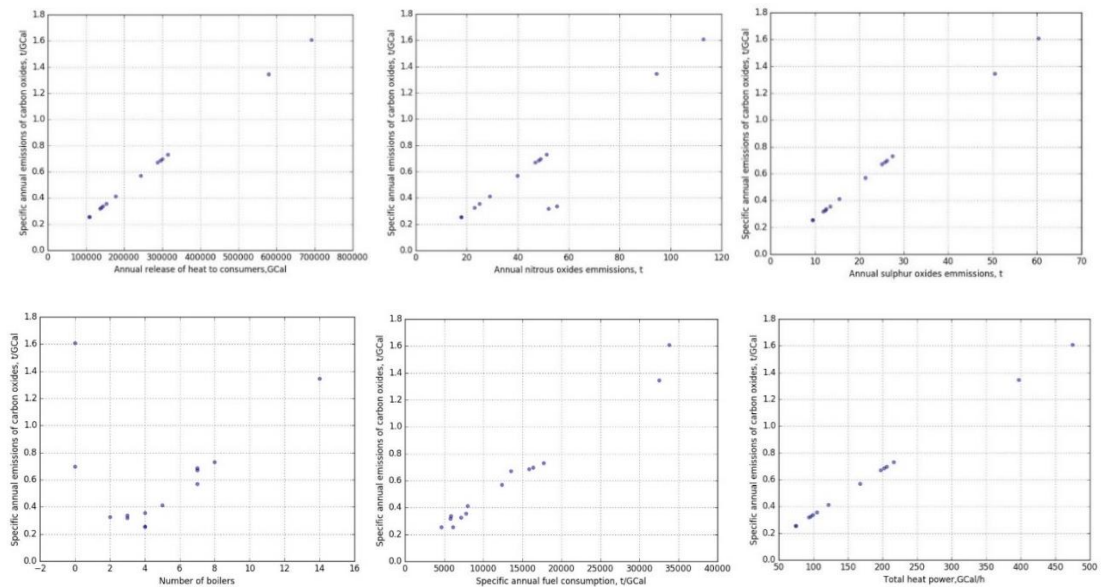


Рисунок 3.14 – Графіки залежностей значень цільової функції та обмежень для котельних

Кореляція між обсягами викидів оксидів вуглецю, оксидів сірки та азоту пов'язана із залежністю цих показників як від типу використовуваного палива, так і від обсягу його використання для генерування енергії. Відповідно, із ростом обсягів виробленої енергії, що поставляється споживачам, значення цільової функції також зростає.

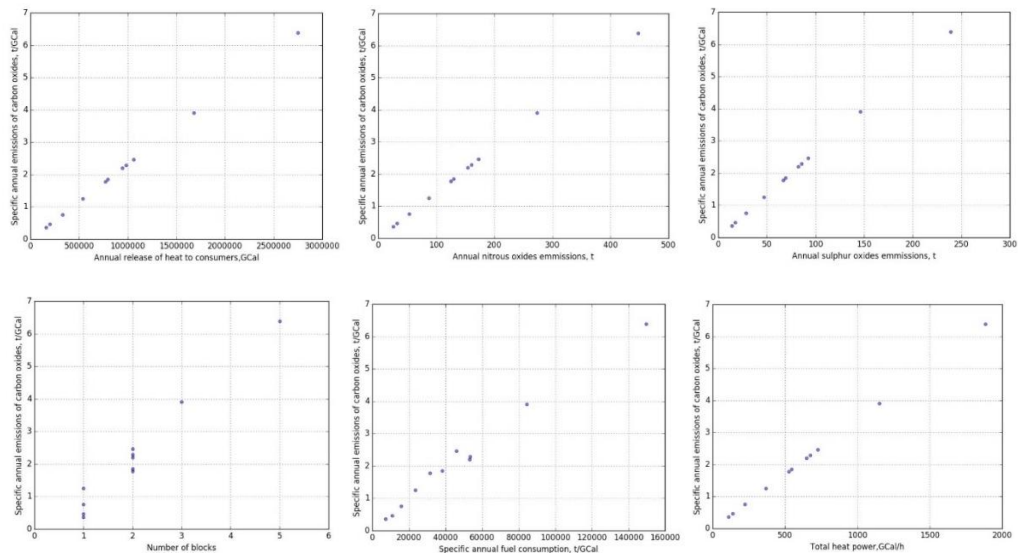


Рисунок 3.15 – Графіки залежностей значень цільової функції та обмежень для ТЕЦ

Застосування даного функціоналу дозволяє дециденту модифікувати значення параметрів при повторному моделюванні об'єкту реконструкції з урахуванням наявних залежностей між параметрами. Таким чином, модель дозволяє з більшою ефективністю врахувати взаємозв'язки між елементами системи та розробити таку архітектуру програми, яка могла б врахувати наявні умови в найбільш повному обсязі для дотримання обмежень архітектури.

3.4 Програмна реалізація та апробація методу підтримки прийняття рішень при управлінні програмами з реконструкції інженерної інфраструктури

Застосування розробленого методу підтримки прийняття управлінських рішень доцільне для фаз планування та виконання програми. При цьому, у фазі

планування метод застосовується при розробці архітектури програми, у фазі виконання – при управлінні архітектурою програми.

Розробка архітектури програми передбачає підбір таких проєктів, при яких буде досягаться максимальне досягнення стратегічних цілей програми та будуть дотримуватись обмеження за фінансами та технічною доцільністю. Розглянемо програму з реконструкції об'єктів генерування енергії району, до складу яких входять 2 котельні. Обмеження за фінансами складає 600 тис. грн. Для кожного з об'єктів граничне допустиме значення питомих обсягів викидів оксидів вуглецю складає 1,5 т/Гкал. Поточна енергопотреба для споживачів району складає 91350 Гкал, зниження енергопотреби відбулось через закриття виробництв, підключених до котельної 1. Таким чином,

$$P = \{Pr_1, Pr_2\} \quad (3.33)$$

$$\sum_{i=1}^2 Cf_i \leq 600000 \text{ грн.} \quad (3.34)$$

$$Q_{end} = 91350 \text{ Гкал} \quad (3.35)$$

$$m_{CO} \leq 1,5 \text{ т/Гкал} \quad (3.36)$$

Поточні параметри котельних наведені у таблиці 3.9.

Таблиця 3.9 – Поточні характеристики об'єктів реконструкції

Категорія параметрів	Параметр	Значення для котельної 1	Значення для котельної 2
1	2	3	4
Техніко-технологічні параметри	Основний вид палива	Природний газ	Природний газ
	Сумарна теплова потужність, Гкал/год.	16,77	19,5
	Температура теплоносія на виході з підсистеми, °С	115	118
	Сумарна потужність тягодуттьових машин, кВт	111	129
	Тиск теплоносія на виході з підсистеми, МПа	1,1	1,1
	Довжина трубопроводів діаметром до 900 мм, м	82,3	83,5
	Довжина трубопроводів діаметром більше 900 мм, м	66,4	67,2

Продовження таблиці 3.9

1	2	3	4
Техніко-технологічні параметри	Сумарна потужність насосів, кВт	382,5	317
	Кількість насосів	9	8
	Сумарна подача насосів, м ³ /год.	1088	900
	Кількість котлів	3	3
	Річна кількість годин роботи котлів, год.	3392	3390
	Середня температура теплоносія на виході котлів, °С	118	120
	Середній тиск теплоносія на виході котлів, МПа	1,2	1,2
Екологічні параметри	Максимальний розмір частинок, що пропускаються фільтрами, мкм	0	0
	Річні обсяги викидів оксидів вуглецю, т/рік	114595	64260
	Річні обсяги викидів оксидів сірки, т/рік	2,13	1,19
	Річні обсяги викидів оксидів азоту, т/рік	9,35	5,24
	Річні обсяги викидів твердих часток, т/рік	0	0
	Відсоток біомаси, що використовується, %	0	0
Параметри енергоефективності	Приведена теплопровідність теплоізоляції труб та запірної арматури, Вт/(м*К)	0,0395	0,041
	Клас енергоефективності насосів	D	D
	Наявність перетворювача частоти	Ні	Ні
	Наявність приладів обліку витрати ресурсів	Так	Так
	Питомі постійні втрати теплової енергії, Гкал	0,014	0,017
	Клас енергоефективності котлів	D	D
	Наявність погодозалежного регулювання	Так	Ні
	Теплопровідність теплоізоляції котлів, Вт/(м*К)	0,071	0,075
Параметри енергетичної безпеки	Сумарний обсяг баків-акумуляторів, м ³	15,42	14,2
	Сумарна потужність резервних насосів, кВт	1,56	1,32
	Наявність автоматизації регулювання	Так	Так
Параметри енергетичної безпеки	Матеріал трубопроводів	Сталь	Сталь
	Наявність резервних дизельних генераторів	Ні	Ні
Економічні параметри	Собівартість теплоти, грн./кВт-год.	1718,745	1755,658
	Сумарні річні витрати теплової енергії на власні потреби, Гкал	2520,172	1413,216
	Річний відпуск теплоти споживачам, Гкал	63004,3	33648
	Питоме річне споживання палива на виробництва теплової енергії, т/Гкал	0,072	0,075
	Інвестиційна вартість об'єкту, грн.	15730313	11011219
Параметри експлуатаційної надійності	ККД системи золошлаковидалення	0	0
	Коефіцієнт готовності обладнання за часом	0,96	0,95
	Вид водопідготовки (фізична/хімічна)	Хімічна	Хімічна
	Коефіцієнт технічного використання за часом	0,94	0,93
	Наявність захисного наплення на трубопроводах	Так	Так
	Ймовірність безвідмовної роботи	0,92	0,92

Завершення таблиці 3.9

1	2	3	4
Параметри експлуатаційної надійності	Наявність електронного захисту котлів	Ні	Ні

Відповідно, в рамках реалізації програми з реконструкції підсистеми генерування енергії необхідно зниження обсягів виробництва та відпуску енергії споживачам, що може бути реалізоване шляхом заміни наявних водогрійних котлів та допоміжного обладнання. При підборі обладнання до встановлення необхідно також забезпечити наступне:

1. Для підвищення енергетичної ефективності підсистеми:

- 1.1. Підвищення класу енергетичної ефективності котлів та насосів;
- 1.2. Зниження теплопровідності теплоізоляції котлів та трубопроводів котельних;
- 1.3. Впровадження засобів погодозалежного регулювання виробництва та відпуску теплової енергії у котельній 2;
- 1.4. Встановлення перетворювачів частоти на об'єктах;
- 1.5. Утеплення трубопроводів та запірної арматури.

2. Для забезпечення енергетичної безпеки та експлуатаційної надійності підсистеми:

- 2.1. Розширення об'ємів баків-акумуляторів;
- 2.2. Встановлення резервних дизельних генераторів;
- 2.3. Встановлення додаткових резервних насосів;
- 2.4. Встановлення засобів електронного захисту котлів.

Впровадження заходів з енергетичної ефективності дозволить забезпечити більш ефективну роботу підсистеми через зниження питомих обсягів споживання палива для виробництва енергії, що сприятиме зниженню собівартості енергії, також знизити обсяги викидів шкідливих речовин при виробництві енергії. Впровадження заходів з енергетичної безпеки дозволить зробити об'єкти підсистеми більш стійкими до можливих негативних впливів зовнішнього середовища.

За допомогою методу експертних оцінок визначено час резерву для робіт обох проєктів. У ролі членів експертної групи в цьому випадку виступають члени команд проєктів, що входять до складу архітектури програми. Результати опитування членів експертної групи наведено у таблиці 3.10.

Таблиця 3.10 – Сумарний резервний час для двох проєктів реконструкції котельних без використання моделі підтримки прийняття рішень

Член експертної групи	Сумарний резервний час для проєкту 1, міс.	Сумарний резервний час для проєкту 2, міс.
Особа 1	8,22	8,45
Особа 2	8,43	8,66
Особа 3	8,60	8,52
Особа 4	8,27	8,49
Особа 5	8,42	8,67
Особа 6	8,35	8,41
Особа 7	8,40	8,55

За результатами опитування середнє арифметичне для першого проєкту складає 8,38 міс., для другого проєкту – 8,54 міс. Сумарний резервний час для робіт програми складає 16,92 міс.

Варіаційний розмах для проєкту 1 – 0,38, для проєкту 2 – 0,22. Середнє квадратичне відхилення для проєкту 1 – 0,12, для проєкту 2 – 0,1. Коефіцієнт варіації для проєкту 1 – 1,43%, для проєкту 2 – 1,17%.

За допомогою моделі HeatOptiGuide проведено прогнозування значення параметра приведених викидів для базового стану котельної 1. Інтерфейс введення даних із внесеними вихідними значеннями наведено на рисунку 3.16.

Після натискання кнопки «Розрахунок» вхідні дані переносяться до розрахункової книги Microsoft Excel, що відповідає типу об'єкту «Котельна». Прогнозування значення цільового показника здійснюється автоматично, після чого спрогнозоване значення та вхідні дані переносяться до інтерфейсу виводу даних. Також до інтерфейсу виводяться графіки залежностей цільового показника від значень основних параметрів системи для такого типу об'єкту.

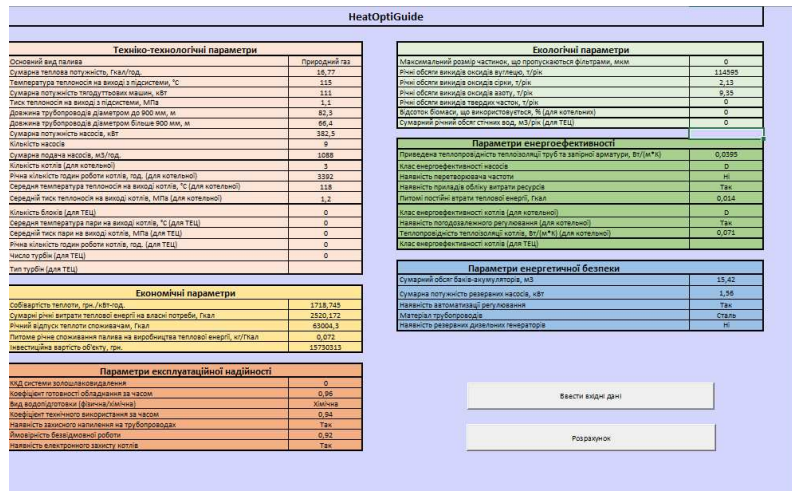


Рисунок 3.16 – Інтерфейс введення даних моделі із введеними вхідними даними

Інтерфейс виводу даних наведено на рисунку 3.17.

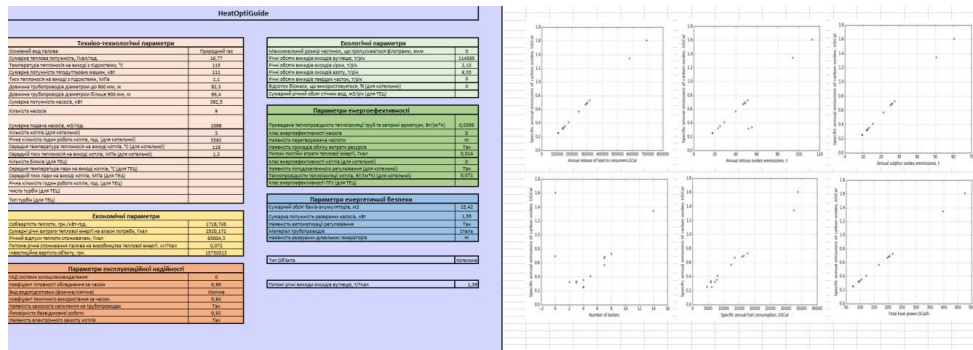


Рисунок 3.17 – Інтерфейс виводу даних після проведення прогнозування

На розгляд команди управління програмою було надано по 2 альтернативних комплекти обладнання для кожної з котельних. Порівняння альтернатив для котельної 1 наведено у таблиці 3.11.

Таблиця 3.11 – Порівняльна характеристика альтернативних комплектів обладнання для проєкту з реконструкції котельної 1

Параметр	Базове значення	Значення при використанні альтернативи 1	Значення при використанні альтернативи 2
1	2	3	4

Завершення таблиці 3.11

1	2	3	4
Сумарна теплова потужність, Гкал/год.	16,77	16,8	16,78
Сумарна потужність тягодуттьових машин, кВт	111	113	111
Довжина трубопроводів діаметром до 900 мм, м	82,3	82,3	82,3
Довжина трубопроводів діаметром більше 900 мм, м	66,4	66,4	66,4
Сумарна потужність насосів, кВт	382,5	383	382,7
Кількість насосів	9	9	9
Сумарна подача насосів, м ³ /год.	1088	1094	1092
Кількість котлів	3	3	3
Річні обсяги викидів оксидів вуглецю, т/рік	114595	99653	99700
Річні обсяги викидів оксидів сірки, т/рік	2,13	1,99	2,01
Річні обсяги викидів оксидів азоту, т/рік	9,35	8,75	8,84
Приведена теплопровідність теплоізоляції труб та запірної арматури, Вт/(м*К)	0,0395	0,035	0,037
Клас енергоефективності насосів	D	A	A
Наявність перетворювача частоти	Ні	Так	Так
Питомі постійні втрати теплової енергії, Гкал	0,014	0,011	0,012
Клас енергоефективності котлів	D	A	A
Теплопровідність теплоізоляції котлів, Вт/(м*К)	0,071	0,059	0,06
Сумарний обсяг баків-акумуляторів, м ³	15,42	80	80
Сумарна потужність резервних насосів, кВт	1,56	3,2	3,2
Наявність резервних дизельних генераторів	Ні	Так	Так
Собівартість теплоти, грн./кВт-год.	1718,745	1715,75	1711,643
Сумарні річні витрати теплової енергії на власні потреби, Гкал	2520,172	2520,172	2520,172
Річний відпуск теплоти споживачам, Гкал	63004,3	57702	57702
Питоме річне споживання палива на виробництві теплової енергії, т/Гкал	0,072	0,066	0,065
Інвестиційна вартість об'єкту, грн.	15730313	15796153	15790840
Коефіцієнт готовності обладнання за часом	0,96	0,97	0,97
Коефіцієнт технічного використання за часом	0,94	0,95	0,95
Ймовірність безвідмовної роботи	0,92	0,95	0,94
Наявність електронного захисту котлів	Ні	Так	Так
Питомі викиди оксидів вуглецю	1,39	1,47	1,6

Загальна вартість обладнання та робіт з його заміни для котельної 1 дорівнює 156,243 тис. грн. для альтернативи 1, 147,330 тис. грн. для альтернативи 2. Обидві

альтернативи задовольняють обмеження по фінансах для програми. Значення питомих викидів оксидів вуглецю для альтернативи 1 дорівнює 1,47 т/Гкал, для альтернативи 2 – 1,6 т/Гкал. Тому доцільно обрати для встановлення на об'єктів пакет обладнання 1.

Порівняння альтернатив для котельної 2 наведено у таблиці 3.12.

Таблиця 3.12 – Порівняльна характеристика альтернативних комплектів обладнання для проєкту з реконструкції котельної 2

Параметр	Базове значення	Значення при використанні альтернативи 1	Значення при використанні альтернативи 2
1	2	3	4
Сумарна теплова потужність, Гкал/год.	19,5	19,5	19,6
Сумарна потужність тягодуттьових машин, кВт	129	128	129
Довжина трубопроводів діаметром до 900 мм, м	83,5	83,5	83,5
Довжина трубопроводів діаметром більше 900 мм, м	67,2	67,2	67,2
Сумарна потужність насосів, кВт	317	317	319
Кількість насосів	8	8	8
Сумарна подача насосів, м ³ /год.	900	902	900
Кількість котлів	3	3	3
Річні обсяги викидів оксидів вуглецю, т/рік	64260	61380	61290
Річні обсяги викидів оксидів сірки, т/рік	1,19	1,13	1,13
Річні обсяги викидів оксидів азоту, т/рік	5,24	4,98	4,98
Приведена теплопровідність теплоізоляції труб та запірної арматури, Вт/(м*К)	0,041	0,036	0,035
Клас енергоефективності насосів	D	A	A
Наявність перетворювача частоти	Ні	Так	Так
Питомі постійні втрати теплової енергії, Гкал	0,017	0,013	0,012
Клас енергоефективності котлів	D	A	A
Теплопровідність теплоізоляції котлів, Вт/(м*К)	0,075	0,06	0,06
Сумарний обсяг баків-акумуляторів, м ³	14,2	72	73
Сумарна потужність резервних насосів, кВт	1,32	3	3,1
Наявність резервних дизельних генераторів	Ні	Так	Так
Собівартість теплоти, грн./кВт-год.	1755,658	1667,42	1659,556
Сумарні річні витрати теплової енергії на власні потреби, Гкал	1413,216	1413,216	1413,216

Завершення таблиці 3.12

1	2	3	4
Річний відпуск теплоти споживачам, Гкал	33648	33648	33648
Питоме річне споживання палива на виробництва теплової енергії, т/Гкал	0,075	0,067	0,066
Інвестиційна вартість об'єкту, грн.	11011219	11082595	11084667
Коефіцієнт готовності обладнання за часом	0,95	0,97	0,97
Коефіцієнт технічного використання за часом	0,93	0,95	0,95
Ймовірність безвідмовної роботи	0,92	0,94	0,94
Наявність електронного захисту котлів	Ні	Так	Так
Питомі викиди оксидів вуглецю	1,17	1,29	1,3

Загальна вартість обладнання та робіт з його заміни для котельної 2 дорівнює 155,339 тис. грн. для альтернативи 1, 157,421 тис. грн. для альтернативи 2. Обидві альтернативи задовольняють обмеження по фінансах для програми. Значення питомих викидів оксидів вуглецю для альтернативи 1 дорівнює 1,29 т/Гкал, для альтернативи 2 – 1,3 т/Гкал. Тому доцільно обрати для встановлення на об'єктів пакет обладнання 1.

Загальні витрати на закупівлю та встановлення обладнання для обох котельних складають 311,582 тис. грн.

За допомогою методу експертних оцінок визначено час резерву для робіт обох проєктів при використанні моделі підтримки прийняття рішень. У ролі експертів в цьому випадку виступають керівники проєктів, представники проєктних організацій, керівництво програми. Результати опитування експертів наведено у таблиці 3.13.

Таблиця 3.13 – Сумарний резервний час для двох проєктів реконструкції котельних при використанні моделі підтримки прийняття рішень

Член експертної групи	Сумарний резервний час для проєкту 1, міс.	Сумарний резервний час для проєкту 2, міс.
1	2	3
Особа 1	5,32	5,25
Особа 2	5,41	5,31
Особа 3	4,95	5,16

Завершення таблиці 3.13

1	2	3
Особа 4	5,22	5,19
Особа 5	5,30	5,35
Особа 6	5,01	5,22
Особа 7	5,25	5,14

За результатами опитування середнє арифметичне для першого проєкту складає 5,21 міс., для другого проєкту – 5,23 міс. Сумарний резервний час для робіт програми складає 10,24 міс. Відповідно, відбулося зменшення планованих термінів впровадження програми на 39%.

Варіаційний розмах для проєкту 1 – 0,37, для проєкту 2 – 0,21. Середнє квадратичне відхилення для проєкту 1 – 0,17, для проєкту 2 – 0,08. Коефіцієнт варіації для проєкту 1 – 3,26%, для проєкту 2 – 1,53%.

Розглянемо ситуацію, що пов'язана із виникненням зовнішнього впливу на систему-об'єкт реконструкції, що відбувається під час впровадження програми та викликає необхідність внесення змін до архітектури програми. На ділянці, що живиться від котельної 2, вирішено побудувати багатоповерховий житловий будинок, що також буде отримувати теплову енергію від даної котельної. Відповідно, відбулося підвищення енергопотреби річної для котельної 2, нове значення – 33860 Гкал. Було визначено оновлену конфігурацію системи, з урахуванням нового значення енергопотреби. Цільові параметри котельної 2 наведено у таблиці 3.14.

Таблиця 3.14 – Оновлені цільові значення характеристик котельної 2

Категорія параметрів	Параметр	Значення
1	2	3
Техніко-технологічні параметри	Основний вид палива	Природний газ
	Сумарна теплова потужність, Гкал/год.	19,62
Техніко-технологічні параметри	Температура теплоносія на виході з підсистеми, °С	118
	Сумарна потужність тягодуттьових машин, кВт	129,8
	Тиск теплоносія на виході з підсистеми, МПа	1,1
	Довжина трубопроводів діаметром до 900 мм, м	83,5

Продовження таблиці 3.14

1	2	3
Техніко-технологічні параметри	Довжина трубопроводів діаметром більше 900 мм, м	67,2
	Сумарна потужність насосів, кВт	318,9
Техніко-технологічні параметри	Кількість насосів	8
	Сумарна подача насосів, м ³ /год.	900
	Кількість котлів	3
	Річна кількість годин роботи котлів, год.	3390
	Середня температура теплоносія на виході котлів, °С	120
	Середній тиск теплоносія на виході котлів, МПа	1,2
Екологічні параметри	Максимальний розмір частинок, що пропускаються фільтрами, мкм	0
	Річні обсяги викидів оксидів вуглецю, т/рік	61757
	Річні обсяги викидів оксидів сірки, т/рік	1,14
	Річні обсяги викидів оксидів азоту, т/рік	5
	Річні обсяги викидів твердих часток, т/рік	0
	Відсоток біомаси, що використовується, %	0
Параметри енергоефективності	Приведена теплопровідність теплоізоляції труб та запірної арматури, Вт/(м*К)	0,035
	Клас енергоефективності насосів	А
	Наявність перетворювача частоти	Так
	Наявність приладів обліку витрати ресурсів	Так
	Питомі постійні втрати теплової енергії, Гкал	0,013
	Клас енергоефективності котлів	А
	Наявність погодозалежного регулювання	Так
	Теплопровідність теплоізоляції котлів, Вт/(м*К)	0,06
Параметри енергетичної безпеки	Сумарний обсяг баків-акумуляторів, м ³	76
	Сумарна потужність резервних насосів, кВт	3
	Наявність автоматизації регулювання	Так
Параметри енергетичної безпеки	Матеріал трубопроводів	Сталь
	Наявність резервних дизельних генераторів	Так
Економічні параметри	Собівартість теплоти, грн./кВт-год.	1677,882
	Сумарні річні витрати теплової енергії на власні потреби, Гкал	1413,216
	Річний відпуск теплоти споживачам, Гкал	33860
	Питоме річне споживання палива на виробництва теплової енергії, т/Гкал	0,067
	Інвестиційна вартість об'єкту, грн.	11151175
Параметри експлуатаційної надійності	ККД системи золошлаковидалення	0
	Коефіцієнт готовності обладнання за часом	0,97
	Вид водопідготовки (фізична/хімічна)	Хімічна
	Коефіцієнт технічного використання за часом	0,95
	Наявність захисного наплення на трубопроводах	Так

Завершення таблиці 3.14

1	2	3
Параметри експлуатаційної надійності	Ймовірність безвідмовної роботи	0,94
	Наявність електронного захисту котлів	Так

Прогнозоване значення питомих викидів оксидів вуглецю для даної конфігурації системи складає 1,3 т/Гкал.

Запропоновано 2 альтернативних комплекти обладнання для встановлення на котельній. Характеристики системи при застосуванні даних комплектів наведено у таблиці 3.15.

Таблиця 3.15 – Порівняльна характеристика альтернативних комплектів обладнання для проекту з реконструкції котельної 2 для оновленого стану системи

Параметр	Базове значення	Значення при використанні альтернативи 1	Значення при використанні альтернативи 2
1	2	3	4
Сумарна теплова потужність, Гкал/год.	19,5	19,7	19,65
Сумарна потужність тягодуттьових машин, кВт	129	130	130
Довжина трубопроводів діаметром до 900 мм, м	83,5	83,5	83,5
Довжина трубопроводів діаметром більше 900 мм, м	67,2	67,2	67,2
Сумарна потужність насосів, кВт	317	319	319
Кількість насосів	8	8	8
Сумарна подача насосів, м ³ /год.	900	900	900
Кількість котлів	3	3	3
Річні обсяги викидів оксидів вуглецю, т/рік	64260	61757	61800
Річні обсяги викидів оксидів сірки, т/рік	1,19	1,14	1,15
Річні обсяги викидів оксидів азоту, т/рік	5,24	5	5,1
Приведена теплопровідність теплоізоляції труб та запірної арматури, Вт/(м*К)	0,041	0,036	0,035
Клас енергоефективності насосів	D	A	A
Наявність перетворювача частоти	Ні	Так	Так
Питомі постійні втрати теплової енергії, Гкал	0,017	0,013	0,012
Клас енергоефективності котлів	D	A	A
Теплопровідність теплоізоляції котлів, Вт/(м*К)	0,075	0,06	0,06
Сумарний обсяг баків-акумуляторів, м ³	14,2	76	76

Завершення таблиці 3.15

1	2	3	4
Сумарна потужність резервних насосів, кВт	1,32	3	3
Наявність резервних дизельних генераторів	Ні	Так	Так
Собівартість теплоти, грн./кВт-год.	1755,658	1669,233	1667,882
Сумарні річні витрати теплової енергії на власні потреби, Гкал	1413,216	1413,216	1413,216
Річний відпуск теплоти споживачам, Гкал	33648	33860	33860
Питоме річне споживання палива на виробництво теплової енергії, т/Гкал	0,075	0,067	0,066
Інвестиційна вартість об'єкту, грн.	11011219	11154831	11152728
Коефіцієнт готовності обладнання за часом	0,95	0,97	0,97
Коефіцієнт технічного використання за часом	0,93	0,95	0,95
Ймовірність безвідмовної роботи	0,92	0,94	0,94
Наявність електронного захисту котлів	Ні	Так	Так
Питомі викиди оксидів вуглецю	1,17	1,29	1,3

Загальна вартість обладнання та робіт з його заміни для котельної 2 з урахуванням змін, пов'язаних із підвищенням енергопотреби, дорівнює 158,995 тис. грн. для альтернативи 1, 156,892 тис. грн. для альтернативи 2. Обидві альтернативи задовольняють обмеження по фінансах для програми. Значення питомих викидів оксидів вуглецю для альтернативи 1 дорівнює 1,29 т/Гкал, для альтернативи 2 – 1,3 т/Гкал. Тому доцільно обрати для встановлення на об'єктів пакет обладнання 1.

Загальні витрати на закупівлю та встановлення обладнання для обох котельних з урахуванням змін складають 315,238 тис. грн.

Застосування методу прийняття рішень при управлінні ПРІ з використанням розробленої моделі підтримки прийняття рішень дозволило досягти таких результатів:

1. Скоротити плановані терміни реалізації програми завдяки зниженню резервного часу для робіт проєктів. Скорочення резервного часу пов'язане зі зниженням імовірності виникнення невідповідностей між вимогами програми та значеннями параметрів системи, що досягаються при впровадженні програми.

2. Врахувати екологічну компоненту при прийнятті рішень. Використання значення питомих обсягів викидів оксидів вуглецю як додаткового обмеження при формулюванні управлінського рішення дозволяє дотриматись наявних нормативів, що стосуються викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря, при формуванні конфігурації реконструйованої підсистеми.

3. Знизити вплив суб'єктивних суджень технічних фахівців-членів команд проєктів при здійсненні підбору обладнання до встановлення на об'єктах системи. Застосування моделі підтримки прийняття рішень у порівняльному аналізі запропонованих альтернативних комплектів обладнання дозволяє визначити таку конфігурацію підсистеми, що відповідає найнижчому значенню цільової функції, визначеному за допомогою методів машинного навчання. Це унеможливорює вибір такого переліку обладнання, що не забезпечує відповідність до наявних обмежень, та сприяє повному досягненню цілей програми.

3.4 Висновки до третього розділу

В рамках розділу розроблено функціональну композицію моделі підтримки прийняття рішень при управлінні програмами з реконструкції інженерної інфраструктури.

У якості цільової функції прийнято питомі річні викиди оксидів вуглецю, оскільки даний параметр дає можливість підбору параметрів системи з урахуванням впливу такої системи на довкілля. У якості обмежень моделі виступають показники сумарної теплової потужності, загальної інвестиційної вартості системи, питомих викидів оксидів вуглецю тощо. Використання широкого спектру параметрів елементів систем дозволяє застосувати комплексний підхід до їх моделювання для максимізації ефективності розробки та управління архітектурою програми.

Створено дві окремі моделі для таких типів об'єктів, як котельна та ТЕЦ. Дані моделі є ідентичними за архітектурою але мають відмінності у критеріях визначення необхідних параметрів, для чого розроблено скрипт, який виконує модифікацію датасету відповідно до обраного типу об'єкту.

Для навчання моделей обрано регресію з використанням нейронної мережі, що дало можливість ефективного прогнозування значення цільової функції при відсутності можливості чіткої комплексної формалізації інженерних систем, в тому числі, систем тепlopостачання. Точність прогнозування значень для котельних склала 92,18%, для ТЕЦ – 98,38%.

Моделі прогнозування значень цільової функції розгорнуто у якості веб-служби, в процесі користування доступ до них відбувається через відповідні файли Microsoft Excel із надбудовою Студії машинного навчання. Це дозволяє користуватись моделлю автономно на комп'ютері користувача, без необхідності прямого використання Студії машинного навчання.

Для навчання моделі створено датасет, що складається з історичних даних стосовно параметрів модельованих об'єктів. Такі дані спираються на наявну нормативну базу, тому застосування методів машинного навчання дозволяє отримати результат, що відповідає існуючій в Україні нормативній базі, без проведення відповідного комплексу розрахунків. Також перевагою є можливість застосування ширшого спектру обмежень, у порівнянні з існуючими на даний момент моделями.

Розроблено підхід до категоризації параметрів для будь-якого виду інженерних систем, який дає можливість масштабування моделі для підсистем розподілу та перетворення енергії.

Реалізовано функціонал пост-обробки даних, що полягає у створенні на основі результатів обробки даних датасету графіків залежностей між значеннями цільової функції та деяких основних обмежень та виведення їх до користувацького інтерфейсу. Використання функціоналу пост-обробки даних у такій реалізації дозволяє дециденту модифікувати значення параметрів при повторному моделюванні об'єкту реконструкції з урахуванням наявних залежностей між параметрами, відповідно можливе більш ефективне врахування взаємозв'язків між елементами системи та розробка такої архітектури програми, яка враховувала б наявні умови в найбільш повному обсязі для дотримання обмежень архітектури.

Апробація розробленого методу базувалась на основі моделювання процесу прийняття рішень при реалізації програми з реконструкції підсистеми генерування енергії району міста, при цьому у якості об'єктів генерування енергії виступали дві котельні. Для фази планування програми за допомогою моделі було визначено базову та цільову конфігурації об'єктів, визначено відповідні питомі обсяги викидів оксидів вуглецю. Було здійснено аналіз запропонованих альтернатив обладнання шляхом порівняння конфігурацій об'єктів при використанні кожної з альтернатив. На основі спрогнозованих значень цільової функції здійснено вибір комплектів для кожного з об'єктів. Прогнозовані значення цільової функції для котельної 1 дорівнюють відповідно: базове – 1,39 т/Гкал, цільове – 1,47 т/Гкал, результуюче – 1,47 т/Гкал. Для котельної 2, відповідно: базове – 1,17 т/Гкал, цільове – 1,29 т/Гкал, результуюче – 1,29 т/Гкал.

При використанні моделі спостерігається зниження планованих термінів впровадження програми за рахунок зниження резервного часу робіт проєктів. Сумарне зниження резервного часу для програми складає 39%.

Для фази виконання програми здійснено аналіз альтернативних комплектів обладнання для котельної 2 з урахуванням впливу зовнішнього середовища, що полягав у зниженні енергопотребі для котельної. Прогнозовані значення цільової функції дорівнюють відповідно: базове – 1,17 т/Гкал, цільове – 1,3 т/Гкал, результуюче – 1,29 т/Гкал.

Застосування методу прийняття рішень при управлінні ПРП з використанням моделі дозволило підвищити ефективність прийнятих управлінських рішень завдяки скороченню планованих термінів впровадження програми, врахувати екологічну компоненту при прийнятті рішень, запобігти виникненню можливої корупційної складової при формуванні конфігурації реконструйованої підсистеми.

Основні результати розділу опубліковано в роботах [17, 21].

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі теоретично узагальнено, а також подано нове вирішення науково-прикладного завдання щодо створення компонентів інформаційної технології підтримки прийняття рішень на етапах планування та виконання програм з реконструкції інфраструктурних систем. Результати роботи мають важливе значення для організації планування та управління змістом програм з реконструкції інженерної інфраструктури та дають змогу підвищити ефективність рішень щодо розробки та управління архітектурою таких програм. Основні наукові та практичні результати роботи дають змогу зробити відповідні висновки:

1. Проведено аналіз стану проблеми управління змістом програм з реконструкції інженерної інфраструктури як таких, об'єктами яких є складні організаційно-технічні системи, визначено структуру, основні обмеження таких програм, проблеми та ризики, що можуть виникнути при стандартному управлінні такими програмами. Обґрунтовано доцільність застосування адаптивного підходу до управління ПРІІ.

2. Проведено аналіз стану проблеми адаптивного управління програмами з реконструкції інженерної інфраструктури. Дістав подальшого розвитку комбінований метод адаптивного управління програмами, заснований на методах пасивного та активного адаптивного управління програмами, що дозволяє підвищити ефективність адаптивного управління програмою

3. Розглянуто засоби адаптивного управління проектами та програмами, визначено доцільність їх застосування для різних фаз управління програмами. Проаналізовано доцільність застосування засобів для моделювання інженерних систем для підтримки прийняття рішень при управлінні змістом ПРІІ, визначено їх основні недоліки. Сформульовано мету та завдання дослідження.

4. Вперше розроблено модель підтримки прийняття рішень на основі штучної нейронної мережі. Описано прогнозу модель на основі методу прогнозування з дисконтуванням та метод підготовки даних на основі методу імітаційного

доповнення вкладів. Описано модель штучної нейронної мережі, що дозволяє забезпечити можливість масштабування, комплексність відображення систем та застосувати категорії даних при прогнозуванні значення цільового показника.

5. Удосконалено систему компонентів моделі, заснованих на засобах машинного навчання, що здійснюють перерозподіл варійованих параметрів моделі в залежності від обмежень об'єктів реконструкції, що дозволяє забезпечити адаптацію процесу прийняття рішень при реалізації програм з реконструкції інженерних інфраструктурних систем до індивідуальних умов та обмежень експлуатації

6. Удосконалено метод прийняття рішень при управлінні ПРІІ, заснований на використанні моделі підтримки прийняття рішень. Описано основні етапи методу, що дозволяє скоротити плановані терміни реалізації програм завдяки зниженню ймовірності виникнення невідповідностей між вимогами програми та значеннями параметрів системи, що досягаються при впровадженні програми.

7. Розроблено функціональну композицію моделі за допомогою Студії машинного навчання Microsoft Azure. Описано архітектуру моделі та інтерфейс користувача. Розроблено прогнозні моделі для типів об'єктів «Котельна» та «ТЕЦ», що дозволяє адаптувати процес прогнозування під індивідуальні вимоги ПРІІ.

8. Описано датасет моделі підтримки прийняття рішень, що складається з історичних даних стосовно об'єктів комунальної енергетики. Розроблено підхід до категоризації параметрів інженерних систем, що дозволяє забезпечити можливість масштабування моделі та застосування моделі для різних типів інженерних інфраструктурних систем.

9. Програмно реалізовано метод прийняття рішень при управлінні ПРІІ, що дозволяє скоротити плановані терміни реалізації програми. Проведено апробацію методу на програмі з реконструкції об'єктів генерування району міста.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Sukhonos, M. (2016). Дуальное управление портфелями энергоинфраструктурных проектов в условиях динамического окружения [Dual energy infrastructure portfolio management in a dynamic environment]. Kharkiv, Ukraine: O.M. Beketov NUUE in Kharkiv. <https://core.ac.uk/download/pdf/78066698.pdf>
2. Timinskyi, A.G. (2016). Технології адаптивного управління як механізм забезпечення ефективності організаційно-управлінських систем [Technologies of adaptive management as a mechanism of support efficiency of organizational management systems]. *Management of Development of Complex Systems*, 27, 122-131. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Urss_2016_27_20
3. G. Blokdyk (2018). *Adaptive Program Management a Clear and Concise Reference*. Toronto, ON: 5StarCooks.
4. A. Silber (2017). *Adaptive Project Management: Leading Complex and Uncertain Projects*. Trenton, GA: BoockLocker.com Inc.
5. Bolling, R. J., & Van der Wijk, K. (2019, February 5). Practice note. Adaptive programme management in fragile and complex settings. *The Broker*. Retrieved February 1, 2023, from <https://www.thebrokeronline.eu/practice-note-adaptive-programme-management-in-fragile-and-complex-settings/>
6. I.K. Shesho, R.V. Filkoski, & D.J. Tashevski (2018). Techno-Economic and Environmental Optimization of Heat Supply Systems in Urban Areas. *Thermal Science*, 22(5), 1635-1647. <https://doi.org/10.2298/TSCI18S5635S>
7. M.A. Ancona, M. Bianchi, L. Brancini, & F. Melino (2013). *Energy Procedia* 45, 1225-1234. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.01.128>
8. E.D. Mehleri, H. Sarimveis, N.C. Markatos, & L.G. Papageorgiou (2012). A Mathematical Programming Approach for Optimal Design of Distributed Energy Systems at the Neighbourhood Level. *Energy* xxxx, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.02.009>

9. M. Sameti, & F. Haghghat. (2019). Optimization of 4th Generation Distributed District Heating System: Design and Planning of Combined Heat and Power. *Renewable Energy* 130, 371-387. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.06.068>
10. X. Zheng, G. Wu, Y. Qiu, X. Zhan, N. Shah, & N. Li (2018). A MINLP Multi-Objective Optimization Model for Operational Planning of a Case Study CCHP System in Urban China. *Applied Energy*, 210, 1126-1140. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.06.038>
11. Закон України Про захист атмосферного повітря [Law of Ukraine About atmospheric air protection], 2707-XII (1992). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2707-12#Text>
12. Kadykova, I., Khvostichenko V., & Khudiakov, I. (2020). Application of convergent approach in strategic project management. *Herald of Advanced Information Technology*, 3(2), 83-94. <http://dspace.opu.ua/jspui/handle/123456789/10799>
13. Sukhonos, M., Babaiev, V., Pliuhin, V., Teterev, V., & Khudiakov, I. (2022). Load Forecasting and Electricity Consumption by Regression Model. In: Arsenyeva, O., Romanova, T., Sukhonos, M., Tsegelnyk, Y. (Eds.) *Smart Technologies in Urban Engineering. STUE 2022. Lecture Notes in Networks and Systems*, vol 536, 302-314. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-20141-7_28
14. Pliuhin, V., Petrenko, O., Tsegelnyk, Y., & Khudiakov, I. (2022). Optimization of output parameters of electromechanical energy converters with a solid rotor in Ansys RMxprt. *Lighting Engineering & Power Engineering*, 63(3), 1 – 8. <https://doi.org/10.33042/2079-424X.2022.61.3.01>
15. Teterev, V., & Khudiakov, I. (2022). Simulation of a Hybrid Solar Power Plant with a Hydrogen Generator in MATLAB/Simulink Environment. *Lighting Engineering & Power Engineering*, 61(2), 30-48. <https://doi.org/10.33042/2079-424X.2022.61.2.01>
16. Khudiakov, I., & Sukhonos, M. (2021). Adaptive approach to engineering infrastructure reconstruction program and project management. *Development management*, 19(4), 17-26. [https://doi.org/10.57111/devt.19\(4\).2021.17-26](https://doi.org/10.57111/devt.19(4).2021.17-26)
17. Khudiakov I., & Sukhonos M. (2023). An adaptive decision-making support model in the management of engineering infrastructure reconstruction programs and

projects. *Municipal Economy of Cities*, 4(178), 2–9. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2023-4-178-2-9>

18. Khudiakov, I., Sukhonos, M., & Pliuhin, V. (2020). Місце штучного інтелекту в концепції систем прийняття рішень [Place of artificial intelligence in the decision support systems concept]. In: Sukhonos, M., Starostina, A., Vershynina, D., Hovorova, K. (eds.) *Prospects for the development of territories: theory and practice: materials of the All-Ukrainian scientific and practical conference of students of higher education and young scientists, Kharkiv, November 19-20, 2020* (pp. 489-491). Kharkiv: O.M. Beketov NUUE in Kharkiv. <https://science.kname.edu.ua/images/dok/konferentsii/2020konf/2020-1--7-.pdf>

19. Khudiakov, I. (2020). Адаптивна модель управління програмами з енергоефективності на промислових підприємствах [Adaptive management model of energy efficiency programs at industrial enterprises]. In: Drozdenko, O., Shabelnyk, Yu. (eds.) *Informatics, mathematics, automation IMA :: 2020. Materials and program of the international scientific and technical conference of students and young scientists*, (p. 173). Sumy: Sumy state university <https://er.chdtu.edu.ua/bitstream/ChSTU/1526/1/IMA-2020.pdf>

20. Khudiakov, I., Sukhonos, M., Pliuhin, V., & Iliencko, O. (2020). Adaptive model of energy efficiency programs management at industrial enterprises. In: Sukhonos, M., Iliencko, O., Krohmal, A., Zubenko, S., Anisenko, O. (eds.) *Young Researchers in the Global World : Vistas and Challenges : Book of papers of the 2020 International Forum for Young Researchers*, (pp. 136-138). Kharkiv: O.M. Beketov NUUE in Kharkiv. https://science.kname.edu.ua/images/dok/konferentsii/2020konf/_25.pdf

21. I. Khudiakov. Formation of components of an adaptive decision-making support means components in engineering infrastructure reconstruction programs management. *Lighting Engineering & Power Engineering*, 62(1), 12-16. <https://doi.org/10.33042/2079-424X.2023.62.1.02>

22. I. Khudiakov. The decision-making method in the management of engineering infrastructure reconstruction programs using an adaptive decision support model.

Lighting Engineering & Power Engineering, 62(2), 38-45. <https://doi.org/10.33042/2079-424X.2023.62.2.01>

23. Saidi, S., Kattan, L., Jayasinghe, P., Hettiarachi, P., & Taron, J. (2018). Integrated infrastructure systems—A review. *Sustainable Cities and Society*, 36, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.09.022>

24. Hickford, A.J., Blainey, S.P., Ortega Hortelano, A., & Pant, R. (2018). Resilience engineering: theory and practice in interdependent infrastructure systems. *Environ Syst Decis* 38, 278–291. <https://doi.org/10.1007/s10669-018-9707-4>

25. Thiry, M. (2015). *Program management*. London, UK: Rutledge. <https://doi.org/10.4324/9781315264936>

26. Artto, K., Martinsuo, M., Gemünden, H.G., & Murtoaro, J. (2009). Foundations of program management: A bibliometric view, *International Journal of Project Management*, 27(1), 1-18. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2007.10.007>

27. Tanaka, H. (2014). Toward Project and Program Management Paradigm in the Space of Complexity: A Case Study of Mega and Complex Oil and Gas Development and Infrastructure Projects. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 119, 65-74. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.03.010>

28. Heylighen, F. (1999). The Science of Self-Organization and Adaptivity. In L.D. Kiel (Ed.), *Knowledge Management, Organizational Intelligence and Learning, and Complexity. Encyclopedia of Life Support Systems* (pp.1-26). Oxford, UK: Eolss Publishers Co. <http://pespmc1.vub.ac.be/Papers/EOLSS-Self-Organiz.pdf>

29. Jarrahi, M.H. (2018). Artificial intelligence and the future of work: Human-AI symbiosis in organizational decision making. *Business Horizons*, 61 (4), 577-586. <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2018.03.007>

30. Jha K., Doshi, A., Patel, A., & Shah, M. (2019). A comprehensive review on automation in agriculture using artificial intelligence. *Artificial Intelligence in Agriculture* (2), 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.aiia.2019.05.004>.

31. Li, Bh., Hou, Bc., Yu, Wt., Lu, Xb., & Yang, Cw. (2017). Applications of artificial intelligence in intelligent manufacturing: a review. *Frontiers Inf Technol Electronic Eng* 18, 86–96. <https://doi.org/10.1631/FITEE.1601885>

32. Ransbotham, S., Kiron, D., Gerbert, P., & Reeves, M. (2017). Reshaping Business With Artificial Intelligence. MIT Sloan. <https://www.proquest.com/docview/1950374030?fromopenview=true&pq-origsite=gscholar>
33. Argent, R.M. (2009). Components of Adaptive Management. In C. Allan, & G.H. Stankey (Eds.). *Adaptive Environmental Management: A Practitioner's Guide (1st ed.)* (pp. 11-36). Dordrecht, Netherlands: Springer Dordrecht. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9632-7>
34. Tervo-Kankare, K., Kaján, E., & Saarinen, J. (2019). Costs and benefits of environmental change: tourism industry's responses in Arctic Finland. In N. Ooi, E.A. Duke, & J. O'Leary (Eds.) *Tourism in changing Natural Environments. (1st ed.)*. London, UK: Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780429202674>
35. de Azevedo, G.B., Maccari, E.A., & Asgary, N. (2021). The use of adaptive project management practices and methodologies in the development of a professional doctoral program. *Revista de Administração da UFSM*, 14(1), 44-62. <https://doi.org/10.5902/1983465942849>
36. Canessa, S., Ottonello, D., Rosa, G., Salvidio, S., Grasselli, E., & Oneto, F. (2019). Adaptive management of species recovery programs: A real-world application for an endangered amphibian. *Biological Conservation*, 236, 202-210. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2019.05.031>
37. Samrah, R.A., Shaalan, K., & Al Ali, A. (2017). System Dynamics Modelling for the Complexity of Knowledge Creation Within Adaptive Large Programs Management. In: Rocha, Á., Correia, A., Adeli, H., Reis, L., Costanzo, S. (Eds.) *Recent Advances in Information Systems and Technologies. WorldCIST 2017. Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol 569. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-56535-4_1
38. Gutheil, L. (2020). Adaptive project management for the civil society sector: towards an academic research agenda. *International Development Planning Review*, 43(3). <https://doi.org/10.3828/idpr.2020.17>

39. Wirkus, M. (2016). Adaptive Management Approach to an Infrastructure Project. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, 226, 414-422. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2016.06.206>

40. Thomann, J. A., Werner, A.D., Irvine, D.J., & Currell, M.J. (2020). Adaptive management in groundwater planning and development: A review of theory and applications. *Journal of Hydrology*, 586, article number 124871. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124871>

41. Yushchenko, N. (2020). Аспекти класифікації сітьових методів планування ресурсів та витрат і управління ними під час модернізації комунальної інфраструктури територіальних громад в умовах децентралізації [Aspects of classification of network methods of planning of resources and expenses and their management during modernization of a municipal infrastructure of territorial communities in the conditions of decentralization]. *Scientific Bulletin of the International Humanities University. Series: Economy and Management*, 43, 244-247. doi: 10.32841/2413-2675/2020-43-40.

42. Ciapessoni, E., Cirio, D., Pitto, A., & Sforza, M. (2020). A quantitative methodology to assess the process of service and infrastructure recovery in power systems. *Electric Power Systems Research*, 189, article number 106735. doi: 10.1016/j.epsr.2020.106735.

43. Nieviedrov, D. (2020). *Методи та моделі оцінки впливу на довкілля в проектах будівництва та реконструкції об'єктів енергетичної інфраструктури [Methods and Models of Environmental Impact Assessment in Critical Infrastructure Facilities Construction and Reconstruction Projects]* [Candidate of Sciences, National Transport University]. <http://www.ntu.edu.ua/>

44. Bepala, N. H. (2019). Основні напрямки розвитку регіональної енергетичної системи [Main directions of the development of the regional energy system]. In Zakladnyi, O. (Ed.), *Energy. Ecology. Human: Proceedings of the XI Scientific and Technical Conference of the Institute of Energy Conservation and Energy Management* (pp. 14-25). Kyiv, Ukraine: Ihor Sikorskyi Kyiv Polytechnic University. www.en.iee.kpi.ua

45. Çelik, M. (2016). Network restoration and recovery in humanitarian operations: Framework, literature review, and research directions. *Surveys in Operations Research and Management Science*, 21(2), 47-61. doi: 10.1016/j.sorms.2016.12.001.
46. Moon, J., Park, J., Hwang, E., & Jun, S. (2017). Forecasting power consumption for higher educational institutions based on machine learning. *J. Supercomput.* 74(8), 3778–3800. <https://doi.org/10.1007/s11227-017-2022-x>
47. Saxena, H., Aponte, O., & McConky, K.T. (2019). A hybrid machine learning model for forecasting a billing period's peak electric load days. *Int. J. Forecast.* 35(4), 1288–1303. <https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2019.03.025>
48. Pliuhin, V., Korobka, V., Karyuk, A., Pan, M., & Sukhonos, M. (2019). Using Azure Machine Learning Studio with Python scripts for induction motors optimization web-deploy project. In: *2019 IEEE International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications, Science and Technology (PIC S&T)*, Kyiv, 631–634. <https://doi.org/10.1109/PICST47496.2019.9061447>
49. Pliuhin, V., Pan, M., Yesina, V., & Sukhonos, M. (2018). Using Azure Maching Learning cloud technology for electric machines optimization. In: *2018 International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T)*, Kharkiv, 55–58. <https://doi.org/10.1109/INFOCOMMST.2018.8632093>
50. Pliuhin, V., Sukhonos, M., & Bileckiy, I. (2020). Object oriented mathematical modeling of electrical machines. In: *2020 IEEE 4th International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*, Istanbul, pp. 267–272. <https://doi.org/10.1109/IEPS51250.2020.9263158>
51. Baliyan, A., Gaurav, K., & Mishra, S.K. (2015). A Review of Short Term Load Forecasting using Artificial Neural Network Models, *Procedia Computer Science*, 48 ,121-125. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.04.160>
52. Wang, Jz., Wang, Jj., Zhang, Zg., & Guo, Sp. (2011). Forecasting stock indices with back propagation neural network. *Expert Systems with Applications*, 38(11), 14346-14355. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.04.222>

53. Schlechtingen, M., & Santos, I.F. (2011). Comparative analysis of neural network and regression based condition monitoring approaches for wind turbine fault detection. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 25 (5), 1849-1875. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2010.12.007>

54. Rodriguez-Galiano, V., Sanchez-Castillo, M., Chica-Olmo, M., & Chica-Rivas, M. (2015). Machine learning predictive models for mineral prospectivity: An evaluation of neural networks, random forest, regression trees and support vector machines. *Ore Geology Reviews*, 71, 804-818. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.01.001>

55. Ouyang, M. (2014). Review on modeling and simulation of interdependent critical infrastructure systems. *Reliability Engineering & System Safety*, 121, 43-60. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2013.06.040>

56. Keirstead, J. Jennings, M., & Sivakumar, A. (2012). A review of urban energy system models: Approaches, challenges and opportunities, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(6), 3847-3866. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.047>

57. Fahrmeir, L., Kneib, T., Lang, S., & Marx, B. (2013). Regression models. In: *Regression* (pp. 21-72). Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-34333-9_2

58. Lütkepohl, H. (2015). Vector autoregressive models. In: N. Hashimzade, M.A. Thornton (Eds.), *Handbook of Research Methods and Applications in Empirical Macroeconomics* (pp. 139-164). Cheltenham, UK: Edward Elgar. <https://doi.org/10.4337/9780857931023.00012>

59. Panchal, G., Ganatra, A., Kosta, Y.P., & Panchal, D. (2011). Behaviour Analysis of Multilayer Perceptrons with Multiple Hidden Neurons and Hidden Layers. *International Journal of Computer Theory and Engineering*, 3(2), 332-337. <https://doi.org/10.7763/IJCTE.2011.V3.328>

60. Yang, Y., Li, S., Li, W., & Qu, M. (2018). Power load probability density forecasting using Gaussian process quantile regression. *Applied Energy*, 213, 499-509. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.11.035>

61. Pett, M.A. (2016). *Nonparametric Statistics for Healthcare Research: Statistics for Small Samples and Unusual Distributions (2nd ed.)*. Thousand Oaks, CA: SAGE Publications, Inc.
62. Fedotova, Yu.V. (2022). *Methods of making economic decisions: lecture notes (for students of the first (bachelor) level of higher education of full-time, correspondence and distance learning in the specialty 051 – Economics)*. Kharkiv: O.M. Beketov National University in Urban Economy in Kharkiv
63. Bedi, J., & Toshniwal, D. (2019). Deep learning framework to forecast electricity demand. *Appl. Energy*, 238, 1312–1326. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.113>
64. Al-Bakri, A.Y., & Sazid, M. (2021). Application of Artificial Neural Network (ANN) for Prediction and Optimization of Blast-Enduced Impacts. *Mining*, 1(3), 315-334, <https://doi.org/10.3390/mining1030020>
65. Zahid, N., Ahmed, F., Javaid, N., Abbasi, R.A., ..., & Ilahi, M. (2019). Electricity price and load forecasting using enhanced convolutional neural network and enhanced support vector regression in smart grids. *Electronics* 8(2), 122. <https://doi.org/10.3390/electronics8020122>
66. Mohammed, N.A., & Al-Bazi, A. (2021). An adaptive backpropagation algorithm for long-term electricity load forecasting. *Neural Comput. Appl.* 34(1), 477–49. <https://doi.org/10.1007/s00521-021-06384-x>
67. Alwosheel, A., van Cranenburgh, S., & Chorus, C.G. (2018). Is your dataset big enough? Sample size requirements when using artificial neural networks for discrete choice analysis. *Journal of Choice Modelling*, 28, 167-182. <https://doi.org/10.1016/j.jocm.2018.07.002>
68. Feng, S., Zhou, H., & Dong, H. (2019). Using deep neural network with small dataset to predict material defects. *Materials & Design*, 162, 300-310. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.11.060>
69. Pasini, A. (2015). Artificial neural networks for small dataset analysis. *Journal of Thoracic Disease*, 7(5), 953-960. <https://doi.org/10.3978/j.issn.2072-1439.2015.04.61>

70. Allen, P., McKelvey, B., & Maguire, S. (2011). *The SAGE Handbook of Complexity and Management*. London, UK: Sage. <http://digital.casalini.it/9781446209745>

71. Levin, S., Xepapadeas, T., Crépin, A., Norberg, J., De Zeeuw, A., Folke, C., ..., & Walker, B. (2013). Social-ecological systems as complex adaptive systems: Modeling and policy implications. *Environment and Development Economics*, 18(2), 111-132. <https://doi.org/10.1017/S1355770X12000460>

72. Narendra, K.S., & Annaswamy, A.M. (2005). *Stable Adaptive Systems*. Mineola, NY: Dover Publications

73. Project Management Institute. (2008). *The Standard for Program Management (2th ed.)*. Atlanta, GA: Project Management Institute. <https://www.pmi.org/>.

74. Cherepanska, I. Yu., Kyrylovych, V.A., Sazonov, A.Yu., & Samotokin, B.B. (2015). *Планування, моделювання та верифікація процесів в гнучких виробничих системах. Практикум [Planning, modeling and verification of processes in flexible production systems. Practicum]*. Zhytomyr, Ukraine: Zhytomyr State Technical University. https://learn.ztu.edu.ua/pluginfile.php/284674/mod_resource/content/1/%D0%9F%D0%BB%2C%D0%9C%D0%B4%20%D1%82%D0%B0%20%D0%92%D1%84.%D0%BF%D1%80%20%D0%B2%20%D0%93%D0%92%D0%A1_%D1%82%D0%B5%D0%BA%D1%81%D1%82_%D0%A3%D0%9A%D0%A0.pdf

75. Techtarget (n.d.). *Definition: data set*. Techtarget. Retrieved June, 25, 2023, from <https://www.techtarget.com/whatis/definition/data-set>

76. Державні будівельні норми України. Теплові мережі [State construction norms of Ukraine. Heat Networks], DBN-V.2.5-39:2008. (2009). <https://document.vobu.ua/wp-content/uploads/DBN/96.1.-DBN-V.2.5-392008.-Inzhenerne-obladnannya-budinkiv-i.pdf>

77. Державні будівельні норми України. Котельні [State construction norms of Ukraine. Boiler Houses], DBN-V.2.5-77:2014 (2014). <https://antifire.ua/dbn/18.pdf?cultureKey=ua&q=dbn/18.pdf>

78. Державні будівельні норми України. Зовнішні мережі гарячого водопостачання і водяного опалення з використанням труб із структурованого

поліетилену з тепловою ізоляцією зі спіненого поліетилену і захисною гофрованою поліетиленовою оболонкою [State construction norms of Ukraine. External networks of hot water supply and water heating using pipes made of structured polyethylene with thermal insulation of foamed polyethylene and a protective corrugated polyethylene sheath], DBN-V.2.5.22-2002 (2002). https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3082845730067449318?doc_type=2

79. Санитарные нормы и правила. Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов [Sanitary norms and rules. Heat isolation of equipment and pipelines], SNiP 2.04.14-88* (1988). <https://tradeizol.com.ua/sites/default/files/2snip-2.04.14-88.pdf>

80. Shkliar, V.I., & Dubrovska, V.V. (2014). *Розрахунок викидів забруднюючих речовин при спалюванні палива: Методичні рекомендації до виконання розрахункової роботи [Calculation of pollutants emissions during fuel combustion: Methodological recommendations for performing calculation work]*. Kyiv: NTUU KPI. <https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/28310/1/VYKYDY-RR.pdf>

81. The National Commission, which carries out state regulation in the spheres of energy and communal services (n.d.). Інформація про тарифоутворення на теплову енергію [Information for tariff formation on thermal energy]. The National Commission, which carries out state regulation in the spheres of energy and communal services. Retrieved June, 20, 2023, from <https://www.nerc.gov.ua/sferi-diyalnosti/teplo/naselennya/teplova-energiya/tarifi-na-teplovu-energiyu-dlya-naselennya/informaciya-pro-tarifoutvorennya-na-teplovu-energiyu>

82. Методика визначення витрат та втрат паливно-енергетичних ресурсів для врахування в тарифах на теплову енергію, її виробництво, транспортування та постачання [Methodology for determining costs and losses of fuel and energy resources for consideration in tariffs for thermal energy, its production, transportation and supply], v1188874-22 (2022). <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v1188874-22#Text>

83. Pysmennyi, Ye.V., Marynenko, V.I., & Vasechko, O.O. (2016). *Методичні вказівки до виконання курсового проекту з дисципліни «Допоміжні системи котлів і реакторів» для студентів спеціальності 142 «Енергетичне*

машинобудування» спеціалізації «Тепло- і парогенеруючі установки» [Methodological instructions for the implementation of a course project in the discipline “Auxiliary systems of boilers and reactors” for students of the specialty 142 “Energy engineering” specialization “Heat and steam generating plants”]. Kyiv: NTUU KPI. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/27553>

84. Boltianska, N.I. (2019). *Надійність технологічних систем: посібник-практикум [Reliability of technological systems: practical manual]. Melitopol: Publishing and printing center “Lux”. <http://elar.tsatu.edu.ua/handle/123456789/9179>*

85. Obodovych, O.M., Sydorenko, V.V., Bulii, Yu.V., & Stepanova, O.Ye. (2023). wastewater treatment of thermal power plants (TPP). *Heat physics and heat energy*, 45(2), 69-76. <https://doi.org/10.31472/tpe.2.2023.8>

ДОДАТКИ

Додаток А. Список публікацій здобувача за темою дисертації

1. Kadykova, I., Khvostichenko V., & Khudiakov, I. (2020). Application of convergent approach in strategic project management. *Herald of Advanced Information Technology*, 3(2), 83-94. <http://dspace.opu.ua/jspui/handle/123456789/10799>
2. Khudiakov, I., & Sukhonos, M. (2021). Adaptive approach to engineering infrastructure reconstruction program and project management. *Development management*, 19(4), 17-26. [https://doi.org/10.57111/devt.19\(4\).2021.17-26](https://doi.org/10.57111/devt.19(4).2021.17-26)
3. Sukhonos, M., Babaiev, V., Pliuhin, V., Teterev, V., & Khudiakov, I. (2022). Load Forecasting and Electricity Consumption by Regression Model. In: Arsenyeva, O., Romanova, T., Sukhonos, M., Tsegelnyk, Y. (Eds.) *Smart Technologies in Urban Engineering. STUE 2022. Lecture Notes in Networks and Systems*, vol 536, 302-314. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-20141-7_28
4. Pliuhin, V., Petrenko, O., Tsegelnyk, Y., & Khudiakov, I. (2022). Optimization of output parameters of electromechanical energy converters with a solid rotor in Ansys RMXprt. *Lighting Engineering & Power Engineering*, 63(3), 1 – 8. <https://doi.org/10.33042/2079-424X.2022.61.3.01>
5. Teterev, V., & Khudiakov, I. (2022). Simulation of a Hybrid Solar Power Plant with a Hydrogen Generator in MATLAB/Simulink Environment. *Lighting Engineering & Power Engineering*, 61(2), 30-48. <https://doi.org/10.33042/2079-424X.2022.61.2.01>
6. Khudiakov I., & Sukhonos M. (2023). An adaptive decision-making support model in the management of engineering infrastructure reconstruction programs and projects. *Municipal Economy of Cities*, 4(178), 2–9. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2023-4-178-2-9>
7. Khudiakov, I. (2023). Formation of components of an adaptive decision-making support means components in engineering infrastructure reconstruction programs management. *Lighting Engineering & Power Engineering*, 61(1), 12-16. <https://doi.org/10.33042/2079-424X.2023.62.1.02>

8. Khudiakov, I. (2023). The decision-making method in the management of engineering infrastructure reconstruction programs using an adaptive decision support model. *Lighting Engineering & Power Engineering*, 62(2), 38-45. <https://doi.org/10.33042/2079-424X.2023.62.2.01>

9. Khudiakov, I. (2020). Адаптивна модель управління програмами з енергоефективності на промислових підприємствах [Adaptive management model of energy efficiency programs at industrial enterprises]. In: Drozdenko, O., Shabelnyk, Yu. (eds.) *Informatics, mathematics, automation IMA :: 2020. Materials and program of the international scientific and technical conference of students and young scientists*, (p. 173). Sumy: Sumy state university. <https://er.chdtu.edu.ua/bitstream/ChSTU/1526/1/IMA-2020.pdf>

10. Khudiakov, I., Sukhonos, M., Pliuhin, V., & Iliencko, O. (2020). Adaptive model of energy efficiency programs management at industrial enterprises. In: Sukhonos, M., Iliencko, O., Krohmal, A., Zubenko, S., Anisenko, O. (eds.) *Young Researchers in the Global World : Vistas and Challenges : Book of papers of the 2020 International Forum for Young Researchers*, (pp. 136-138). Kharkiv: O.M. Beketov NUUE in Kharkiv. https://science.kname.edu.ua/images/dok/konferentsii/2020konf/_25.pdf

11. Khudiakov, I., Sukhonos, M., & Pliuhin, V. (2020). Місце штучного інтелекту в концепції систем прийняття рішень [Place of artificial intelligence in the decision support systems concept]. In: Sukhonos, M., Starostina, A., Vershynina, D., Hovorova, K. (eds.) *Prospects for the development of territories: theory and practice: materials of the All-Ukrainian scientific and practical conference of students of higher education and young scientists, Kharkiv, November 19-20, 2020* (pp. 489-491). Kharkiv: O.M. Beketov NUUE in Kharkiv. <https://science.kname.edu.ua/images/dok/konferentsii/2020konf/2020-1--7-.pdf>

Додаток Б. Відомості про апробацію результатів дисертації

1. Міжнародна науково-технічна конференція «Інформатика, Автоматизація, Математика». (м. Суми, 20-24 квітня 2020 р.), дистанційно;
2. Міжнародний форум «International Forum for Young Researchers». (м. Харків, 25 вересня 2020 р.), дистанційно;
3. Всеукраїнська науково-практична конференція здобувачів вищої освіти і молодих учених «Перспективи розвитку територій: теорія і практика». (м. Харків, 19-20 листопада 2020 р.), очно;
4. Міжнародна конференція «Smart Technologies in Urban Engineering». (м. Харків, 9-11 червня 2022 р.), дистанційно.

Додаток В. Акти впровадження результатів дисертаційної роботи



**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ
УКРАЇНИ**

**ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА
імені О. М. Бекетова**

61002, м. Харків, вул. Маршала Бажанова, 17,
Тел. (057) 706-15-37, факс (057) 706-15-54
E-mail: office@kname.edu.ua,
Код ЕДРПОУ 02071151

**MINISTRY OF EDUCATION AND
SCIENCE OF UKRAINE**

**O. M. BEKETOV NATIONAL UNIVERSITY
OF URBAN ECONOMY
IN KHARKIV**

17, Marshala Bazhanova Street, Kharkiv 61002
tel. (057) 706-15-37, fax (057) 706-15-54
E-mail: office@kname.edu.ua,
EDRPOU code 02071151

Від _____ № _____

На № _____ від _____



АКТ

впровадження (використання) результатів
дисертаційного дослідження **Худякова Іллі Олександровича**
на тему «**Моделі і методи підтримки прийняття рішень при управлінні
програмами з реконструкції інженерної інфраструктури**» у навчальний
процес

Комісія у складі: голова комісії – к.т.н., доц. Рославцев Д.М.; члени комісії д.т.н., доц. Гусева Ю.Ю., к.т.н. доц. Скачков О.М. встановила впровадження в навчальний процес результатів дисертаційного дослідження Худякова І.О. на тему «Моделі і методи підтримки прийняття рішень при управлінні програмами з реконструкції інженерної інфраструктури» та місце їх використання: основні наукові положення, висновки та рекомендації дослідження використано у методичному забезпеченні навчального процесу на кафедрі Управління проектами в міському господарстві і будівництві при викладанні дисциплін «Міські проєкти і програми», «Інформаційні системи та наукові дослідження в управлінні проектною організацією» за спеціальністю 122 Комп'ютерні науки.

Голова комісії:




(підпис)


Д.М.Рославцев

(ініціали та прізвище)

Члени комісії:



(підпис)



(підпис)

Ю.Ю.Гусева

(ініціали та прізвище)

О.М.Скачков

(ініціали та прізвище)



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ
УКРАЇНИ

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА
імені О. М. Бекетова

61002, м. Харків, вул. Маршала Бажанова, 17,
Тел. (057) 706-15-37, факс (057) 706-15-54
E-mail: office@kname.edu.ua,
Код ЕДРПОУ 02071151

MINISTRY OF EDUCATION AND
SCIENCE OF UKRAINE

O. M. BEKETOV NATIONAL UNIVERSITY
OF URBAN ECONOMY
IN KHARKIV

17, Marshala Bazhanova Street, Kharkiv 61002
tel. (057) 706-15-37, fax (057) 706-15-54
E-mail: office@kname.edu.ua,
EDRPOU code 02071151

Від _____ № _____

На № _____ від _____

ДОВІДКА

про впровадження в науковий процес результатів дисертаційної роботи
Худякова Іллі Олександровича за темою
«МОДЕЛІ І МЕТОДИ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ПРИ
УПРАВЛІННІ ПРОГРАМАМИ З РЕКОНСТРУКЦІЇ ІНЖЕНЕРНОЇ
ІНФРАСТРУКТУРИ»

Ректорат Харківського національного університету міського господарства імені О.М. Бекетова підтверджує впровадження результатів дисертаційного дослідження Худякова І.О. за темою «Моделі і методи підтримки прийняття рішень при управлінні програмами з реконструкції інженерної інфраструктури» у науковий процес університету.

Результати дисертаційної роботи використовувались при виконанні наукової роботи, науково-технічного та інфраструктурного проекту «Розробка інтелектуальної енергоефективної системи централізованого теплопостачання з інтеграцією відновлювальних джерел енергії», який фінансується за рахунок зовнішнього інструменту допомоги Європейського Союзу для виконання зобов'язань України у Рамковій програмі Європейського Союзу з наукових досліджень та інновацій «Горизонт 2020», який є частиною Загального плану науково-дослідної роботи Харківського національного університету міського господарства імені О.М.Бекетова (номер державної реєстрації: 0123U102775). Внесок здобувача полягає у розробці концептуальних засад моделі та методики для визначення оптимального вибору обладнання для індивідуальних теплових пунктів з відновлювальними джерелами енергії.

Ректор ХНУМГ ім. О.М. Бекетова

Володимир БАБАЄВ

«14» вересня 2023р.





Приватне підприємство «Донком»
 Ідентифікаційний код ЄДРПОУ 33817335
 тел./факс: (057) 754-30-20, 754-30-40
<https://www.doncom.com.u>

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор

Приватного підприємства «Донком»

_____ В.А. Голубенко

«16» _____ 2023 р.

АКТ

використання результатів дисертаційної роботи Худякова Іллі Олександровича на тему «Моделі і методи підтримки прийняття рішень при управлінні програмами з реконструкції інженерної інфраструктури», виконаної на кафедрі Управління проектами в міському господарстві та будівництві Харківського національного університету міського господарства імені О.М. Бекетова

Комісія у складі: голова комісії –
 _____; члени комісії –

підтверджують факт впровадження результатів дисертаційної роботи Худякова І.О. у програмну діяльність підприємства, а саме:

- метод прийняття рішень з використанням моделі підтримки прийняття рішень «HeatOptiGuide», розроблений у ході виконання дисертаційного дослідження, було використано у реалізації програми з реконструкції об'єктів генерування теплової енергії району міста Харкова

- застосування даного методу дозволило скоротити плановані терміни реалізації програми за рахунок скорочення резервного часу робіт проектів на 39%.

Голова комісії:



(підпис)

В. А. Коваленко
(ініціали та прізвище)

Члени комісії:

(підпис)

(підпис)

А. І. Мельник
(ініціали та прізвище)

С. В. Коваленко
(ініціали та прізвище)