

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ІНСТИТУТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ І ГЛОБАЛЬНОГО ІНФОРМАЦІЙНОГО  
ПРОСТОРУ

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**Дякон Дмитро Валерійович**

УДК 004.5:004.6:004.89:007.51

**ДИСЕРТАЦІЯ**

**ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ МОДЕЛЮВАННЯ СТАЛОГО  
РОЗВИТКУ ЛОКАЛЬНИХ СОЦІАЛЬНО-ЕКОНОМІЧНИХ СИСТЕМ**

122 – «Комп'ютерні науки»

Галузь знань 12 – Інформаційні технології

Подається на здобуття ступеня доктора філософії

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

Д. В. Дякон

Науковий керівник:  
Присянкіна-Жарова Тетяна Іванівна  
доктор технічних наук, доцент

Київ – 2026

## АНОТАЦІЯ

Дякон Д. В. Інформаційна технологія моделювання сталого розвитку локальних соціально-економічних систем. - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 122 «Комп'ютерні науки» – Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національна академія наук України, Київ, 2026.

У дисертаційній роботі розв'язано актуальне науково-практичне завдання створення інформаційної технології моделювання сталого розвитку локальних соціально-економічних систем, основу якої складають розроблені математичні моделі та їх ансамблі, методи інтелектуального аналізу даних, алгоритми машинного навчання, сценарії, використання якої сприятиме цифровізації публічного управління.

**У вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, її наукову та практичну значущість. Представлено зв'язок роботи з актуальними напрямками розроблення інформаційних технологій, зокрема, в сфері цифрової трансформації публічного управління, тематикою науково-дослідних робіт Інституту,. Сформульовано мету та задачі дослідження, розкрито наукову новизну та практичну цінність розробки. Значну увагу приділено аналізу робіт, у яких розглянуті питання цифровізації публічного управління, удосконаленню його інформаційно-аналітичного забезпечення, в тому числі, для підтримки прийняття рішень щодо забезпечення сталого розвитку на місцевому рівні. Представлено методи дослідження, застосовувані для розв'язання завдань роботи. Сформульовано наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, вказано особистий внесок здобувача.

**У першому розділі** представлено результати огляду інформаційних джерел за темою роботи. Встановлено, що задачі інформатизації, цифрової трансформації публічного управління, місцевого самоврядування є важливим

інструментом сталого розвитку, забезпечення згуртованості та спроможності територіальних громад. Відзначено, що значну роль у подоланні загроз та викликів в умовах ресурсних обмежень та невизначеності, відіграла активізація самоорганізації та кооперації на місцевому рівні, що сприяло утворенню локальних соціально-економічних систем – специфічних просторових утворень, метою яких є спільне використання наявних ресурсів задля вирішення задач інвестиційного забезпечення, економічного розвитку, соціального забезпечення, тощо. Їх розвиток є складним багаторівневим процесом, у якому економічні, соціальні, екологічні та управлінські складові перебувають у щільній взаємодії, утворюючи синергетичний ефект. Такі системи характеризуються високою динамічністю, мінливістю структури, наявністю складних нелінійних зв'язків між економічною, соціальною, екологічною, управлінською та інфраструктурною підсистемами. Тому, актуальною задачею є обґрунтування їх складу та галузевої структури, визначення пріоритетів та перспектив функціонування, зокрема, в контексті забезпечення сталого розвитку.

Систематизовано основні концептуальні моделі сталого розвитку, зокрема розглянуто трикомпонентну модель та інтегровану моделі. Показано, що трикомпонентна модель характеризується концептуальною простотою та універсальністю, однак обмежена у відображенні динамічних процесів, тоді як інтегрована модель забезпечує можливість врахування міжкомпонентних взаємозв'язків, сценарного аналізу та адаптивного управління розвитком

Сформовано методологічну базу дослідження, яка поєднує системний аналіз, математичне моделювання, сучасні підходи до розроблення інформаційних технологій та систем підтримки прийняття рішень.

Обґрунтовано необхідність розроблення сучасних інформаційних технологій та методик моделювання сталого розвитку соціально-економічних систем в умовах невизначеності, адаптованих до використання у системі публічного управління та місцевого самоврядування.

Виконано постановку задач дисертаційного дослідження.

**У другому розділі** сформовано методологічну основу моделювання розвитку локальних соціально-економічних систем (ЛСЕС) в умовах невизначеності. Проаналізовано основні види невизначеності, характерні для місцевого рівня національної соціально-економічної системи, причини їх виникнення та методичні підходи до їх розкриття у задачах підтримки прийняття рішень в управлінні розвитком ЛСЕС. Встановлено, що не використаним залишається потенціал спільної взаємодії, який може бути реалізовано у рамках ЛСЕС. Встановлено, що потребує вирішення задача формування складу та галузевої структури ЛСЕС, який би забезпечував не лише позитивну динаміку, а й досягнення цілей сталого розвитку. Тому, важливо проаналізувати не лише поточний стан громад-кандидатів, виявити їх сильні та слабкі сторони, а й оцінити перспективи їх взаємодії в складі ЛСЕС, потенційну можливість досягнення цілей сталого розвитку, запропонувати варіанти ЛСЕС, забезпечити прийняття обґрунтованих рішень. Для розв'язання цієї задачі запропоновано використовувати підхід до моделювання сталого розвитку ЛСЕС на основі інтеграції класичних, байєсівських, марковських і нейромережевих підходів. Розроблено методику моделювання сталого розвитку ЛСЕС, яка може бути реалізована у відповідній інформаційній технології

**У третьому розділі** розроблено інформаційну технологію моделювання сталого розвитку ЛСЕС, яка інтегрує сучасні підходи до збору та попереднього оброблення даних, застосування машинного навчання, математичного моделювання та підтримки прийняття рішень у єдину узгоджену архітектуру. Запропонована технологія орієнтована на комплексну обробку даних, формування аналітичних моделей, оцінювання невизначеності та ризиків, а також генерацію обґрунтованих управлінських рішень. У межах дослідження сформовано концептуальну схему інформаційної технології, яка відображає логіку трансформації даних у знання та рішення, Визначено ключові функціональні підсистеми, зокрема збору та оброблення даних, побудови математичних моделей, оцінювання ризиків, побудови прогнозів та сценаріїв.

Запропонована інформаційна технологія забезпечує підвищення точності прогнозування, врахування складних нелінійних і стохастичних залежностей, структурних змін, а також створює надійну основу для підтримки прийняття обґрунтованих управлінських рішень у задачах моделювання сталого розвитку ЛСЕС. Реалізоване відповідне програмне забезпечення.

**У четвертому розділі** представлені приклади практичного застосування розробленої інформаційної технології моделювання різних пріоритетів сталого розвитку в контексті ЛСЕС.

Розроблена інформаційна технологія застосована для розв'язання задачі моделювання динаміки соціальної складової сталого розвитку ЛСЕС.

Для проектування галузевої структури ЛСЕС розглянуто застосування методики використання ланцюгів Маркова. Перевагою такого підходу є те, що за відсутності повної інформації про попередній стан і динаміку системи, використання даного підходу дозволяє визначити перспективну галузеву структуру економіки, врахувати вигоди від кооперації та спеціалізації виробництва у громадах та районах. Це створює основу для розробки стратегій і планів розвитку ЛСЕС, забезпечуючи узгодження цілей в контексті забезпечення сталого розвитку. В рамках формування галузевої та територіальної структури ЛСЕС, для узгодження обміну ресурсами, використання інфраструктури, тощо, застосовано методику, основу якої становлять марківські моделі систем масового обслуговування (марківського процесу), що дало можливість скоординувати обмін ресурсами: виробничими, трудовими, інвестиційними, узгодити спільне використання соціальної та транспортної інфраструктури у ЛСЕС.

Іншою задачею, як розв'язується за використання розробленої інформаційної технології є задача оптимізації надання адміністративних послуг. Для визначення оптимальної стратегії керування системою обслуговування клієнтів, представленою у вигляді керованої марковської системи масового обслуговування, використано ітераційний метод покращення політики (метод

Ховарда), що дало можливість визначити перспективи розвитку мережі центрів обслуговування населення, забезпечивши їх раціональне функціонування.

Окрему увагу приділено моделюванню екологічної складової сталого розвитку, зокрема аналізу забруднення NO<sub>2</sub>, що особливо актуально в умовах війни. Розроблена методика моделювання передбачає використання геоданих, зокрема, супутникових знімків, що дало можливість забезпечити високу точність прогнозу та наочність результатів.

Запропоновані моделі, методи та алгоритми можуть бути використані для розв'язання широкого кола задач управління регіональним розвитком, зокрема в системах підтримки прийняття рішень органів державного та публічного управління, місцевого самоврядування. Їх застосування сприяє підвищенню обґрунтованості програм розвитку, створює передумови до формуванню виробничих кластерів і підвищенню ефективності спільного використання ресурсного потенціалу територій.

Використання розробленої інформаційної технології можливе як у складі існуючих інформаційно-аналітичних систем, так в якості самостійного аналітичного інструменту.

Результати роботи впроваджені у діяльність виконкому Уманської міської ради у процесі розроблення пропозицій щодо цифровізації роботи відділу економічного розвитку, інфраструктури та житлово-комунального господарства, а також у процесі підтримки прийняття рішень при розробленні Прогнозу бюджету уманської міської територіальної громади на 2026-2027 рр. та підготовці пропозицій щодо розвитку підприємництва Умані. А також – у навчальний процес Уманського національного університету.

**Ключові слова:** інформаційна технологія, оброблення даних, локальна соціально-економічна система, Марківські моделі, мережі Байєса, сталий розвиток, система підтримки прийняття рішень, машинне навчання

## ABSTRACT

Dyakon, D. V. Information Technology for Modeling the Sustainable Development of Local Socio-Economic Systems. – Qualifying scientific thesis in manuscript form.

Doctoral dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in the specialty 122 “Computer Science” – Institute of Telecommunications and Global Information Space, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2026.

The dissertation addresses the pressing scientific and practical task of creating information technology for modeling the sustainable development of local socio-economic systems, based on developed mathematical models and their ensembles, methods of intelligent data analysis, machine learning algorithms, and scenarios, the use of which will contribute to the digitalization of public administration.

**The introduction** justifies the relevance of the dissertation’s topic, as well as its scientific and practical significance. It outlines the connection between this work and current trends in information technology development, particularly in the field of digital transformation of public administration, and the research topics of the Institute. The aim and objectives of the study are formulated, and the scientific novelty and practical value of the work are highlighted. Significant attention is paid to the analysis of works that address issues of the digitalization of public administration and the improvement of its information and analytical support, including for decision-making to ensure sustainable development at the local level. The research methods used to address the study’s objectives are presented. The scientific novelty and practical significance of the results obtained are formulated, and the applicant’s personal contribution is indicated.

**The first chapter** presents the results of a review of information sources related to the topic of this study. It has been established that the tasks of informatization and digital transformation in public administration and local self-government are important tools for sustainable development and for ensuring the cohesion and capacity of local communities. It is noted that the intensification of self-organization and cooperation at

the local level played a significant role in overcoming threats and challenges amid resource constraints and uncertainty, contributing to the formation of local socio-economic systems —specific spatial entities aimed at the joint use of available resources to address issues of investment support, economic development, social welfare, and so on. Their development is a complex, multi-level process in which economic, social, environmental, and managerial components interact closely, creating a synergistic effect. Such systems are characterized by high dynamism, structural variability, and the presence of complex nonlinear relationships between economic, social, environmental, managerial, and infrastructural subsystems. Therefore, a pressing task is to substantiate their composition and sectoral structure, and to determine priorities and prospects for their functioning, particularly in the context of ensuring sustainable development.

The main conceptual models of sustainable development are systematized; in particular, the three-component model and the integrated model are examined. It is shown that the three-component model is characterized by conceptual simplicity and universality, but is limited in its ability to reflect dynamic processes, whereas the integrated model allows for the consideration of inter-component relationships, scenario analysis, and adaptive development management

A methodological framework for the study has been developed, combining systems analysis, mathematical modeling, and modern approaches to the development of information technologies and decision support systems.

The necessity of developing modern information technologies and methods for modeling the sustainable development of socio-economic systems under conditions of uncertainty, adapted for use in the system of public administration and local self-government, has been substantiated.

The research goals of the dissertation have been formulated

The second section forms a methodological basis for modeling the development of local socio-economic systems (LSES) under conditions of uncertainty. The main types of uncertainty characteristic of the local level of the national socio-economic system are analyzed, the reasons for their occurrence and methodological approaches

to their disclosure in the tasks of supporting decision-making in managing the development of the LSES. It is established that the potential for joint interaction remains unused, which can be implemented within the framework of the LSES. It is established that the task of forming the composition and sectoral structure of the LSES, which would ensure not only positive dynamics, but also the achievement of sustainable development goals, requires a solution

Therefore, it is important to analyze not only the current state of candidate communities, identify their strengths and weaknesses, but also to assess the prospects for their interaction within the LSES, the potential for achieving sustainable development goals, propose LSES options, and ensure the adoption of informed decisions. To solve this problem, it is proposed to use an approach to modeling the sustainable development of LSES based on the integration of classical, Bayesian, Markov and neural network approaches. A methodology for modeling the sustainable development of LSES has been developed, which can be implemented in the appropriate information technology.

The third chapter presents an information technology for modeling the sustainable development of the LSES, which integrates modern approaches to data collection and preprocessing, the application of machine learning, mathematical modeling, and decision support into a single, coherent architecture. The proposed technology is focused on comprehensive data processing, the creation of analytical models, the assessment of uncertainty and risks, as well as the generation of well-founded management decisions. Within the scope of the study, a conceptual diagram of the information technology was developed, reflecting the logic of transforming data into knowledge and decisions. Key functional subsystems were identified, including data collection and processing, mathematical modeling, risk assessment, and the development of forecasts and scenarios.

The proposed information technology ensures improved forecasting accuracy, accounts for complex nonlinear and stochastic dependencies and structural changes, and creates a reliable foundation for supporting informed management decisions in

modeling the sustainable development of the LSE. Appropriate software has been implemented.

Chapter 4 presents examples of the practical application of the developed information technology for modeling various sustainable development priorities in the context of the LSES.

The developed information technology was applied to solve the problem of modeling the dynamics of the social component of the LSES's sustainable development.

To design the sectoral structure of the LSES, the application of the Markov chain methodology is considered. The advantage of this approach is that, in the absence of complete information about the initial state and dynamics of the system, it allows for determining the prospective sectoral structure of the economy and accounting for the benefits of cooperation and production specialization within communities and regions. This creates a basis for developing strategies and plans for the development of the LSES, ensuring the alignment of goals in the context of sustainable development. As part of the formation of the sectoral and territorial structure of the LSES, to coordinate the exchange of resources, the use of infrastructure, etc., a methodology was applied based on Markov models of queuing systems (Markov process), which made it possible to coordinate the exchange of resources—production, labor, and investment—and to coordinate the shared use of social and transportation infrastructure within the LSES.

Another problem addressed by the developed information technology is the optimization of administrative service delivery. To determine the optimal strategy for managing the customer service system, represented as a controlled Markovian queuing system, the iterative policy improvement method (Howard's method) was used, which made it possible to identify prospects for the development of a network of public service centers, ensuring their efficient operation.

Special attention was paid to modeling the environmental component of sustainable development, in particular the analysis of NO<sub>2</sub> pollution, which is particularly relevant in wartime conditions. The developed modeling methodology

involves the use of geodata, specifically satellite imagery, which made it possible to ensure high forecast accuracy and the clarity of results.

The proposed models, methods, and algorithms can be used to address a wide range of regional development management issues, particularly in decision-support systems for government and public administration bodies, as well as local self-government. Their application contributes to improving the soundness of development programs, creates the conditions for the formation of industrial clusters, and enhances the efficiency of the joint use of territorial resource potential.

The developed information technology can be used both as part of existing information and analytical systems and as a standalone analytical tool.

The results of this work have been implemented in the activities of the Executive Committee of the Uman City Council during the development of proposals for the digitalization of the Department of Economic Development, Infrastructure, and Housing and Utilities, as well as in the decision-making process for drafting the budget forecast for the Uman city territorial community for 2026–2027 and in the preparation of proposals for the development of entrepreneurship in Uman. It has also been incorporated into the educational process at Uman National University.

**Keywords:** information technology, data processing, local socio-economic system, Markov models, Bayesian networks, sustainable development, decision support system, machine learning

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

**Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації**

**Публікації у фахових виданнях України:**

1. Пашко А., Дякон Д. Застосування ланцюгів Маркова для розроблення сценаріїв розвитку локальних соціально-економічних систем. *Електронне фахове наукове видання «Кібербезпека: освіта, наука, техніка»*, 2025. Том. 3. №31, С.559–569.

<https://doi.org/10.28925/2663-4023.2025.31.1039>

*Автором розроблено методуку застосування ланцюгів Маркова у сценаріях формування ЛСЕС, зокрема, визначення оптимальної галузевої структури, алгоритм побудови матриці переходів з використанням індикаторів соціально-економічного розвитку, обґрунтовано їх використання у розробленій інформаційній технології.*

2. Шолохов О. В., Дякон Д. В. Застосування марковської моделі у інформаційній технології формування локальної соціально-економічної системи. *Екологічна безпека та природокористування*, 2025. Вип. 4. № 56. С. 186-200.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.4.186-200>

*Автором розроблено інформаційну технологію обґрунтування рішень щодо формування ЛСЕС, основу якої становить математична модель системи масового обслуговування, яка моделює взаємодію між елементами системи, зокрема обмін ресурсами: виробничими, трудовими, інвестиційними та використання соціальної та транспортної інфраструктури*

**Публікації у виданнях, що входять до міжнародних науково-метричних баз:**

3. Bidiuk P., Prosyankina-Zharova T., Diakon V., Diakon D. The improvement of the intelligent decision support system for forecasting non-linear non-stationary processes. *Technology Audit and Production Reserves*, 2023. Vol. 4. № 2(72). P. 37–46.

<https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.286516> (Scopus)

*Автором узагальнено підходи до опрацювання невизначеностей, характерних для соціально-економічних систем, запропоновано методику збору та підготовки даних до моделювання нелінійних нестационарних процесів розвитку соціально-економічних систем.*

**Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:**

4. Дякон Д. В., Просянкіна-Жарова Т. І. Проблеми застосування інформаційних технологій у міжвідомчій співпраці в сфері реагування на різні загрози й надзвичайні ситуації. *Інформаційно-комунікаційні технології та сталий розвиток* // Колективна монографія за матеріалами XXI Міжнародної науково-практичної конференції (Київ, 14-16 листопада 2022 р.) / За заг. ред. С.О. Довгого. – К.: ТОВ «Видавництво «Юстон», 2022. С. 107-110. [https://itgip.org/wp-content/uploads/2022/12/2022-12-06\\_UDK\\_book\\_Monografia\\_48x210.pdf](https://itgip.org/wp-content/uploads/2022/12/2022-12-06_UDK_book_Monografia_48x210.pdf)

*Автором досліджено проблему застосування інформаційних технологій у процесі реагування на загрози та надзвичайні ситуації, запропоновано підходи до організації міжвідомчої взаємодії.*

5. Терентьев О. М., Просянкіна-Жарова Т.І., Дякон Д. В. Застосування засобів опрацювання неструктурованих даних у задачах прогнозного моделювання. *Сучасні інформаційні технології управління екологічною безпекою, природокористуванням, заходами в надзвичайних ситуаціях: виклики 2021 року* // Колективна монографія за матеріалами XX Міжнародної науково-практичної конференції (Київ, 04-08 жовтня 2021 р.) / За заг. ред. С.О. Довгого. – К.: ТОВ «Видавництво «Юстон», 2021. С. 161-168. [https://itgip.org/wp-content/uploads/2021/10/1\\_zbirka\\_2021.pdf](https://itgip.org/wp-content/uploads/2021/10/1_zbirka_2021.pdf)

*Автором розроблено методику використання даних з Інтернет-джерел у задачах аналізу та моделювання розвитку ЛСЕС*

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ	17
ВСТУП	21
РОЗДІЛ 1 МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ РОЗРОБЛЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ СТАЛОГО РОЗВИТКУ ЛОКАЛЬНИХ СОЦІАЛЬНО-ЕКОНОМІЧНИХ СИСТЕМ	
1.1 Локальні соціально-економічні системи як об'єкт інформатизації	32
1.2 Концептуальні засади, принципи, підходи застосовувані для дослідження сталого розвитку ЛСЕС	37
1.3 Методи оцінювання досягнення цілей сталого розвитку на рівні територіальних громад і регіонів	42
1.4 Особливості інформаційної технології збору та оброблення даних для моделювання сталого розвитку в управлінні розвитком ЛСЕС	47
1.5 Постановка задачі дослідження	58
Висновки до розділу 1	59
РОЗДІЛ 2 МЕТОДОЛОГІЯ МОДЕЛЮВАННЯ СТАЛОГО РОЗВИТКУ ЛОКАЛЬНИХ СОЦІАЛЬНО-ЕКОНОМІЧНИХ СИСТЕМ	
2.1 Застосування методології системного аналізу у дослідженні ЛСЕС	62
2.2 Методика моделювання сталого розвитку ЛСЕС в умовах невизначеності	71
2.3 Моделі та методи ідентифікація нелінійності та нестационарності процесів розвитку ЛСЕС	74
2.4 Методологія підготовки даних для моделювання сталого розвитку ЛСЕС	89
2.5 Моделі аналізу динаміки ЛСЕС у задачі забезпечення їх сталого розвитку	103

2.6	Розроблення методики прогнозування сталого розвитку ЛСЕС в умовах невизначеності	110
	Висновки до розділу 2	121
<b>РОЗДІЛ 3 РОЗРОБЛЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ МОДЕЛЮВАННЯ СТАЛОГО РОЗВИТКУ ЛСЕС</b>		
3.1	Концептуальна схема інформаційної технології моделювання сталого розвитку ЛСЕС у контексті використання у відповідній СППР	123
3.2	Проектування підсистеми попереднього оброблення даних	136
3.3	Підсистема побудови математичних моделей	139
3.4	Реалізація прогнозування та сценарного аналізу розвитку ЛСЕС	146
3.5	Реалізація механізмів зменшення невизначеності й оцінювання ризиків у забезпеченні сталого розвитку ЛСЕС	151
	Висновки до розділу	157
<b>РОЗДІЛ 4 ОБЧИСЛЮВАЛЬНІ ЕКСПЕРИМЕНТИ З ВИКОРИСТАННЯМ РОЗРОБЛЕНОЇ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ</b>		
4.1	Інформаційна технологія моделювання сталого розвитку ЛСЕС	159
4.2	Застосування ланцюгів Маркова для розроблення сценаріїв формування ЛСЕС	167
4.3	Моделювання зв'язків між підсистемами ЛСЕС для формування галузевої та територіальної структури ЛСЕС	175
4.4	Моделі СМО у інформаційній технології моделювання реалізації соціальної складової сталого розвитку	185
4.5	Застосування мереж Байеса для моделювання складу ЛСЕС	149
4.6	Моделювання екологічної складової сталого розвитку ЛСЕС	199
	Висновки до розділу 4	210

ВИСНОВКИ	213
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	214
ДОДАТКИ	231
ДОДАТОК А Таблиця А.1	233
ДОДАТОК Б Приклади лістингу кодів варіантів можливої програмної реалізації інформаційної технології	235
ДОДАТОК В Документи, що підтверджують впровадження результатів дисертації...	246

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

Accuracy	частка правильних передбачень
ACF	Autocorrelation Function – автокореляційна функція
ADF-тест	Augmented Dickey-Fuller test - розширений тест Дікі-Фулера
AIC	Akaike Information Criterion - критерій Акайке
API	Application Programming Interface – прикладний програмний інтерфейс
AR	Autoregressive model авторегресійна модель
ARCH	Autoregressive Conditional Heteroskedasticity - Авторегресійна умовна гетероскедастичність
ARIMA	autoregressive integrated moving average – авторегресійне інтегроване ковзне середнє)
BDS-тест	Brock–Dechert–Scheinkman test - Тест Брока–Дечерта–Шейнкмана
BI	Business Intelligence - інтелектуальний аналіз даних, бізнес-аналітика)
BIC	Bayesian Information Criterion - критерій Байєса-Шварца
BSTS	Bayesian Structural Time Series –байєсів структурний часовий ряд
CV	Cross-Validation - Перехресна перевірка
Chow–Lin	Chow-Lin method – метод Чоу-Ліна
CPI	Consumer Price Index індекс споживчих цін
CUSUM	Cumulative SUM — метод кумулятивних сум
CUSUM-SQ	Cumulative Sum of Squares - метод кумулятивних сум квадратів
DBN	Dynamic Bayesian Networks –динамічна мережа Байєса
DBSCAN	Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise - Кластеризація на основі щільності (з урахуванням просторового розподілу та шумів)
DCC	Dynamic Conditional Correlation – динамічна умовна кореляція
DIKW	Data-Information-Knowledge- Wisdom/Decision - Дані-Інформація-Знання-Мудрість/Рішення
DWH	Data Warehouse – сховище даних
IDSS	Intelligent Decision Support Systems- інтелектуальна система підтримки прийняття рішень
EM-алгоритм	Expectation–Maximization algorithm - алгоритм очікування-максимізації
ETL/ELT	Extract Transform Load та ELT Extract Load Transform – витягнення-трансформація, завантаження та витяг завантаження перетворення

F1	F1-Score-F1-міра
GARCH	Autoregressive conditional heteroskedasticity - Авторегресивна умовно гетероскедастична модель
GBFS	General Bikeshare Feed Specification – відкрий стандарт даних в сфері геоінформаційних технологій
GIS,	Геоінформаційна система)
HP-фільтр	Hodrick–Prescott filter фільтр Ходріка-Персона
<a href="#">IoT</a>	дані інтернету речей
IQR	Interquartile Range) міжквартильний розмах
ISM	Integrated Sustainability Model – модель сталого розвитку
kNN	k-Nearest Neighbors Метод найближчих сусідів
KPSS	Kwiatkowski–Phillips–Schmidt–Shin test тест Квятковськи-Філіпс-Шмідт–Шін
LIME	Local Interpretable Model-agnostic Explanations Локально інтерпретовані пояснення
LOESS	LOcal regrESSion - Метод локальних поліноміальних регресій
LSTM/	Long Short-Term Memory- нейронні мережі довгої короткочасної пам'яті
LWZ	Liu–Wu–Zidek критерій
MAD	Median Absolute Deviation - Медіана абсолютних відхилень
MAE	Mean Absolute Error — Середня абсолютна помилка
MAPE	Mean Absolute Percentage Error середня абсолютна відсоткова помилка.
MCDA	Multi-Criteria Decision Analysis Багатокритеріальний аналіз рішень)
MCMC/SMC	Markov chain Monte Carlo –марківські ланцюги/ метод монте-карло
MDP	Markov decision process –марківські процеси вирішування,
MLE	Maximum Likelihood Estimation: метод максимальної правдоподібності
MSM	Markov-switching models Марківські моделі з перемиканням станів
MS-AR	Markov Switching Autoregressive model - Авторегресійна модель з марковськими перемиканнями
NN	Neural Networks - Нейронні мережі
NUTS	Nomenclature of Territorial Units for Statistics - Номенклатура територіальних одиниць для статистики
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development) - Організація економічного співробітництва та розвитку

OLTP	Online Transaction Processing — онлайнова обробка транзакцій
PACF	Partial Autocorrelation Function – часткова автокореляційна функція
PCA	- Principal Component Analysis, метод головних компонент
PLS	- Partial Least Squares Regression Model - регресія часткових метод найменших квадратів
PP	Phillips-Perron test тест Філіпса-Перона
QR	Quantile Regression - квантильна регресія
RESET-тест	Ramsey Regression Specification Error Test , Тест Рамсея
R2	- коефіцієнт детермінації
RNN	Recurrent Neural Network Рекурентна нейронна мережа
RMSE	- Root Mean Square Error - середньоквадратична похибка
ROC-AUC	Area Under ROC Curve — Площа під ROC-кривою
RSS	Residual Sum of Squares залишкова сума квадратів
RTS smoother	Rauch-Tung-Striebel - smoother алгоритм згладжування Раута–Тунга–Стрібеля
SARIMA	Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average - сезонна авторегресія, інтегроване ковзне середнє
SARIMAX	Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average with Exogenous factors - модель авторегресійної інтегрованої ковзної середньої з екзогенними факторами
SBC	- Schwarz Bayesian Criterion критерій Шварца-Байєса
SDG,	Цілі сталого розвитку затверджені ООН
SHAP	SHapley Additive exPlanations Адитивні пояснення Шеплі
SMA	- Simple Moving Average - просте ковзне середнє
SSE	- Sum Square Error - сумарна квадратична похибка
STAR	Smooth Transition Autoregressive - нелінійні моделі часових рядів,
STEPWISE	- методика поетапного включення регресорів
SupF	Sequential SupF tests – послідовний SupF-тест
SWOE	- Smoothed Weight Of Evidence – метод згладженого значення зваженої сукупності
TAR	Arranged Autoregression Test) впорядкований авторегресійний тест, тест Цая
TBL	Triple Bottom Line – «Потрійний критерій»
Threshold	- Метод об'єднання рівнів категоріальних змінних на основі значення порогу
Train/Test Split	Навчальна/Тестова вибірки
TVP	Test Bai–Perron – тест Бай-Перрона

VaR	Value-at-Risk
UNDP	United Nations Development Programme - Програма розвитку ООН
XAI	Explainable AI Пояснюваний штучний інтелект
WOE	- Weight of Evidence – метод врахування статистичної значущості показника
АКФ	- автокореляційна функція
АРКС	- авторегресія із ковзним середнім
БД	- база даних
БМ	- мережа Байєса
ВВП	валовий внутрішній продукт
ВРП	- валовий регіональний продукт
ДМБ	динамічні байєсівські мережі
ІАС	інформаційно-аналітична система
ІТ	- інформаційна технологія
КСС	- кількість ступенів свободи
ЛФК	- логарифмічна функція корисності
ЛСЕС	локальна соціально-економічна система
МАІ	метод аналізу ієрархій
МГК	- метод головних компонент
НКФ	- нелінійна кореляційна функція
НФК	- нелінійна кореляційна функція
ОМД	- опис мінімальною довжиною
ОПР	- особа що приймає рішення
ПК	- персональний комп'ютер
СППР	- система підтримки прийняття рішень
СУБД	- система управління базами даних
ЧАКФ	- часткова автокореляційна функція

## ВСТУП

**Актуальність теми дисертаційного дослідження.** Розвиток соціально-економічних систем всіх рівнів вже протягом тривалого часу відбувається в умовах зростання відкритості, стирання кордонів та меж, поглиблення взаємного впливу різних систем, активної цифровізації суспільства і кліматичних змін. Активізуються механізми кооперації та інтеграції, які стимулюють утворення об'єднань різних типів. Як наслідок – зміна як динаміки, так і структури соціально-економічних систем різних рівнів, формування нових закономірностей та загальних тенденцій розвитку. Дана ситуація характерна й для України. Реформа децентралізації, інтеграція до європейського співтовариства, спричинили кардинальні зміни на місцевому та регіональному рівнях, посиливши інституційну та фінансову спроможність місцевого самоврядування. Реалізація «Державної стратегії регіонального розвитку на 2021-2027 роки» [6], що передбачає наближення державної регіональної політики України до політики згуртованості - ключової політики Європейського Союзу, досягнення цілей сталого розвитку, визначених ООН [7] та відображених у «Цілях сталого розвитку України до 2030 року» [8] набуває сьогодні нового, особливого значення. Потужним кроком на шляху до євроінтеграції є цифрова трансформація регіонів та громад. За даними Міністерства цифрової трансформації України, станом на 1-й квартал 2025 року [9] середній по регіонам показник індексу цифрової трансформації регіонів України становить більш 40 пунктів, що свідчить про активне впровадження інформаційних технологій роботу органів публічного управління та місцевого самоврядування. Більшість задач Програми інформатизації [10] зосереджена саме на наданні послуг населенню.

Адже ця проблема особливо актуальна для регіонального та місцевого рівнів, які не тільки орієнтовані на взаємодію органів державної влади, місцевого самоврядування, а й працюють у безпосередньому контакті з населенням. Однак, особливо в умовах складної економічної ситуації, військової агресії,

важливо якнайповніше враховувати потреби мешканців, ключові виклики, які впливають на людину, інфраструктуру, безпекове середовище, економіку та навколишнє природне середовище, налагоджувати партнерство та співробітництво, посилювати економічну складову та забезпечувати фінансову спроможність громад. Вирішення цих проблем не можливе без якісного інформаційного та аналітичного забезпечення процесів підтримки прийняття рішень на місцевому та регіональному рівнях, розбудова якого триває. Саме тому тема дослідження є **актуальною, має наукове та практичне значення.**

Проблема розроблення моделей, методів, інформаційних технологій, призначених для підтримки прийняття рішень в управлінні розвитком соціально-економічних систем розкрита в роботах багатьох вітчизняних та закордонних вчених. А саме: П. І. Бідюка, В. О. Васяніна, Х. Вотсона, С. О. Довгого, Ю. І. Калюха, О. Г. Наконечного, О. В. Нестеренка, С. К. Полумієнка, Спрага, О. М. Трофимчука, В. Швейцера (математичне моделювання, технології та системи підтримки прийняття рішень в умовах невизначеності); В. Я. Данилова, М. З. Згуровського, В. С. Михалевича, Н. Д. Панкратової (теорія та прикладні методи системного аналізу), М. Бері, С. Аггарвала, Х. До Прадо, О. В. Копійки, Д. В. Ланде, О. М. Терентьєва (методи інтелектуального аналізу даних); Т. Байєса, В. Гілкса, Ф. Делбанко, Ф. Фиорити, С. Лауритсена, Дж. Перла (основи ймовірнісного підходу); О. П. Гожого, В. А. Лахна, Т. В. Нескородоєвої, В. М. Триснюка, М. О. Цюцюри (інформаційні технології), В. М. Глушкова, Ю. П. Зайченка, О. О. Кряжич, В. І. Литвиненка (системи та методи штучного інтелекту) та інших.

**Цілі роботи** полягають у розробці нової інформаційної технології на основі поєднання сучасних методів збору, накопичення та оброблення даних, різних методів моделювання, зокрема, математичного, які створюють методологічну основу дослідження та формування концепції розвитку локальних соціально-економічних систем для забезпечення їх сталого розвитку в умовах невизначеності та ризику.

Значна кількість робіт вітчизняних та закордонних науковців підкреслює **актуальність завдань** дисертаційного дослідження.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Наукова спрямованість дисертації відповідає законам України «Про наукову і науково-технічну діяльність», «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки», «Про інноваційну діяльність», узгоджується з основними положеннями проекту «Стратегії сталого розвитку України до 2030 року» та в цілому науково-технічній політиці України.

Окремі дослідження виконувалися в рамках наукової діяльності ІТГПІ НАНУ в межах науково-дослідних робіт «Розробка інформаційних технологій та інструментальних засобів моделювання і прогнозування розвитку територій в умовах децентралізації» (Державний реєстраційний номер 0121U109211), «Математичне моделювання і прогнозування функціонування і розвитку соціально-економічної і транспортної інфраструктури територій і громад» (Державний реєстраційний номер 0123U104136)

**Мета й завдання дослідження.** Метою роботи є створення нової інформаційної технології моделювання сталого розвитку локальних соціально-економічних систем в умовах невизначеності, що дозволить підвищити обґрунтованість відповідних управлінських рішень.

Мета дослідження досягається через розв'язання наступних задач:

- виконати огляд та аналіз сучасних методів моделювання і прогнозування сталого розвитку локальних соціально-економічних систем;
- проаналізувати та класифікувати групи показників та індикаторів, що використовуються для дослідження стану та динаміки соціально-економічних систем, в контексті досягнення цілей сталого розвитку;
- розробити методи підготовки даних, отриманих з різних джерел до їх використання у моделюванні розвитку локальних соціально-економічних систем;
- побудувати моделі обраних соціально-економічних систем та соціально-економічних та екологічних процесів з урахуванням впливу різних

груп чинників з метою прогнозування їх розвитку за різних сценаріїв та для підтримки прийняття відповідних управлінських рішень;

– побудувати та реалізувати інформаційну технологію для розв'язання задач моделювання та прогнозування сталого розвитку локальних соціально-економічних систем для її подальшого використання у системах підтримки прийняття рішень органів місцевого самоврядування та державного управління регіонального рівня;

– виконати апробацію запропонованої інформаційної технології моделювання та прогнозування сталого розвитку досліджуваних систем, запропонувати підходи, що забезпечують адекватний опис причинно-наслідкових зв'язків різних груп чинників та визначення можливих варіантів розвитку.

**Об'єктом дослідження** є процеси сталого розвитку локальних соціально-економічних систем.

**Предметом дослідження** є моделі, методи, алгоритми та інформаційні технології дослідження та моделювання соціально-економічних систем, підтримки прийняття рішень щодо їх сталого розвитку.

**Методи дослідження.** В роботі використано загальнонаукові та спеціалізовані методи дослідження. Теоретичну та методологічну основу складають метод діалектичного пізнання стану та особливостей розвитку соціально-економічних систем і процесів, що протікають в них, системний підхід до визначення факторів і механізмів їх розвитку. *Узагальнення теоретичних та методологічних засад* математичного моделювання сталого розвитку соціально-економічних систем використані методи індукції та дедукції, аналізу і синтезу, аналогій і зіставлення, формалізації й моделювання, методи порівняння, дослідження часових рядів, інтелектуальний аналіз даних, алгоритми машинного навчання, сценарний підхід, елементи теорії прийняття рішень. Для збирання та обробки інформації з метою підготовки її до аналізу використані методи системного, інтелектуального та статистичного аналізу даних, експертного оцінювання; для моделювання процесів, пов'язаних з розвитком локальних

соціально-економічних систем – методи ймовірно-статистичного та економіко-математичного моделювання, аналізу та прогнозування часових рядів, регресійного аналізу, багатовимірних розподілів; для розроблення інформаційної технології – методи системного аналізу, підтримки прийняття рішень, багатокритеріального аналізу, байєсівського підходу, сучасні методи оброблення даних, отриманих з різних джерел; для побудови практичних реалізацій – методи та засоби проектування і реалізації систем підтримки прийняття рішень, прикладне програмування.

**Наукова новизна одержаних результатів міститься у наступних наукових положеннях, що виносяться на захист роботи:**

**вперше**

- розроблена інформаційна технологія моделювання сталого розвитку локальних соціально-економічних систем, яка вирізняється гнучкістю, адаптивністю та універсальністю, основу якої становлять моделі, методи, алгоритми, призначені для комп'ютерного моделювання, застосовувані поетапно, поступово змінюючи рівень деталізації, імітуючи поведінку системи для виявлення нових проблем та факторів, використовуючи дані зі сховища та «потоків» дані, що підвищує оперативність та обґрунтованість рішень, реагувати на зміни, аномалії, критичні ситуації;
- розроблена методика прогнозування сталого розвитку локальних соціально-економічних систем, яка вирізняється застосуванням ланцюгів Маркова у сценаріях формування ЛСЕС, зокрема, визначення оптимальної галузевої структури, алгоритмом побудови матриці переходів з використанням індикаторів соціально-економічного розвитку, знизивши вплив людського фактору при підготовці варіантів формування територіального ЛСЕС та її галузевої структури.
- запропоновано архітектуру інформаційної технології моделювання сталого розвитку ЛСЕС, яка, на відміну, від існуючих додатків, є гнучкою, легко адаптується до потреб особи, що приймає рішення, завдяки модульній архітектурі, компоненти якої слабо зв'язані, що дозволяє налаштовувати

програмне забезпечення, реалізуючи повний цикл підтримки прийняття рішень в рамках СППР використовувати розроблені моделі, методи, алгоритми, так і для розв'язання окремих задач, що значно розширює коло споживачів розробки.

**отримав подальший розвиток:**

- метод використання різнорідних даних, отриманих з різних джерел для побудови індексу сталого розвитку, який вирізняється застосуванням кількісних та якісних підходів до визначення ваг, поєднанням різних інструментів для нормалізації, агрегації та візуалізації результатів, що забезпечує універсальність індексу як аналітичного інструмента дослідження розвитку ЛСЕС, зокрема при порівнянні ЛСЕС, формуванні інтерактивних карт ЛСЕС у процесі підтримки управлінських рішень;;
- методика побудови математичних моделей соціально-економічних та екологічних процесів розвитку ЛСЕС, яка вирізняється поєднанням якісних підходів (SWOT-аналіз), математичного моделювання та машинного навчання, що забезпечує отримання прогнозів високої якості;

**удосконалено**

- методику обґрунтування розвитку локальних соціально-економічних систем, яка забезпечує визначення важливості узгодження цілей та виробничої структури в контексті стратегії сталого розвитку, за рахунок поєднання ймовірно-статистичних моделей, машинного навчання та сценарного аналізу;
- методику оцінювання параметрів математичних моделей, яка вирізняється комплексним застосуванням теорії оцінювання та байєсівського підходу і забезпечує подолання проблеми зміщеності оцінок та неповноти даних щодо структури та динаміки досліджуваних систем.

**Достовірність та обґрунтованість результатів.** Результати роботи є достовірними, вони отримані зі застосуванням науково-обґрунтованих методик, методів, технологій, обчислювальних та комп'ютерних експериментів. Частина результатів отримана внаслідок практичного застосування розробленої

інформаційної технології при опрацювання статистичних даних та фінансово-економічних показників окремих територіальних громад при тестуванні програмного забезпечення та його окремих складових.

**Достовірність** основних положень та результатів дисертації доведено:

- відповідністю результатів математичного моделювання та чисельних експериментів;
- використанням спеціалізованого програмного забезпечення;
- використанням даних, отриманих з офіційних джерел.

Наукові положення, висновки та рекомендації **обґрунтовані**, оскільки базуються на сучасних та класичних підходах до створення інформаційних технологій та сховищ даних, проектування систем підтримки прийняття рішень, методах математичного моделювання, інтелектуального аналізу даних, сценарного аналізу та теорії прийняття рішень. Розроблені алгоритми та технології пройшли тестування за використання статистичних даних та наборів даних, представлених на Єдиному державному веб-порталі відкритих даних та Державному веб-порталі бюджету для громадян.

**Практичне значення отриманих результатів.** Розроблена інформаційна технологія призначена для використання на локальному рівні системі управління регіональним розвитком, але може бути використана й для розв'язання окремих задач підтримки прийняття рішень на рівні району та регіону. Запропонований підхід може бути використаний у відповідних системах підтримки прийняття рішень, зокрема, підприємств, що мають багатогалузеву виробничу структуру.

**Результати роботи використано** у роботі виконкому Уманської міської ради у процесі розроблення пропозицій щодо цифровізації роботи відділу економічного розвитку, інфраструктури та житлово-комунального господарства, а також у процесі підтримки прийняття рішень при розробленні Прогнозу бюджету уманської міської територіальної громади на 2026-2027 рр. та підготовці пропозицій щодо розвитку підприємництва Умані, а також – у навчальному процесі Уманського національного університету. Документи, що підтверджують впровадження результатів досліджень представлені в Додатку В.

Особистий внесок автора в роботи, опубліковані в співавторстві. Основні результати дисертаційного дослідження отримані автором самостійно.

В опублікованих у співавторстві наукових працях, здобувачем виконано: у роботі [1] розроблено методику застосування ланцюгів Маркова у сценаріях формування ЛСЕС, зокрема, визначення оптимальної галузевої структури, алгоритм побудови матриці переходів з використанням індикаторів соціально-економічного розвитку, обґрунтовано їх використання у розробленій інформаційній технології, у роботі [2] розроблено інформаційну технологію обґрунтування рішень щодо формування ЛСЕС, основу якої становить математична модель системи масового обслуговування, яка моделює взаємодію між елементами системи, зокрема обмін ресурсами: виробничими, трудовими, інвестиційними та використання соціальної та транспортної інфраструктури, у роботі [3] узагальнено підходи до опрацювання невизначеностей, характерних для соціально-економічних систем, запропоновано методику збору та підготовки даних до моделювання нелінійних нестационарних процесів розвитку соціально-економічних систем, у роботі [4] досліджено проблему застосування інформаційних технологій у процесі реагування на загрози та надзвичайні ситуації, запропоновано підходи до організації міжвідомчої взаємодії. у роботі [5] розроблено методику використання даних з Інтернет-джерел у задачах аналізу та моделювання розвитку ЛСЕС

**Апробація результатів дисертації.** Результати дисертації представлені у формі доповідей на конференціях: XXI Міжнародній науково-практичній конференції *«Інформаційно-комунікаційні технології та сталий розвиток»* (Київ, 14-16 листопада 2022 р.), XX Міжнародній науково-практичній конференції *«Сучасні інформаційні технології управління екологічною безпекою, природокористуванням, заходами в надзвичайних ситуаціях: виклики 2021 року»* (Київ, 04-08 жовтня 2021 р.).

Результати дисертації розглянуті на науковому семінарі Інститут телекомунікацій та глобального інформаційного простору Національної академії наук України у 2026 році.

**Публікації.** Основні наукові результати дисертаційної роботи представлені у 5 наукових публікаціях: дві з яких – статті у фахових виданнях України (категорія Б), 1 - стаття у виданні, індексованому у міжнародній наукометричній базі Скопус. 2 публікації, що додатково відображають отримані наукові результати - 2 тез доповідей у збірниках наукових праць міжнародних науково-практичних конференцій.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, додатків, списку використаних джерел. Загальний обсяг дисертації – 247 сторінок, обсяг основного тексту – 198 сторінок. Робота містить 56 таблиць, 44 рисунки, 3 додатки на 27 сторінках. Список використаних джерел складається з 145 найменувань.

# РОЗДІЛ 1

## МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ РОЗРОБЛЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ СТАЛОГО РОЗВИТКУ ЛОКАЛЬНИХ СОЦІАЛЬНО- ЕКОНОМІЧНИХ СИСТЕМ

### 1.1 Локальні соціально-економічні системи як об'єкт інформатизації

Зміна динаміки, структури соціально-економічних систем різних рівнів, формування нових закономірностей та загальних тенденцій є характерною ознакою сучасного етапу їх розвитку. Нового значення набуває й задача інформатизації сталого (збалансованого) розвитку соціально-економічних систем на рівні громад та районів [10-11]. Адже в ситуації військового конфлікту, реформи децентралізації, тощо, важливо, не лише об'єктивно та оперативно оцінити поточний стан системи, зреагувати на критичні ситуації, адекватно реагувати на зміни зовнішнього середовища, найбільш повно враховувати вплив на параметри системи зовнішнього середовища та внутрішніх чинників [12].

Суспільство та держава протягом останніх років продемонстрували спроможність протистояти загрозам різного типу (зокрема, пандемія, збройна агресія, тощо), здатність адаптуватися до змін зовнішнього середовища, швидко відновлюватись після критичних ситуацій та підтримувати стале функціонування. Державне управління та місцеве самоврядування показали свою дієвість і керованість, здатність здійснювати ефективне управління на державному, місцевому та регіональному рівнях, стійкість та згуртованість, забезпечуючи співпрацю держава-регіон-громада, підтримуючи як горизонтальні, так і вертикальні зв'язки, задовольняючи потреби населення, а суспільство продемонструвало високий рівень свідомості та здатність до консолідації [13-15].

Значною мірою, такий результат досягнуто за рахунок розбудови системи забезпечення національної стійкості, трансформації державного та публічного управління, реформи децентралізації, активній цифровізації та інформатизації.

Реформа децентралізації [16] стала суттєвим кроком на шляху до інтеграції до європейського співтовариства, заклавши основу для подальших трансформацій. Сьогодні триває новий етап реформ - розбудова інформаційного суспільства [17], яка активно розгортається трансформуючи місцевий рівень управління. Зміни торкнулись й регіонів, й територіальних громад. Однак, за даними Міністерства цифрової трансформації, місцевий рівень поки «відстає» за темпами реформ [9]. Крім того, зазначають фахівці [1], система управління місцевим розвитком, потребує впровадження нових підходів. І ці підходи мають бути зосереджені не лише на цифровізації управління [18]. Громади та райони мають бути орієнтовані на оптимальне використання власного ресурсного потенціалу, раціональне споживання, узгоджену взаємодію громадян, бізнесу, місцевого самоврядування та держави. Такий підхід вимагає створення інформаційно-аналітичних технологій, систем підтримки прийняття рішень, адаптованих саме до потреб локального (місцевого рівня).

Актуальними стають підходи до підтримки прийняття рішень, які не лише дозволяють ідентифікувати поточний стан системи, а й прогнозувати її майбутній розвиток, виходячи з нових реалій, визначати оптимальні шляхи її розвитку. Як показав досвід реформи децентралізації, в даному контексті, критично важливим для особи, що приймає рішення є забезпечення якісного та оперативного оброблення інформації, отриманої з різних джерел, можливість визначати критичні точки переходів між станами досліджуваної системи, передбачати стабільність або ризики розгортання криз, аналізувати ефективність політики підтримки сталого розвитку, фактично не спираючись на ретроспективні дані.

В рамках проекту Ради Європи «Посилення багаторівневого врядування та місцевої демократії для підтримки відновлення України» [19], значна увага приділена формуванню ефективних механізмів сталого розвитку саме на рівні територіальних громад, через об'єднання ресурсів, спільні інвестиційні проекти та модернізацію інфраструктури. Дана задача визначена як одна з пріоритетних для регіонального розвитку. Організація співробітництва на місцевому та

регіональному рівнях [20, 21] стає сьогодні одним із головних інструментів забезпечення національної стійкості.

За рахунок кооперації, спільного використання ресурсів та інфраструктури в рамках єдиного економічного середовища, утвореного через об'єднання територіально близько розташованих територіальних громад (та/або окремих міст чи сіл) у локальні соціально-економічні системи (ЛСЕС) [22], отримується синергетичний ефект від такої взаємодії, що сприяє місцевому розвитку, спроможності та стійкості громад. Таким чином, формуються складні динамічні системи, для яких важливо обґрунтувати взаємодію їх елементів, враховуючи конкуренцію, зростання навантаження на інфраструктуру, розвиток інформаційних технологій, зміни у плануванні населених пунктів, розміщенні виробництва, тощо. Це значно ускладнює процеси підтримки прийняття рішень. Значні обсяги інформації, складні залежності, значна кількість факторів, які потрібно врахувати, стислі строки для аналізу та обґрунтування рішення. Потрібні нові підходи до підтримки прийняття рішень, основу яких становлять, інформаційні технології, які поєднують, збір та оброблення даних з численних джерел, застосуванні математичних моделей, алгоритмів машинного навчання, сценарного аналізу, симуляційного моделювання, методики застосування математичного апарату для розроблення адаптивних стратегій, тощо.

Поєднання в рамках єдиної інформаційної технології, математичного моделювання, інструментів інтелектуального аналізу даних, системного аналізу, сценарного аналізу, теорії прийняття рішень, як зазначають [23], забезпечить проведення комплексного дослідження та встановлення закономірностей і зв'язків, які пов'язують стійкість, сталий розвиток із соціально-економічними процесами, що відбуваються на певних територіях.

Математичне моделювання є одним з інструментів, які дозволяють поєднати фундаментальні дослідження в сфері державного та публічного управління з практичними підходами. Адже, моделювання забезпечує якнайповніше та точне відображення стану, динаміки, взаємодії та взаємовпливу досліджуваних систем з іншими соціально-економічними системами, дає

можливість побудувати прогнози за обраними сценаріями та оцінити наслідки від прийняття управлінських рішень. Проблеми моделювання соціально-економічних систем різного рівня ієрархії методами лінійної та нелінійної динаміки є темою досліджень багатьох вітчизняних [24-28] і зарубіжних учених [29, 30], значна увага приділена й прогнозуванню їх розвитку в умовах наявності невизначеностей різного типу. Однак, залишається невирішеною проблема розроблення технологій збору та оброблення значних обсягів даних, отриманими з різних джерел та представлених у різних форматах, адаптованих до використання у системах підтримки прийняття рішень державного та публічного управління, зокрема на рівні громад та районів, який сьогодні активно реформується.

Ще однією задачею, що потребує уваги є обґрунтування адміністративно-територіального складу таких соціально-економічних систем, визначення їх оптимальної галузевої структури, інфраструктурних рішень є складними задачами, що потребують відповідного аналітичного апарату, інформаційних технологій, адаптованих до використання у системах підтримки прийняття рішень в управлінні регіональним та місцевим розвитком [31].

Враховуючи досвід Європейського співтовариства ЛСЕС [32] - складні територіально організовані утворення, у межах яких відбувається взаємодія економічних, соціальних, екологічних, управлінських та інфраструктурних компонентів. У сукупності ці елементи формують цілісну ієрархічну систему, розвиток якої залежить від збалансованості та узгодженості процесів у різних сферах життєдіяльності громади. Економічна складова визначає виробничий потенціал, фінансову спроможність та інвестиційну привабливість території, тоді як соціальна підсистема відображає якість життя населення, стан людського капіталу, рівень освіти, охорони здоров'я та соціальної згуртованості. Екологічна підсистема забезпечує раціональне використання природних ресурсів, контроль за станом довкілля та мінімізацію техногенного навантаження. Координуючу роль відіграє управлінська підсистема, що формує стратегічні пріоритети, забезпечує регуляторний вплив, організує бюджетні

процеси та контролює реалізацію програм розвитку. Завершує структуру інфраструктурна підсистема, яка охоплює транспортні, енергетичні, комунікаційні та цифрові компоненти, створюючи матеріальну й технологічну основу для функціонування всієї системи.

Взаємозалежність і багаторівневість цих підсистем визначають динамічний характер ЛСЕС: зміни в одній сфері неминуче впливають на інші. Завдяки цьому ЛСЕС розглядається як саморегульована система, здатна адаптуватися до зовнішніх викликів, реагувати на соціально-економічні зміни та забезпечувати передумови для сталого розвитку територіальної громади чи регіону. ЛСЕС — це територіально обмежене, але функціонально цілісне утворення, у якому відбувається взаємодія економічних, соціальних, екологічних, управлінських та інфраструктурних елементів з метою забезпечення сталого розвитку громади чи регіону [33]. Типовими прикладами ЛСЕС є: територіальні громади (в тому числі об'єднані), міські агломерації; районні та кластерні економічні об'єднання; локальні інноваційно-промислові парки. Кожна ЛСЕС функціонує, намагаючись досягти динамічної рівноваги — тобто балансує між зростанням економічного потенціалу, соціальною стабільністю та екологічними обмеженнями. Ця рівновага підтримується через взаємодію підсистем, які утворюють багаторівневу ієрархію [34]. Взаємодія складових ЛСЕС представлена на рис. 1.1.

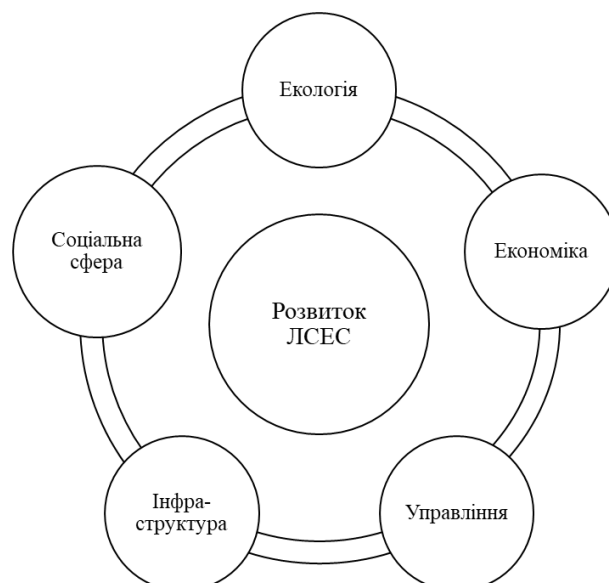


Рисунок 1.1 – Сталий розвиток ЛСЕС – результат взаємодії підсистем

ЛСЕС є складною системою, елементи якої функціонують як єдине ціле, складаються з підсистем та зв'язків між ними. Кожна з них виконує власні функції, але водночас впливає на загальну динаміку розвитку ЛСЕС (або громади чи регіону, до складу яких вона входить). Економічні процеси формують матеріальну основу життя, соціальні — забезпечують людський капітал і якість життя, екологічні — визначають стан природного середовища та ресурсну стійкість. Управлінська підсистема координує та спрямовує розвиток, а інфраструктурна — створює фізичні й технологічні умови для функціонування всіх інших компонентів.

Опис функціональних підсистем ЛСЕС представлений у Додатку А, дає змогу зрозуміти внутрішню логіку ЛСЕС, їх взаємозв'язки та роль у забезпеченні сталого розвитку території.

ЛСЕС є системою із зворотнім зв'язком [35], адже:

- господарська діяльність, економічна діяльність впливає на соціальний добробут і екологічний стан;
- соціальна політика формує трудовий потенціал, що визначає економічну динаміку;
- управлінська система координує ці процеси через регуляції, фінансування та моніторинг.

Для формалізації таких зв'язків використовуються графові моделі або системні діаграми, де вузли представляють підсистеми, а ребра — потоки інформації, ресурсів і впливу. Схематично це можна подати так (рис. 1.2):

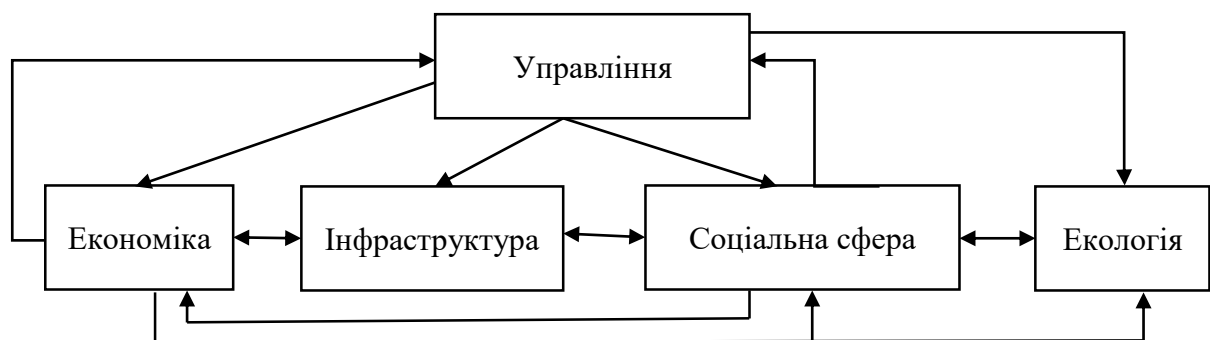


Рисунок 1.2 – ЛСЕС як система із зворотнім зв'язком

Така структура демонструє, що управлінська підсистема є регуляторним ядром, а інфраструктура забезпечує стійкість і розвиток усіх компонентів.

В Україні можна виокремити кілька типів ЛСЕС залежно від домінуючих факторів розвитку (табл. 1.1)

Таблиця 1.1 – Типологізація [36] за виробничим спрямуванням ЛСЕС

Тип ЛСЕС	Ключові характеристики	Особливості
Промислові	висока частка провислості у галузевій структурі – більше 30%	високе енергоспоживання, експортна орієнтація, висока щільність населення, висока бюджетна забезпеченість громад, складна екологічна ситуація
Аграрні	велика частка сільського господарства у галузевій структурі – більше 30%	низька щільність населення, бюджетна забезпеченість не висока, екологічна чутливість
Туристичні	провідна частка у економіці – туризм та готельно-ресторанний бізнес	сезонна зайнятість, залежність від рекреаційного ресурсу, потреба у збереженні природного середовища
Змішаного типу	немає чітко виражених провідних галузей в економіці	до складу входять міські, сільські громади, орієнтація на спільне використання об'єктів охорони здоров'я, освіти, комунального господарства, соціальної сфери, диверсифікація економіки
Інноваційні	Висока частка виробництва, орієнтованого на інноваційну продукцію	наявність технопарків, науково-виробничих об'єднань, висока частка ІТ, науки, освіти,

Кожен тип ЛСЕС має власну конфігурацію підсистем, однак загальні принципи сталого розвитку залишаються універсальними.

ЛСЕС — це комплексна самоорганізована система, у якій взаємодіють економічні, соціальні, екологічні, управлінські та інфраструктурні компоненти, об'єднані єдиними інформаційними потоками. Цифровізація управління дозволяє перетворити ЛСЕС на інтелектуальну систему, здатну прогнозувати власний розвиток, адаптуватися до зовнішніх викликів та забезпечувати сталу траєкторію зростання на рівні громади або регіону. Вже зроблені активні кроки

для забезпечення цифрового розвитку місцевого самоврядування [37], посилення його аналітичного забезпечення. Зокрема, законодавчо закріплена методика класифікація територій NUTS. Визначений перелік та вимоги до показників, за якими українські громади буде віднесено до різних функціональних типів територій [38]. Змінюються й методичні підходи до планування та стратегування розвитку регіонів, громад та територій: в 2025 році в Україні діє проєкт міжнародної технічної допомоги «Управління місцевими фінансами для відновлення та відбудови громад» [39]. Його метою є допомогти громадам здійснити перехід від управління доходами до планування видатків, що, передбачає формування системи управління розвитком громад та територій, спрямованої на забезпечення власної, внутрішньої спроможності, підвищення ефективності використання наявних ресурсів, залучення інвестиції та створення умов для їх підтримання, збалансованого економічного розвитку територій. Впроваджується комплексний (інтегрований) підхід до управління місцевим та регіональним розвитком, який відповідає концепції сталого розвитку, ніж галузевий, адже дозволяє узгодити цілі регіональної політики, місцевого самоврядування, пріоритети населення та бізнесу в контексті забезпечення сталого розвитку територій.

## **1.2 Концептуальні засади, принципи, підходи застосовувані для дослідження сталого розвитку ЛСЕС**

Сталий розвиток (sustainable development) [40] - це концепція гармонійного узгодження економічних, соціальних та екологічних інтересів суспільства з метою забезпечення збалансованого зростання у теперішньому та майбутньому періодах. Сталий розвиток визначається як комплексний, багатовимірний процес забезпечення збалансованого економічного зростання, соціального добробуту та екологічної рівноваги. Основою сталого розвитку є інтеграція трьох ключових сфер — економічної, соціальної та екологічної — у єдину рамку, у якій жодна зі складових не може розглядатися окремо.

Цілі сталого розвитку затверджені ООН (Sustainable Development Goals, SDGs), на період 2015–2030 років охоплюють 17 цілей і 169 завдань, спрямованих на подолання бідності, захист планети, забезпечення миру, освіти, рівності та економічного процвітання для всіх [41].

У європейському контексті, ключовим документом є Європейська зелена угода (European Green Deal), яка визначає стратегію переходу до кліматично нейтральної економіки ЄС до 2050 року [42]. Ця угода передбачає глибоку модернізацію промисловості, енергетики, транспорту та сільського господарства, розвиток відновлюваних джерел енергії, інвестиції у «зелені» технології та підтримку справедливого переходу для всіх регіонів.

У міжнародній практиці широко застосовуються системи індексів, які поєднують усі чотири підходи (табл. 1.2) (побудовано на основі [43-45])

Таблиця 1.2 – Узагальнення методик застосування систем індексів для оцінювання соціально-економічного розвитку країн та регіонів

Методика	Розробник	Складові	Особливості
SDG Index	UN SDSN (Sachs et al.)	17 ЦСР, 169 цілей	Використовується для моніторингу прогресу країн щодо досягнення цілей сталого розвитку
Human Development Index (HDI)	UNDP	Освіта, дохід, тривалість життя	Інтегральна оцінка соціального розвитку та добробуту
Environmental Performance Index (EPI)	Columbia University, Yale University	Екологічні показники (вода, повітря, клімат)	Комплексна оцінка екологічної політики країн
Better Life Index (BLI)	OECD	11 сфер добробуту	Дає змогу порівнювати рівень життя між країнами
Regional Competitiveness Index (RCI)	ЄС / DG REGIO	Економічні та інституційні чинники	Використовується для оцінки регіонів Європи.

В українському контексті формується власна інтегральна методика оцінки досягнення цілей сталого розвитку для громад, що включає адаптовані індикатори SDGs, соціально-економічні показники Державної служби статистики та результати моніторингу соціально-економічного розвитку, надані органами державного управління та місцевого самоврядування.

Triple Bottom Line (TBL), або модель трьох вимірів сталості, вперше була запропонована Джоном Елкінгтоном (John Elkington, 1994) [46]. Її суть полягає в тому, що ефективність розвитку має оцінюватися не лише економічними показниками, а й соціальними та екологічними результатами (рис. 1.3).

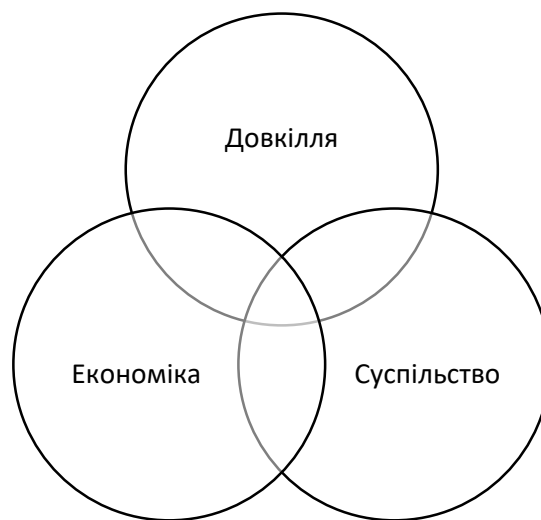


Рисунок 1.3 – Модель трьох вимірів сталості [46]

Перетин трьох сфер утворює зону сталого розвитку (Sustainability) — простір, де забезпечується гармонія між інтересами бізнесу, суспільства та екологією.

У контексті розвитку ЛСЕС, модель трьох вимірів сталості, може бути використана для оцінювання рівня досягнення цілей сталого розвитку. Модель складається з трьох компонентів: економічної (наповнення бюджету, інвестиційна привабливість, зайняте населення), соціальної (якість освіти, медичне забезпечення, соціальний захист), екологічна (рівень забруднення, перероблення відходів, енергоефективність).

В загальному випадку модель сталого розвитку ЛСЕС можна представити:

$$SD = f(E, S, Env) \quad (1.1)$$

де  $E$  — економічна підсистема,  $S$  — соціальна підсистема,  $Env$  — екологічна підсистема, функція  $f$  - визначає зв'язки між підсистемами.

Більш сучасний варіант TBL – інтегрована модель (ISM), у якій підкреслено взаємозалежність складових і застосовано системний підхід до управління розвитком. Якщо модель TBL фокусується на рівновазі між трьома незалежними компонентами, то ISM розглядає сталий розвиток як єдину систему, у якій кожна складова впливає на інші в динамічному режимі.

У структурному представленні інтегрованої моделі сталого розвитку (Integrated Sustainability Model, ISM) [47] її зазвичай зображають у формі трикутника або піраміди, що символізує взаємозалежність ключових компонентів. На вершині такої схеми розміщується ціль «Sustainability» — сталий розвиток, який виступає інтеграційним результатом збалансованої взаємодії всіх складових.

Основу моделі утворюють три фундаментальні елементи — економіка, суспільство та довкілля. Вони формують базис системи, на якому ґрунтується розроблення стратегій розвитку та оцінювання їх впливу на різні сфери життєдіяльності громади чи регіону.

Взаємозв'язки між сторонами трикутника відображають динамічну природу взаємодії факторів сталого розвитку. Вони демонструють, наприклад, як рівень соціального добробуту залежить від ефективності використання ресурсів, як екологічна ситуація впливає на економічні рішення, або як економічна політика визначає можливості для соціального забезпечення та природоохоронних заходів. Таким чином, ISM підкреслює, що жодна зі складових не може розглядатися ізольовано, а сталий розвиток досягається лише через їхню постійну взаємодію та координацію.

У громадах ISM дозволяє формувати програмно-цільову систему управління сталим розвитком. Наприклад:

- на економічному рівні — планування розміщення виробництва, виробничої спеціалізації, енергоефективності та інвестицій;
- на соціальному — участь громади в ухваленні рішень (е-участь);
- на екологічному — оцінка екологічних ризиків і моніторинг ресурсів через цифрові платформи (е-моніторинг).

Моделі TBL та ISM ґрунтуються на взаємозв'язку економічної, соціальної та екологічної складових, однак, вони суттєво відрізняються за своєю логікою, рівнем складності, динамічними можливостями та сферою застосування. У таблиці 1.3 систематизовані ключові особливості моделей та окреслено задачі, де кожна з моделей може бути найбільш ефективною з точки зору оцінювання та стратегічного управління розвитком територіальних громад і регіонів та ЛСЕС, сформованих на їх основі.

Таблиця 1.3 - Порівняння моделей TBL та ISM

Критерій	Показники порівняння моделей	
	Triple Bottom Line (TBL)	Integrated Sustainability Model (ISM)
Тип моделі	Статична, трикомпонентна	Динамічна, інтегрована
Основна ідея	Баланс між економікою, суспільством і природою	Синергія між компонентами в системі
Рівень застосування	Глобальний, корпоративний, муніципальний	Регіональний, стратегічний, управлінський
Ключова мета	Збалансованість результатів	Адаптивне управління сталим розвитком
Переваги	Простота, універсальність, візуальна наочність	Гнучкість, можливість моделювання сценаріїв
Недоліки	Не враховує часову динаміку	Складність реалізації та верифікації
Приклад реалізації	ESG-звітність підприємств	Інформаційно-аналітична система громади (IDSS)

Результати порівняння моделей TBL та ISM демонструють еволюцію підходів до сталого розвитку: від відносно статичного оцінювання збалансованості між трьома компонентами до динамічного управління складною системою з урахуванням взаємозалежностей та змін у часі. Модель TBL залишається зручним і зрозумілим інструментом для базового моніторингу, звітності та комунікації. Водночас ISM забезпечує значно ширші аналітичні можливості, дозволяючи моделювати сценарії, враховувати невизначеність і підтримувати управлінські рішення в реальному часі — що є особливо важливим для сучасних ЛСЕС. Таким чином, обидві моделі є взаємодоповнюваними, але вибір моделі залежить від цілей аналізу, рівня деталізації та вимог до адаптивності системи управління.

Інтеграція цих напрямів покладена в основу створення інформаційної технології моделювання сталого розвитку ЛСЕС.

### **1.3 Методи оцінювання досягнення цілей сталого розвитку на рівні територіальних громад і регіонів**

Підходи дослідження сталого розвитку, застосовувані для територіальних громад і регіонів ґрунтуються на використанні комплексних методик, які дозволяють формалізувати багатовимірний характер соціально-економічних, екологічних та управлінських процесів. Оскільки жоден окремий показник не може повною мірою відобразити рівень сталості, сучасні підходи зосереджуються на побудові інтегральних індексів, що поєднують різні групи показників у цілісну систему. Для цього застосовуються індексні та інтегральні методи, статистичні моделі, експертні процедури та гібридні алгоритми, які поєднують традиційний аналіз із сучасними технологіями, зокрема, математичного моделювання, інтелектуального аналізу даних, машинного навчання, тощо.

Важливою складовою методології є нормалізація та стандартизація даних, що забезпечує їх порівнянність між громадами та у різні періоди. Для

встановлення відносин переваг, оцінювання вагових коефіцієнтів здійснюється як експертним шляхом, так і за допомогою статистичних підходів — зокрема методу головних компонент або ентропійних моделей. Гібридні методи дозволяють виявляти приховані залежності, групувати досліджувані системи за рівнем сталості, оцінювати чутливість індексу до змін окремих факторів та проводити сценарний аналіз можливих траєкторій розвитку.

Ефективне оцінювання сталого розвитку неможливе без якісної інформаційної інфраструктури: використання відкритих державних даних, побудови ETL-процесів, формування сховищ даних та автоматизації розрахунків. Це створює основу для інтерактивного моніторингу сталого розвитку та подальшої інтеграції результатів у системи підтримки прийняття рішень різних рівнів управління регіональним розвитком. Таким чином, методи оцінювання сталого розвитку, формують ключовий аналітичний інструментарій, що забезпечує об'єктивність, уніфікованість і прозорість управлінських рішень на локальному та регіональному рівнях.

Оцінювання сталого розвитку соціально-економічних систем ґрунтується на ідеї багатовимірності розвитку — необхідності одночасного врахування економічних, соціальних, екологічних та управлінських аспектів та їх взаємовпливу.

Сучасні дослідження показують, що просте використання окремих показників не дає цілісного уявлення про динаміку їх розвитку. Тому застосовуються інтегральні методи, які дозволяють об'єднати різнорідні дані у єдину числову оцінку — індекс, наприклад, індекс сталого розвитку громади (ISRF).

Для цього використовуються як кількісні, так і якісні підходи: індексні, інтегральні, експертні, аналітичні та гібридні.

Індексні методи передбачають розрахунок окремих часткових індексів за кожною складовою сталого розвитку, які потім агрегуються у загальний індекс. Формула для розрахунку загального інтегрального індексу:

$$I_{SD} = \sum_{i=1}^n w_i I_i \quad (1.2)$$

де  $I_i$  — нормалізоване значення показника у періоді  $i$ ,  $w_i$  — ваговий коефіцієнт (визначається експертно або на основі методів зменшення розмірності простору змінних) у періоді  $i$ ,  $n$  — кількість періодів.

Нормалізація здійснюється методами мін–макс, z-стандартизації, рангової трансформації або через метод відстаней до еталону (TOPSIS) [48].

Інтегральні методи дозволяють сформуванню узагальненої оцінки сталості соціально-економічної системи на основі комплексної агрегації індикаторів, зокрема:

- адитивні моделі (середнє зважене нормалізованих показників);
- мультиплікативні моделі (підкреслюють взаємозалежність компонентів):

$$I_{SD} = (E \cdot S \cdot Ec \cdot G)^{1/4} \quad (1.3)$$

де  $E$ ,  $S$ ,  $Ec$ ,  $G$  — індекси економічної, соціальної, екологічної підсистем та підсистеми управління.

Аналітичні методи передбачають використання статистичних моделей для виявлення зв'язків між індикаторами сталого розвитку, наприклад:

- кореляційно-регресійний аналіз (для перевірки залежності між доходами соціально-економічної системи й соціальними показниками);
- аналіз головних компонент (для скорочення розмірності даних);
- факторний аналіз (для виділення латентних факторів сталого розвитку).

Метод експертних оцінок - залучення групи експертів (економістів, екологів, управлінців) для визначення вагових коефіцієнтів окремих показників.

Метод аналізу ієрархій (MAI) [49] дозволяє структурувати проблему у вигляді ієрархії (мета - критерії - показники - альтернативи) та обчислити ваги через парні порівняння.

SWOT-аналіз [50] використовується як допоміжний інструмент для якісного оцінювання сильних і слабких сторін досліджуваної соціально-економічної системи, а також можливостей і загроз. Це допомагає пояснити результати інтегрального індексу з управлінської точки зору.

Соціологічні методи переважно зосереджені на анкетуванні мешканців (громади, району, області) щодо рівня задоволеності послугами, безпеки, стану довкілля, участі у прийнятті рішень.

Приклади застосування сучасних методів дослідження, що поєднують традиційні статистичні методи із машинним навчанням та інтелектуальним аналізом даних (Data Mining) наведені в табл 1.4. [48, 51, 52]

Таблиця 1.4 - Приклади застосування сучасних методів дослідження

Кластерний аналіз (K-means, Hierarchical, DBSCAN).	Використовується для групування ЛСЕС за рівнем сталого розвитку, виявлення типових і відстаючих територій. Наприклад, ЛСЕС з подібними економічними та соціальними характеристиками можуть формувати «кластер сталості типу А».
Методи головних компонент (PCA).	Дозволяють зменшити кількість змінних без втрати суттєвої інформації. Перші дві головні компоненти зазвичай пояснюють понад 70% дисперсії, що дозволяє будувати двовимірну карту сталості (економічна vs соціальна вісь).
Аналіз чутливості (Sensitivity Analysis).	Використовується для перевірки впливу кожного показника на кінцевий індекс. Це дає змогу визначити «ключові драйвери розвитку» ЛСЕС. Методи: One-At-A-Time, Sobol indices, variance-based decomposition.
Інтелектуальні алгоритми.	Decision Trees / Random Forest — для класифікації ЛСЕС за рівнем досягнення цілей сталого розвитку. Neural Networks — для прогнозування зміни індексу сталого розвитку. Bayesian Networks — для моделювання причинно-наслідкових залежностей між показниками (наприклад, вплив відповідних інвестицій на рівень зайнятості та якість довкілля).

Методика побудови інтегрального індексу сталого розвитку ЛСЕС ґрунтується на послідовному виконанні низки етапів, які дозволяють перетворити різномірні соціально-економічні, екологічні та управлінські показники на узагальнену числову оцінку рівня сталого розвитку. Для структуризації цього процесу використовується таблиця, що подає логіку формування індексу— від вибору системи показників до візуалізації результатів та присвоєння громадам відповідного рівня сталого розвитку.

Таблиця 1.5 – Методика побудови індексу сталого розвитку ЛСЕС

Назва етапу	Опис етапу
Етап 1. Вибір системи показників	<p>Показники добираються за чотирма групами:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– економічні — ВРП на душу населення (або прибуток від операційної діяльності до оподаткування – для ЛСЕС утворених на рівні громад), частка інвестицій, кількість МСП, податкові надходження.</li> <li>– соціальні — рівень освіти, тривалість життя, охоплення медичними послугами.</li> <li>– екологічні — обсяг викидів, відсоток «зеленої» енергії, частка перероблених відходів.</li> <li>– управлінські — наповнюваність бюджету, автономність, ефективність рішень, рівень цифровізації послуг.</li> </ul>
Етап 2. Нормалізація показників	<p>Для співставності різнорідних одиниць застосовують:</p> $I_{ij}^* = \frac{x_{ij} - \min\{x_{ij}\}}{\max\{x_{ij}\} - \min\{x_{ij}\}}$ <p>де <math>I_{ij}^*</math> — нормалізоване значення і-го показника за j-м індикатором розвитку для ЛСЕС (громади (громад), району) в даному часовому проміжку, <math>x_{ij}</math> — значення і-го показника за j-м індикатором розвитку певної ЛСЕС за даний часовий проміжок, <math>\max\{x_{ij}\}</math> — максимальне значення і-го показника за j-м індикатором розвитку певної ЛСЕС за весь період, що аналізується, <math>\min\{x_{ij}\}</math> — мінімальне значення і-го показника за j-м індикатором розвитку певної ЛСЕС за весь період, що аналізується, <math>i</math> — номер показника, <math>j</math> — номер індикатора [53]</p>
Етап 3. Визначення ваг	<p>Можливі підходи:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– експертний;</li> <li>– інформаційний (ентропія Шеннона [53]);</li> <li>– статистичний (метод головних компонентів).</li> </ul>
Етап 4. Агрегування	Обчислення часткових індексів за групами, а далі інтегрального Індексу сталого розвитку.
Етап 5. Візуалізація.	Побудова інтерактивних дашбордів і карт сталого розвитку (GIS, Grafana, Tableau) з розподілом ЛСЕС за рівнями: високий, середній, низький.

У табл.1.5 узагальнені ключові кроки формування інтегрального індексу сталого розвитку ЛСЕС. Методика забезпечує можливість працювати з різними типами даних, застосовувати як кількісні, так і якісні підходи до визначення ваг, а також використовувати різні інструменти для нормалізації, агрегації та

візуалізації результатів. Завдяки цьому Індекс стає універсальним аналітичним інструментом, що дозволяє порівнювати ЛСЕС, формувати карти ЛСЕС, визначати проблемні зони та підтримувати ухвалення управлінських рішень.

#### 1.4 Особливості інформаційної технології збору та оброблення даних для моделювання сталого розвитку в управлінні розвитком ЛСЕС

Якість аналізу та моделювання сталого розвитку ЛСЕС значною мірою залежить від якості, доступності та репрезентативності вхідних даних. Для формування інтегральних індексів, побудови аналітичних моделей та здійснення порівняльного аналізу необхідно використовувати офіційні, стандартизовані та регулярно оновлювані джерела інформації. У табл. 1.6 наведено систематизований огляд основних національних і міжнародних джерел даних, а також інструментів ETL-інтеграції, що забезпечують автоматизацію збору та обробки показників сталого розвитку.

Таблиця 1.6 – Основні джерела даних для оцінювання сталого розвитку ЛСЕС [54, 55]

Джерело	Тип даних	Приклад API/платформи
Державна служба статистики України (Держстат)	економічні, демографічні, соціальні показники	<a href="http://ukrstat.gov.ua">ukrstat.gov.ua</a>
Міністерство фінансів України / Є-Data	бюджети громад, трансферти, фінансова ефективність	<a href="http://spending.gov.ua">spending.gov.ua</a> , <a href="http://openbudget.gov.ua">openbudget.gov.ua</a>
Міністерство економіки, довкілля та сільського господарства України Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України	індикатори сталого розвитку, екологічні дані	<a href="http://data.gov.ua">data.gov.ua</a>
UNDP / OECD / Eurostat	міжнародні індекси та порівняльні дані	<a href="http://hdr.undp.org">hdr.undp.org</a> , <a href="http://sdg-tracker.org">sdg-tracker.org</a>
ETL-процедури та API-інтеграції	автоматизоване завантаження, фільтрація, оновлення даних	Python (pandas, ETL pipelines), SQL, FastAPI

Як видно з таблиці 1.6, інформаційне підґрунтя оцінювання сталого розвитку містить широке коло джерел: від національних статистичних порталів до міжнародних баз індикаторів та спеціалізованих API. Поєднання цих джерел дозволяє забезпечити комплексність аналізу, підвищити точність інтегральних оцінок і створити надійну інформаційну основу для систем підтримки прийняття рішень (СППР). Використання ETL-процедур і автоматизованої інтеграції даних додатково забезпечує їх актуальність, зменшує ймовірність помилок та сприяє формуванню єдиного інформаційного простору для оцінювання розвитку ЛСЕС різних типів та рівнів – від громад до регіонів.

Ефективність оцінювання сталого розвитку ЛСЕС значною мірою залежить від побудови надійної інформаційної архітектури, яка забезпечує безперервний збір, очищення, структурування та аналіз даних, в тому числі, різнорідних, отриманих з різних джерел. Така архітектура ґрунтується на багаторівневому підході, що включає ETL-процеси, формування сховища даних (DWH) та реалізацію аналітичних компонентів системи підтримки прийняття рішень [56].

Таблиця 1.7 – Складові архітектури збору та оброблення даних

Extract–Transform–Load-рівень	<ul style="list-style-type: none"> <li>– автоматичне збирання з відкритих API (Державна служба статистики, міністерства, органи місцевого самоврядування, портал E-Data);</li> <li>– фільтрація, імпутація пропусків, конвертація у стандартизовані формати</li> </ul>
DWH-рівень (Data Warehouse)	<ul style="list-style-type: none"> <li>– зберігання історичних і актуальних показників у базі даних (PostgreSQL, TimescaleDB);</li> <li>– метадані — опис джерел, версій, одиниць вимірювання.</li> </ul>
Аналітичний рівень	<ul style="list-style-type: none"> <li>– розрахунок індексів сталого розвитку, соціально-економічних показників;</li> <li>– кластеризація, класифікація, зменшення розмірності даних, візуалізація результатів;</li> <li>– підготовка інтерактивних звітів для підтримки прийняття рішень.</li> </ul>

Узгоджена взаємодія цих рівнів створює цілісну інформаційну інфраструктуру, здатну забезпечити безперервний цикл моніторингу,

оцінювання та прогнозування сталого розвитку на локальному та регіональному рівнях.

Дослідження розвитку ЛСЕС, підтримка прийняття рішень в управлінні їх розвитком супроводжується невизначеностями, зумовленими різними факторами. Невизначеність у ЛСЕС виникає через неповноту даних, швидку зміну зовнішнього середовища, непередбачуваність політичних чи економічних подій. Системний підхід до її подолання ґрунтується на таких принципах (табл. 1.8)

Таблиця 1.8 – Принципи опрацювання невизначеностей, характерних для моделювання розвитку ЛСЕС

Принцип	Суть	Реалізація в СППР
Адаптивність	система автоматично коригує моделі при зміні даних	TVP-перспекції, Bayesian updating, Kalman filters
Імовірнісність	замість детермінованих прогнозів використовуються сценарні	Bayesian networks, Monte Carlo simulations
Ітеративність	управління через послідовність уточнень	feedback loop із фактичними результатами
Самонавчання	моделі навчаються на нових даних	LSTM, reinforcement learning
Прозорість	користувач розуміє причини отриманих результатів прогнозування	SHAP, LIME, feature importance diagrams

Перехід від класичних СППР до інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень (ІСППР) — це перехід від статичної аналітики до активного, самонавчального управління.

Основні характеристики ІСППР [57]:

- Self-learning — система самостійно вдосконалює моделі прогнозування на основі нових даних.

- Self-adaptation — зміна алгоритмів залежно від зовнішніх умов (економічних чи природних).
- Explainable AI — прозорість моделей, пояснення причин прогнозів.
- Scenario engine — реалізація побудови альтернативних сценаріїв розвитку.
- User-in-the-loop — людина залишається у центрі прийняття рішень, а система підказує оптимальні дії.

Таким чином, застосування СППР перетворює процес управління розвитком громади на інтерактивну систему з постійним аналізом даних, прогнозами і рекомендаціями, що забезпечує стабільність навіть у непередбачуваних умовах.

Системний підхід [58] у поєднанні з інтелектуальними методами аналізу даних формує нову парадигму управління розвитком територіальних громад. Він забезпечує інтеграцію багаторівневих процесів збору та оброблення даних у єдину аналітичну модель; гнучке реагування на зміни середовища; зниження ризиків помилок у процесі прийняття рішень завдяки застосуванню сценарного й байєсівського аналізу; підвищення ефективності рішень через автоматизовану підтримку; а також відкритість і прозорість даних, і відповідно, участь громадськості в процесі управління. Таким чином, системний підхід створює концептуальну основу для переходу від традиційного адміністрування до інтелектуального управління сталим розвитком, що є наступним кроком до побудови «розумних» ЛСЕС (Smart LSES) [58].

Інформаційно-аналітичне середовище (ІАС) [59] — це технологічна платформа, що забезпечує інтеграцію даних, аналітичних моделей і управлінських процесів.

Його ключові функції:

- консолідація інформації з різних підсистем (наприклад, статистика, фінанси, енергетика, довкілля);
- візуалізація результатів у вигляді карт, індикаторів, трендів;
- інтелектуальний аналіз (наприклад, AI/ML, causal inference);

- сценарне управління — можливість моделювати наслідки різних рішень (наприклад, формування громадських бюджетів, збільшення бюджету освіти або зміни тарифів ЖКГ).

Такі системи вже частково впроваджені у проектах типу Smart City, Smart Region, Digital Twin of City, які реалізуються в ЄС та в українських громадах у межах ініціатив EU4DigitalUA і U-LEAD з Європою [60].

Системний підхід є фундаментальною методологічною основою для аналізу та управління локальними соціально-економічними системами, які характеризуються складністю, багаторівневістю та високим ступенем взаємозалежності між підсистемами. На відміну від традиційних лінійних моделей, системний підхід дозволяє розглядати громаду або регіон як цілісний організм, розвиток якого визначається узгодженістю економічних, соціальних, екологічних та інституційних процесів. Він забезпечує можливість комплексного оцінювання стану системи, виявлення прихованих причинно-наслідкових зв'язків та формування адаптивних стратегій управління на основі фактичних даних і механізмів зворотного зв'язку.

В контексті ЛСЕС системний підхід дозволяє:

- встановити причинно-наслідкові зв'язки між підсистемами;
- виявити «вузькі місця» розвитку та зони ризику;
- інтегрувати різномірні джерела інформації в єдине аналітичне середовище;
- забезпечити підтримку прийняття рішень (Decision Support) на основі даних (data-driven governance) [61].

У межах управління сталим розвитком системний підхід набуває особливого значення, оскільки дозволяє врахувати як внутрішні взаємодії між підсистемами, так і зовнішні виклики — глобальні економічні коливання, демографічні зміни, політичну нестабільність або екологічні загрози, тощо. Основні принципи системного підходу визначають логіку побудови інформаційної технології моделювання сталого розвитку ЛСЕС і формують методологічний каркас дослідження.

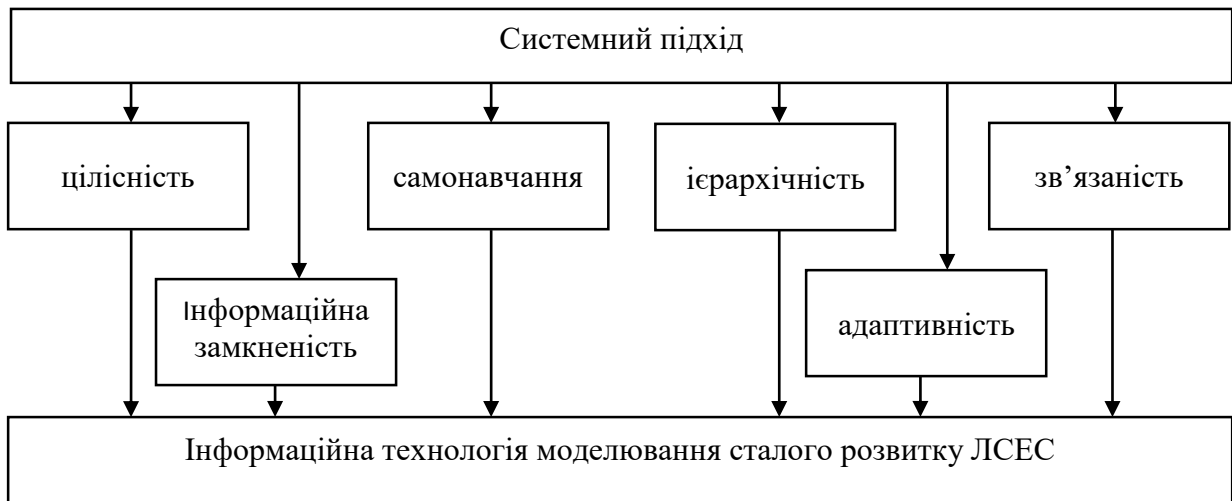


Рисунок 1.3 – Принципи системного підходу, застосовані у дослідженні

Принципи системного підходу демонструють його ключову роль у формуванні сучасних моделей управління сталим розвитком. Сукупність таких характеристик, як цілісність, ієрархічність, взаємозв'язок, адаптивність, інформаційна замкнутість та самонавчання, забезпечує здатність системи реагувати на складну природу соціально-економічних процесів та підвищує ефективність ухвалених управлінських рішень.

Застосування системного підходу дозволяє інтегрувати різноманітні дані, моделі та управлінські механізми у єдиній інформаційно-аналітичній платформі, що є критично важливою умовою для реалізації інтелектуальних технологій підтримки прийняття рішень в управлінні ЛСЕС в контексті сталого розвитку. Таким чином, описані принципи виступають методологічною основою формування архітектури СППР, складовою якої є інформаційна технологія моделювання сталого розвитку ЛСЕС.

На основі системного підходу формується ієрархічна модель СППР, яка включає п'ять взаємопов'язаних рівнів (рис. 1.6):

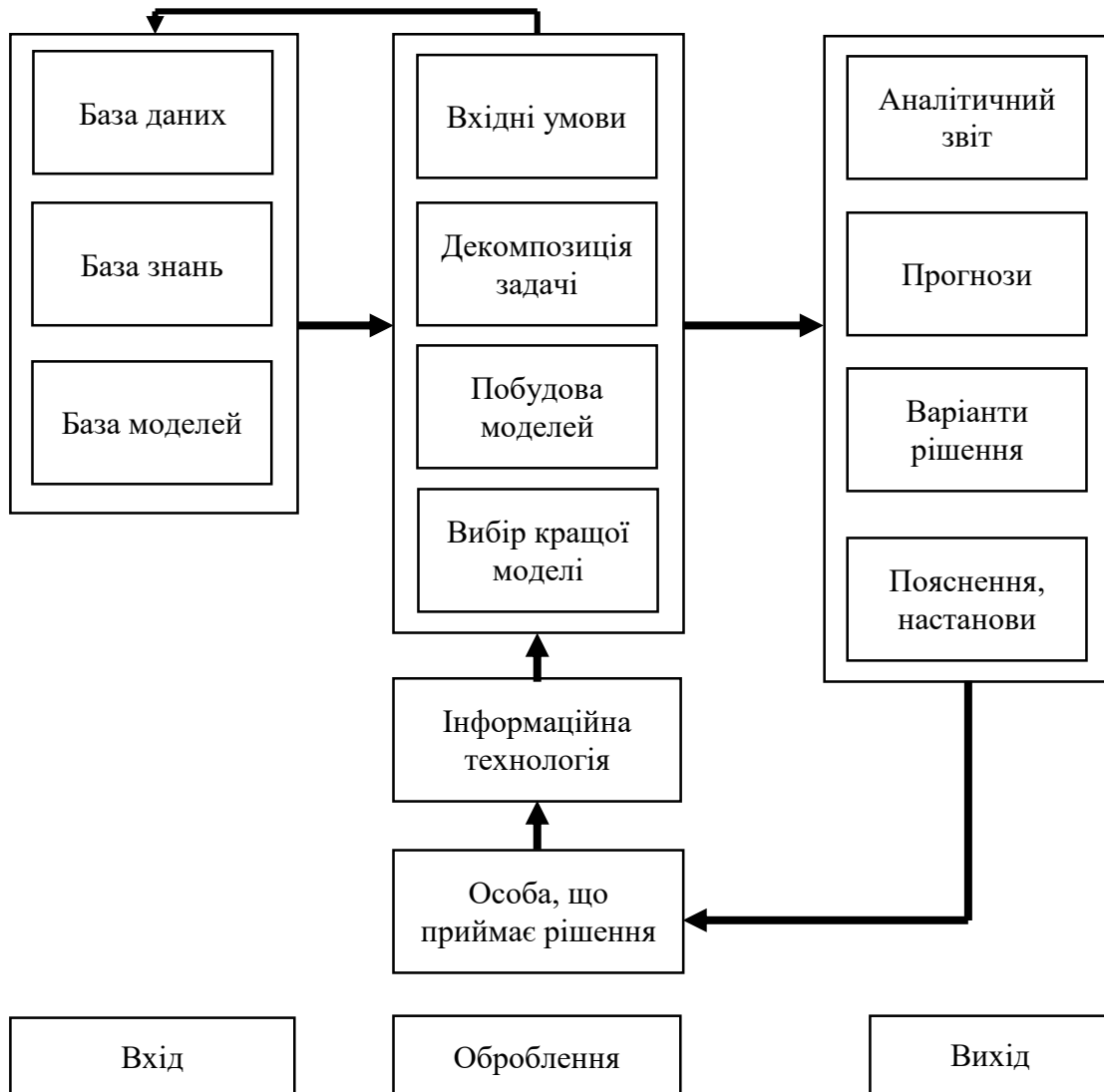


Рисунок 1.6 – Ієрархічна модель СПДР [62]

Ієрархічна архітектура СПДР базується на поетапній обробці даних — від їхнього збирання та аналізу до формування рекомендацій і взаємодії з користувачами.

Така структура забезпечує прозорість, модульність і масштабованість системи, дозволяючи адаптувати її до різних типів ЛСЕС.

У таблиці 1.9 наведено ключові функції кожного рівня та їхню роль у забезпеченні сталого розвитку громади.

Таблиця 1.9 - Рівні архітектури СППР та їхній зміст в контексті збору та оброблення даних

Назва рівня	Опис
Рівень збору та попереднього оброблення даних	Забезпечує збирання, фільтрацію та уніфікацію даних із відкритих джерел (Державна служба статистики, E-Data, дані органів державного управління, геодані, дані екологічного моніторингу). Реалізує ETL-процеси: очищення, трансформацію, імпутацію пропусків, перевірку якості та завантаження у сховище даних. Гарантує інтеграцію з іншими системами через API-шлюзи.
Аналітичний рівень	Виконує обчислення індексів сталого розвитку, кластеризацію, зменшення розмірності, оцінювання невизначеності та аналіз взаємозв'язків між показниками. Формує аналітичні панелі та візуалізації (BI-системи — Grafana, Tableau). Забезпечує первинну інтерпретацію інформації для подальшого моделювання.
Рівень моделювання та прогнозування	Реалізує широке коло моделей: математичні, економетричні, економічні моделі, нейронні мережі, когнітивні моделі, сценарії, тощо. Дозволяє комбінувати моделі різних типів, утворювати ансамблі моделей. Створює прогнози, сценарії розвитку та ризик-аналітику
Рівень обґрунтування рішень	Перетворює результати моделювання на зрозумілі управлінські показники. Формує практичні рекомендації: інвестиційні пріоритети, напрями розвитку, антикризові заходи, тощо. Забезпечує інтеграцію з стратегіями розвитку, планами, програмами розвитку, інвестиційними паспортами, тощо.
Рівень взаємодії між користувачами-громадянами та владою	Забезпечує інтерфейси для органів влади (та/або аналітиків) і громадян. Реалізує інтерактивність (опитування, звіти, дашборди), прозорість та спільну роботу з даними. Включає механізм зворотного зв'язку для постійного оновлення моделей з урахуванням наслідків рішень, пропозицій, змін у законодавстві.

Запропонована п'ятирівнева архітектура СППР відображає повний цикл перетворення даних у процесі прийняття управлінських рішень [63], який враховує особливості ЛСЕС. Кожен рівень виконує власну функцію, але разом вони формують цілісну інтелектуальну систему, здатну адаптуватися до змін середовища, враховувати ризики, забезпечувати прозорість та підтримувати планування та прогнозування соціально-економічного розвитку у громадах

(районах), що входять до складу ЛСЕС. Така структурованість є ключовою умовою ефективного застосування інформаційної технології для моделювання сталого розвитку ЛСЕС. Тому, пропонована методологія побудови моделей для аналізу та моделювання процесів сталого розвитку у ЛСЕС базується на поетапному, системному підході, який поєднує традиційні статистичні методи, сучасні алгоритми машинного навчання та інструменти сценарного аналізу. Моделювання соціально-економічних процесів у локальних системах розвитку потребує врахування їхньої складної природи, яка проявляється у нестаціонарності, нелінійності, змінах структури, масштабів, динаміки. Традиційні лінійні моделі часто не здатні адекватно описати такі властивості, тому сучасні дослідження спираються на широкий спектр методів — від класичних часових рядів до байєсівських та нейромережових підходів (рис. 1.7).

<b>Формулювання задачі</b>	цільові змінні (доходи/видатки бюджету, зайнятість населення) горизонти (1, 3 місяці, рік), результати, критерії, оцінки результатів
<b>Дані</b>	збір даних (Державна служба статистики, дані органів державного управління, C-Data, Open Data порталу відкритих даних, супутникові/екологічні API), контроль
<b>Діагностика</b>	тести ADF/KPSS/PP; ARCH-LM; Bai-Perron; BDS/Tsay; STL/SEATS та інші
<b>Декомпозиція</b>	STL/EMDA/MD: виявлення режимів (HMM/Markov-switching).
<b>Базові моделі</b>	SARIMAX/UCM/TVP; GARCH-сімейство, оцінювання ризиків
<b>Нелінійні/режимні</b>	TAR/STAR, MS-VAR, DBN.
<b>Нейронні/гібридні</b>	LSTM/GRU/TFT; ансамбль моделей
<b>Валідація</b>	перевірка,; оцінка стабільності параметрів; тести між моделями.
<b>Інтерпретація</b>	SHAP; TFT; BSTS.
<b>Прогнози та сценарії</b>	сценарії базовий, оптимістичний, песимістичний; інтервальний; сценарії реформ, (податки/тарифи/субсидії).
<b>Вбудування в IDSS</b>	API (FastAPI), дашборди (Grafana/BI), звітність.

Рисунок 1.7 – Методологія моделювання сталого розвитку ЛСЕС за використання розробленої інформаційної технології

Запропонована методологія (рис. 1.7) забезпечує комплексний, прозорий і відтворюваний процес моделювання, який дозволяє ефективно працювати з

нелінійними, структурно-змінними та багатофакторними процесами. Представлена схема відображає повний життєвий цикл моделі — від формулювання задачі до інтеграції результатів у СППР.

У табл. 1.10 наведена класифікація, яка узагальнює основні типи моделей, які застосовуються для аналізу та прогнозування процесів у ЛСЕС.

Таблиця 1.10 – Основні типи моделей, пропонувані до використання для моделюванні сталого розвитку ЛСЕС (побудовано на основі [64-66])

Процеси, що досліджуються	Пропонувані моделі/напрямки застосування
Лінійні з розширеннями (базові орієнтири)	<ul style="list-style-type: none"> <li>– ARIMA/SARIMA/SARIMAX (із зовнішніми регресорами), регресії з детермінованим трендом/сезонністю.</li> <li>– структурні моделі часових рядів із часово-змінними компонентами (тренд, сезонність, цикл).</li> <li>– Моделі стану з фільтрами Калмана / згладжуванням; моделі економічної динаміки</li> </ul>
Волатильність та ризику	ARCH/GARCH-сімейство: GARCH, EGARCH, GJR-GARCH, APARCH; багатовимірні DCC-GARCH для взаємозв'язків показників (наприклад, «економіка-екологія»), інші, наприклад, регресії для асиметрій і «хвостів».
Порогові та з перемиканням режимів	TAR/SETAR/STAR (порогова/плавна нелінійність). Марківські моделі з перемиканням AR/VAR/TVP-VAR (структурні режими «криза/звичайний» чи «пікові сезони/низький попит», інфляційні стрибки). HMM/HSMM для прихованих режимів у соціально-економічних індикаторах
Байєсівські та причинно-наслідкові	Статичні та динамічні байєсівські мережі для моделювання причинних залежностей з невизначеністю та дефіцитом даних; MCMC/SMC для оцінювання параметрів/станів. Bayesian Structural Time Series для аналізу каузального впливу політик (intervention analysis).
Складна динаміка, багатофакторні залежності	Нейронні та гібридні моделі RNN/LSTM/GRU для складної динаміки; N-BEATS, Temporal Convolutional Networks (TCN). Temporal Fusion Transformer (TFT) для багатофакторних залежностей, нестационарних рядів. Гібридні: Wavelet/EMD + LSTM; ARIMA+GARCH+LSTM; DBN + XAI (SHAP) для прозорості.
Процеси з трендами, циклічними, із значними шумами	Емпірична модальна декомпозиція, варіаційна декомпозиція (VMD), вейвлет-аналіз для відокремлення тренду/циклів/шуму та побудови ансамблів моделей

В табл. 1.10 представлені основні типи моделей, які широко використовуються для розв'язання задач дослідження соціально-економічних систем в умовах невизначеності що в тому числі викликана структурними зрушеннями, волатильністю та складними нелінійними взаємозв'язками в середині системи та із оточенням.

Складним, але першочерговим завданням є забезпечення високої якості даних, що охоплює ETL-процеси, імпутацію пропусків (фільтр Калмана, EM-алгоритм, kNN, регресійні методи), робастне опрацювання викидів (функції Хубера, Тьюкі) та нормалізацію даних [67]. Застосування байєсівського підходу дозволяє поєднувати апріорні знання з новими даними, застосовувати регуляризацію та отримувати імовірнісні прогнози через MCMC або SMC-процедури.

Окрему групу складають ансамблеві методи, у яких комбінуються лінійні, порогові та нейронні моделі, що підвищує стабільність і точність прогнозів. Для оцінювання прихованих станів системи та параметрів, що змінюються у часі, використовуються Kalman-фільтри, а також їхні розширені варіанти — UKF, EnKF та Particle Filters [68]. У випадках високої варіативності зовнішніх умов надзвичайно важливим є сценарний аналіз, що включає симуляції типу “what-if”, стрес-тестування та моделювання впливу окремих подій, зокрема через методи BSTS або подібні до Prophet моделі для інтервенцій.

Для кількісної оцінки прогнозової невизначеності застосовують інструменти, які дозволяють оцінити розкиданість і надійність прогнозів: інтервали прогнозування, fan-charts, метрики CRPS і pinball loss, а також графіки калібрування [69]. Разом ці методи забезпечують надійну основу для побудови стійких, адаптивних і прозорих моделей для підтримки прийняття рішень щодо сталого розвитку ЛСЕС.

Тобто, потрібна якісне інформаційної інфраструктури: використання відкритих державних даних, побудови ETL-процесів, формування сховищ даних та автоматизації розрахунків, яка створює основу для інтерактивного

моніторингу сталого розвитку та подальшої інтеграції результатів у системи підтримки прийняття рішень.

### 1.5 Постановка задачі дослідження

Сталий розвиток локальних соціально-економічних систем характеризується складною організацією взаємодії економічних, соціальних, екологічних і управлінських процесів, динаміка яких є нелінійною, характеризується нестаціонарністю та стохастичністю. Існуючі методи аналізу, застосовані на практиці — здебільшого індексні або статистичні — не забезпечують інтеграції різнорідних даних, врахування невизначеностей і побудови адаптивних моделей прогнозування.

Проблема полягає у створенні цілісної методології та інформаційної технології, що дозволяє:

- інтегрувати багатовимірні дані з різних джерел, що описують економічних, соціальних, екологічних, управлінських складові сталого розвитку;
- моделювати процеси розвитку ЛСЕС з урахуванням структурних і параметричних невизначеностей;
- автоматизувати формування інтегральних показників сталості;
- здійснювати сценарний аналіз і підтримку прийняття рішень у реальному часі.

Проблема є міждисциплінарною і охоплює сфери системного аналізу та підтримки прийняття рішень, економіко-математичного, математичного моделювання, штучного інтелекту та інформаційних технологій.

Мета роботи — розробити інформаційну технологію моделювання сталого розвитку ЛСЕС, яка забезпечує комплексну обробку даних, оцінку, прогнозування та підтримку управлінських рішень у середовищі невизначеності.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

1. Проаналізувати теоретико-методологічні основи сталого розвитку ЛСЕС, визначити структуру, підсистеми та принципи їх взаємодії.

2. Систематизувати існуючі підходи до оцінювання сталого розвитку та обґрунтувати доцільність побудови інтегрального індексу сталості громади (ICSG).
3. Визначити типи невизначеностей (структурні, статистичні, параметричні, ймовірнісні) та розробити методи їх урахування у моделях розвитку.
4. Створити методикку ідентифікації нелінійних і нестационарних процесів соціально-економічної динаміки.
5. Розробити архітектуру системи підтримки прийняття рішень, що інтегрує модулі збору, аналізу, моделювання, прогнозування та візуалізації.
6. Реалізувати інформаційну технологію у вигляді прототипу програмної системи на основі відкритих даних і сучасних технологій (Python, FastAPI, Grafana, PostgreSQL).
7. Провести експериментальні дослідження з використанням реальних даних територіальних громад України, оцінити точність прогнозів і ефективність запропонованої технології.
8. Надати практичні рекомендації щодо впровадження розробленої технології у системи стратегічного планування та регіонального моніторингу.

### **Висновки до розділу 1**

У першому розділі проведено системний аналіз теоретико-методологічних основ розроблення інформаційної технології моделювання сталого розвитку локальних соціально-економічних систем (ЛСЕС), а саме:

- показано, що сталий розвиток є складним багаторівневим процесом, у якому економічні, соціальні, екологічні та управлінські складові перебувають у тісній взаємодії;
- процеси сталого розвитку вирізняються високою динамічністю, наявністю нелінійних зв'язків, відбувається в умовах невизначеності, що потребує застосування системного підходу до їхнього аналізу.

- на основі аналізу концепції сталого розвитку, існуючі підходи до аналізу та моделювання процесів сталого розвитку потребують адаптації до українських умов, оскільки не враховують вплив невизначеності та загроз.
- Визначено, що ЛСЕС - складні ієрархічні системи, що складається з економічної, соціальної, екологічної, управлінської та інфраструктурної підсистем, мають зв'язки між підсистемами
- визначено роль інформаційних потоків і цифрової трансформації у забезпеченні ефективного управління розвитком ЛСЕС
- Систематизовано підходи до аналізу сталого розвитку — економічний, соціальний, екологічний та інституційний, кожен із яких формує власну систему показників і методів оцінювання. Показано, що комплексне поєднання цих підходів є передумовою побудови інтегрального індексу сталого розвитку.
- Доведено наявність нестационарності та нелінійності процесів сталого розвитку, зумовлених дією зовнішніх і внутрішніх чинників — економічних циклів, демографічних змін, політичних коливань та інвестиційних потоків. Для адекватного моделювання таких процесів необхідно застосовувати адаптивні інструменти — байєсівські мережі, нейромережеві моделі, методи нелінійного прогнозування та сценарного аналізу.
- Розглянуто сучасні методи оцінювання сталості на рівні громад і регіонів. Запропоновано використання індексних, інтегральних, кластерних і гібридних методів, що поєднують статистичний аналіз, машинне навчання та експертні оцінки. Обґрунтовано доцільність побудови інтегрального індексу сталого розвитку громади (ICRF) на основі нормалізованих показників та відкритих державних даних.
- Розкрито суть системного підходу до управління розвитком у середовищі невизначеності. Показано, що ефективне управління можливе лише за умови інтеграції всіх рівнів аналітичної системи — від збору даних і

моделювання до формування управлінських рекомендацій у межах інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень (IDSS).

- Сформовано методологічну базу дослідження, яка поєднує системний, економіко-математичний, аналітичний та інформаційно-технологічний підходи.

Ця база визначає подальший розвиток роботи — від формалізації моделей і алгоритмів оцінювання сталості до побудови архітектури інформаційної технології моделювання сталого розвитку.

## РОЗДІЛ 2

### МЕТОДОЛОГІЯ МОДЕЛЮВАННЯ СТАЛОГО РОЗВИТКУ ЛОКАЛЬНИХ СОЦІАЛЬНО-ЕКОНОМІЧНИХ СИСТЕМ

#### 2.1 Застосування методології системного аналізу у дослідженні ЛСЕС

ЛСЕС системи функціонують у відкритому, динамічному та багатовекторному середовищі. Їх розвиток відбувається не ізольовано, а в щільній взаємодії з іншими системами, під впливом глобальних чинників, макроекономічних тенденцій, державної політики, демографічних змін, екологічних чинників, суспільно-політичної ситуації, цифровізації та технологічної трансформації, тощо.

Все це зумовлює багаторівневу природу невизначеності, характерної для сучасних соціально-економічних систем локального (місцевого) рівня. По-перше, невизначеність, пов'язана з неповнотою інформації. Зокрема, часові ряди статистичних даних можуть бути короткими, містити пропуски. Статистичні показники, у зв'язку із змінами статистичної методології, можуть бути сформованими за різними методичними підходами, і тому, є неспівставними у різних часових перетинах. Крім того, дані, що описують окремі аспекти функціонування ЛСЕС, зокрема, екологічну складову, часто є фрагментарними, неповними, що ускладнює ідентифікацію реальних закономірностей. По-друге, має місце структурна мінливість системи: змінився адміністративно-територіальний устрій, виробнича спеціалізація окремих міст та районів, відбулась реформа децентралізації, відповідно, змінюється й конфігурація взаємозв'язків між підсистемами, з'являються нові фактори, трансформуються старі. Третім джерелом невизначеності є випадкові події та шоки, які не можуть бути передбачені (кризи, стихійні лиха, зміни у законодавстві, військовий стан, тощо). Четвертий аспект — часова еволюція параметрів, коли оцінені коефіцієнти моделей змінюються залежно від макроекономічних тенденцій, впливу регіональних та місцевих умов, схильності (бажання) громад до

об'єднання або до спільного використання інфраструктури. П'ятий компонент — нелінійність реакцій, коли вплив одного й того самого фактору може бути різним залежно від поточного стану системи або наявності порогових ефектів.

Таким чином, невизначеність у ЛСЕС має багаторівневий, інтегрований характер і повинна розглядатися системно як сукупність взаємопов'язаних компонентів, що впливають на точність прогнозування, стійкість моделей і, відповідно, якість управлінських рішень (рис. 2.1).

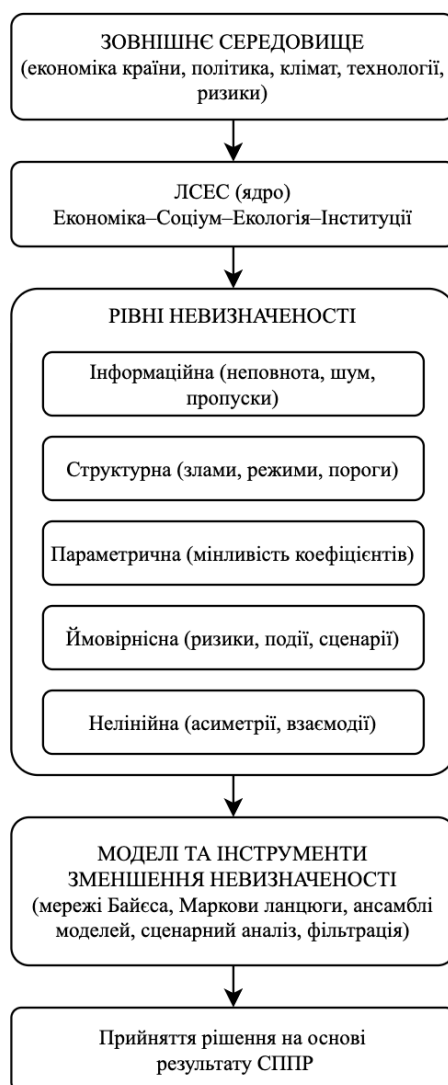


Рисунок 2.1 - Концептуальна модель багаторівневої розкриття невизначеності в процесі підтримки прийняття рішень стосовно розвитку ЛСЕС

Тому, концептуальна рамка невизначеності виступає методологічною основою для вибору інструментів моделювання розвитку ЛСЕС (ймовірнісно-статистичні, регресійні, когнітивні, гібридних моделей), оцінювання ризиків та

побудови інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень (СППР/ІСППР). Оскільки, невизначеність у моделях розвитку ЛСЕС має складну багаторівневу структуру, для її систематизації доцільно використовувати ієрархічну класифікацію, яка враховує джерело виникнення, рівень прояву в моделі та можливість її формалізації (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 - Пропонована класифікація невизначеностей, характерних для ЛСЕС (побудовано на основі [70-73])

Критерій класифікації	Тип невизначеності	Характеристика	Приклад для ЛСЕС
по відношенню до системи (джерелом виникнення)	Внутрішня (ендогенна)	причини: внутрішні процеси системи, управлінські рішення, структурні трансформації, розвитку	зміна структури статей бюджету громади, перерозподіл інвестицій
	Зовнішня (екзогенна)	вплив факторів зовнішнього середовища, що не контролюються системою	економічна криза, реформи, погіршення екології
за урахуванням у моделях	структурна	зміна функціональної форми залежностей, структурні злами	зміни у галузевій структурі економіки, виробничій спеціалізації
	параметрична	мінливість параметрів моделей у часі	інфляція, зміни підприємницьких очікувань, реформи
	статистична	неповнота, шум, аномалії та неспівставність даних	розбіжність даних, отриманих з різних джерел, зміни у статистичній методології, помилки під час збору та оброблення даних
	ймовірнісна	стохастичні події та ризику	різке падіння доходів населення та бізнесу
за можливістю формалізації	кількісно вимірювана	піддається математичному опису та статистичному оцінюванню	дисперсія, довірчі інтервали, ентропія
	частково вимірювана	оцінюється комбінацією статистичних і експертних методів	сценарії розвитку, структурні злами
	неформалізована (експертна)	не має повної кількісної інтерпретації, базується на експертних судженнях	політичні рішення, стратегічні пріоритети громади та регіону

За джерелом виникнення невизначеність поділяється на внутрішню (ендогенну), що формується всередині системи через взаємодію її підсистем, і зовнішню (екзогенну), яка обумовлена впливом макроекономічних, соціально-економічних, суспільно-політичних, кліматичних та глобальних факторів.

За рівнем моделі виділяють структурну, статистичну, параметричну та ймовірнісну невизначеність. Така диференціація дозволяє визначити, на якому етапі моделювання виникають основні ризики — під час формування структури моделі, оцінювання параметрів чи прогнозування.

За можливістю формалізації невизначеність може бути кількісно вимірюваною (наприклад, дисперсія похибки), частково вимірюваною (експертні оцінки) або нефіксованою формально (інституційні ризики, поведінкові фактори).

Така класифікація забезпечує методологічну основу для вибору відповідного інструментарію аналізу.

Структурна невизначеність виникає через неповноту знань щодо функціональної форми залежностей між змінними або через зміну структури системи в часі. У соціально-економічних процесах вона проявляється у зміні режимів розвитку, появі нових взаємозв'язків або зникненні старих, а також у порогових ефектах.

У контексті ЛСЕС структурна невизначеність може бути пов'язана зі зміною галузевої структури економіки громади (громад), що входить до складу ЛСЕС, трансформацією системи управління на місцевому чи регіональному рівнях, змінами у державній регіональній політиці. Такі зміни часто супроводжуються зламами трендів, що призводить до порушення припущень лінійності та стаціонарності.

Для врахування структурної невизначеності застосовуються моделі зі зміною режимів (Марковські моделі з перемикачами), порогові авторегресійні моделі, методи виявлення структурних зрушень (методи Бай-Перона) та динамічні байєсівські мережі (ДМБ) [74]. Використання цих інструментів дозволяє адаптувати модель до змін у структурі системи.

Таблиця 2.2 – Особливості урахування структурної невизначеності у дослідженні розвитку ЛСЕС

Компонент	Опис
Суть	Виникає через невідомість або зміну функціональної форми залежностей між змінними, трансформацію структури системи або появу нових факторів впливу.
Форми прояву	<ul style="list-style-type: none"> <li>- зміна економічних режимів (криза / зростання);</li> <li>- порогові ефекти (стабільність до певного рівня дефіциту бюджету);</li> <li>- структурні злами трендів;</li> <li>- латентні (приховані) стани системи</li> </ul>
Приклад для ЛСЕС	Зміна виробничої спеціалізації громад (громади), що входять до складу ЛСЕС, супроводжується зміною структури доходів, зайнятості населення, інвестиційної активності та екологічного навантаження.
Методи врахування	<ul style="list-style-type: none"> <li>- зміна економічних режимів (криза / зростання);</li> <li>- порогові ефекти (стабільність до певного рівня дефіциту бюджету);</li> <li>- структурні злами трендів;</li> <li>- латентні (приховані) стани системи</li> </ul>

Статистична невизначеність пов'язана з обмеженнями та недоліками емпіричних даних. Вона включає випадкові шуми, пропуски спостережень, короткі часові ряди, несинхронність джерел інформації та наявність аномальних значень.

В сучасних умовах українських регіонів та територіальних громад статистична невизначеність часто обумовлена різною періодичністю публікації показників, зміною методик розрахунку та неповнотою звітності. Це ускладнює побудову стабільних моделей і потребує додаткових процедур обробки даних.

Для зменшення статистичної невизначеності використовуються методи імпутації робастні оцінки, бутстреп-методи та фільтрація шумів (фільтр Калмана, EM-алгоритм, алгоритми машинного навчання, зокрема метод найближчих сусідів) [76]. Це дозволяє підвищити достовірність оцінок і точність прогнозів.

Таблиця 2.3 – Особливості урахування статистичної невизначеності у дослідженні розвитку ЛСЕС

Компонент	Опис
Суть	Пов'язана з якістю та повнотою даних, що використовуються для моделювання. Виникає через випадкові коливання, неточності вимірювання та обмеженість вибірки.
Основні прояви	<ul style="list-style-type: none"> <li>- шум («білий шум»);</li> <li>- пропуски у спостереженнях;</li> <li>- короткі часові ряди;</li> <li>- аномальні значення;</li> <li>- різна періодичність спостережень (місячні/квартальні/річні дані).</li> </ul>
Приклад для ЛСЕС	Несинхронність і розбіжність у наборах даних статистичних показників Державної служби статистики та даними, що оприлюднюються на рівні громад та районів та платформою E-Data, що ускладнює побудову узгоджених часових рядів.
Методи врахування	<ul style="list-style-type: none"> <li>- фільтрація (фільтр Калмана);</li> <li>- EM-алгоритм;</li> <li>- kNN-імпутація;</li> <li>- робастна регресія;</li> <li>- бутстреп-оцінювання.</li> </ul>

Параметрична невизначеність пов'язана з нестійкістю оцінок параметрів моделей у часі. У динамічному середовищі коефіцієнти регресії, еластичності або вагові коефіцієнти інтегральних індексів можуть змінюватися залежно від фази економічного циклу чи інституційних перетворень.

Наприклад, вплив інвестицій в економіку громади чи району на зайнятість населення може бути різним у періоди економічного підйому та спаду, а також на різних територіях. Якщо модель припускає сталість параметрів, вона може втратити прогностичну здатність.

Для врахування параметричної невизначеності застосовуються моделі з часово-змінними параметрами, моделі простору станів, байєсівське оновлення

параметрів, ланцюги Маркова та фільтр Калмана [76]. Такі підходи дозволяють адаптувати модель до еволюції системи.

Таблиця 2.4 – Особливості урахування параметричної невизначеності у дослідженні розвитку ЛСЕС

Компонент	Опис
Суть	Виникає через змінність параметрів моделі у часі. Коефіцієнти, оцінені на певному етапі розвитку системи, можуть втрачати актуальність у нових економічних або соціальних умовах.
Основні прояви	<ul style="list-style-type: none"> <li>– нестійкість коефіцієнтів регресії;</li> <li>– різна еластичність факторів у різні фази економічного циклу;</li> <li>– зміна ваг інтегрального індексу сталості залежно від пріоритетів розвитку громади;</li> <li>– дрейф параметрів у довгострокових прогнозах.</li> </ul>
Приклад для ЛСЕС	Вплив інвестицій на зайнятість може бути сильнішим у фазі зростання та слабшим у фазі стагнації, що змінює оцінені коефіцієнти моделі.
Методи врахування	<ul style="list-style-type: none"> <li>– моделі з часово-змінними параметрами</li> <li>– моделі простору станів);</li> <li>– байєсівське оновлення параметрів;</li> <li>– ланцюги Маркова</li> <li>– фільтр Калмана.</li> </ul>

Ймовірнісна невизначеність пов'язана з випадковими подіями та ризиками, що впливають на розвиток ЛСЕС. Вона охоплює економічні кризи, екологічні катастрофи, демографічні зрушення, політичні рішення та інші події, які неможливо передбачити детерміновано. Для сучасного стану соціально-економічних систем місцевого (локального) рівня такий тип невизначеності в значній мірі пов'язаний із ситуацією військового стану.

На відміну від статистичної невизначеності, що стосується якості даних, ймовірнісна невизначеність відображає майбутню варіативність розвитку. Її оцінювання здійснюється через побудову розподілів прогнозів, методи Монте-Карло, сценарний аналіз та марковські процеси [77]

У СППР ймовірнісна невизначеність трансформується в показники, що дозволяють оцінити ризики, і які становитимуть підґрунтя для прийняття управлінські рішення [79].

Таблиця 2.5 – Особливості урахування ймовірнісної невизначеності у дослідженні розвитку ЛСЕС

Компонент	Опис
Сутність	Пов'язана з випадковими подіями, ризиками та стохастичними збуреннями, що можуть суттєво змінювати траєкторію розвитку ЛСЕС. Характеризується неможливістю точного передбачення моменту та масштабу подій.
Типи ризиків	<ul style="list-style-type: none"> <li>– економічні (кризи, інфляція, коливання інвестицій);</li> <li>– демографічні (міграція, старіння населення);</li> <li>– екологічні (стихійні лиха, кліматичні зміни);</li> <li>– інституційні (реформи, регуляторні зміни);</li> <li>– геополітичні (воєнні дії, санкції, зміна зовнішньої політики).</li> </ul>
Приклад для ЛСЕС	Різде скорочення бюджетних надходжень через економічну кризу або зміна обсягів співфінансування закладів охорони здоров'я, соціальної сфери, відновлення автошляхів
Методи врахування	<ul style="list-style-type: none"> <li>– методи Монте-Карло;</li> <li>– сценарний аналіз (що-якщо, стрес-тестування);</li> <li>– мережі Байеса;</li> <li>– Value-at-Risk (VaR);</li> <li>– Ланцюги Маркова.</li> </ul>

У загальному випадку, модель розвитку ЛСЕС має вигляд:

$$Y_t = f(X_t, \theta_t, S_t) + \epsilon_t$$

де:  $X_t$  — вектор факторів;  $\theta_t$  — параметри (можуть бути часово-змінними);  $S_t$  — режим (прихований стан);  $\epsilon_t$  — випадкова складова.

У формалізованому вигляді, прояви невизначеностей різних типів, можуть бути пов'язані з окремими компонентами моделі розвитку ЛСЕС.

Так, структурна невизначеність проявляється у тому, що не відома або мінлива форма функціональної залежності  $f(\cdot)$ , а також у відсутності відомостей

щодо латентних станів системи  $S_t$ , які можуть відображати різні стани економіки: зростання, стагнація, криза, тощо.

Параметрична невизначеність пов'язана з нестабільністю параметрів моделі  $\theta_t$ , які можуть змінюватися у часі під впливом економічних циклів, інституційних трансформацій, зміни зовнішніх умов, внутрішніх зрушень.

Статистична невизначеність відображається у властивостях випадкової складової  $\varepsilon_t$ , що характеризує шум, помилки вимірювання, пропуски даних та інші стохастичні відхилення.

Ймовірнісна невизначеність пов'язана з розподілом майбутніх станів системи  $Y_{t+h}$ , тобто з варіативністю можливих траєкторій розвитку та ризиками настання подій, які можуть впливати на прогностні результати.

Таким чином, кожен тип невизначеності має свою формалізовану інтерпретацію в межах математичної моделі та потребує застосування відповідних методів оцінювання й врахування.

На рис. 2.2 представлено концептуальну взаємодію невизначеностей різних типів з основними етапами процесу моделювання розвитку ЛСЕС.

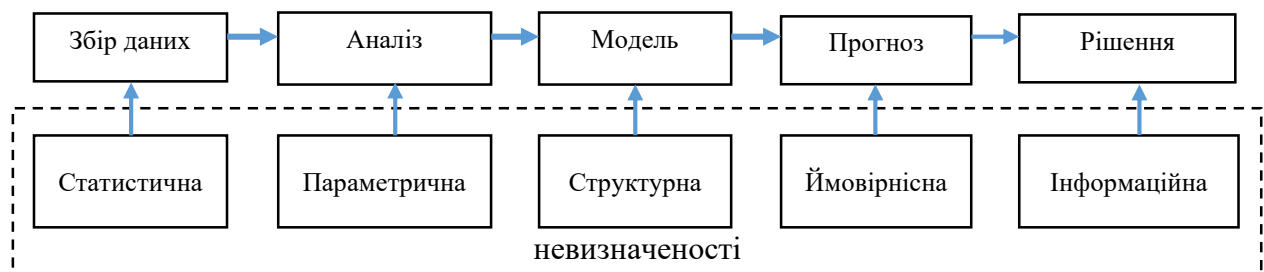


Рисунок 2.2 – Невизначеності різних типів на етапах підтримки прийняття рішень

У верхній частині схеми подано послідовність етапів підготовки рішення, коли дані, що описують проблему перетворюються у варіант рішення, пропонуваній для вирішення проблеми. Кожний з етапів характеризується наявністю невизначеностей різних типів. На схемі представлені ті, що найбільш характерні для кожного з етапів. Цей ланцюг схематично відображає аналітичний цикл у СППР [79].

Під кожним етапом розміщено відповідний тип невизначеності, що впливає саме на цей етап:

- статистична невизначеність впливає на блок «Дані» - (шум, пропуски, аномалії, несинхронність джерел).
- параметрична невизначеність пов'язана з етапом «Аналіз» - (невизначеність умов задачі, зміна параметрів).
- структурна невизначеність впливає на «Модель/побудова моделей» - (режимні зміни, порогові ефекти, структурні злами).
- ймовірнісна невизначеність проявляється на рівні «Прогноз» - (ризик, випадкові події, варіативність траєкторій розвитку).
- Інформаційна невизначеність ризик виникає на етапі «Рішення» - (відсутність повної інформації про розвиток подій, наслідки, тощо).

Вертикальні стрілки демонструють, що кожен тип невизначеності «піднімається» до відповідного етапу процесу. Таким чином, схема підкреслює, що невизначеність є не зовнішнім фактором, а інтегрованою складовою кожного кроку прийняття рішення.

## **2.2 Методика моделювання сталого розвитку ЛСЕС в умовах невизначеності**

Кількісна оцінка невизначеності є необхідною передумовою побудови моделей розвитку ЛСЕС. Вона дозволяє перейти від якісного опису соціально-економічних процесів, структурних змін, ризиків до їх формалізованого вимірювання та інтеграції у процес прогнозування і прийняття управлінських рішень.

У дослідженні ЛСЕС доцільно виділити три базові групи методів кількісної оцінки невизначеності: ентропійні, байєсівські та інтервальні.

Найпоширенішою оцінкою ентропії даних є показник ентропії Шеннона, який є фундаментальною мірою інформаційної невизначеності [53]:

$$H = -k \sum_{i=1}^n p_i \log(p_i) \quad (2.1)$$

де,  $k$  – додатній коефіцієнт, що враховує основу логарифму,  $p_i$  — ймовірність реалізації  $n$ -стану джерела інформації,  $n$  — кількість незалежних станів джерела інформації.

Інтерпретація показника здійснюється наступним чином: якщо один стан домінує ( $p \approx 1$ ), ентропія низька, то система передбачувана; якщо ймовірності рівномірні, ентропія максимальна, то – висока невизначеність.

Застосування даного показника в процесі моделювання сталого розвитку ЛСЕС здійснюється для:

- оцінювання інформаційної невизначеності даних, наприклад, визначення ступеня неоднорідності або нестабільності показників соціально-економічного розвитку громади (групи громад).
- визначення ваг індикаторів ( $w_i$ ) у інтегральних індексах, наприклад, за ентропійним методом ваги можна визначити як [130]:

$$w_i = \frac{1 - H_i}{\sum(1 - H_i)} \quad (2.2)$$

тобто, менш варіативні показники отримують меншу вагу.

- аналіз диверсифікації економіки ЛСЕС. Ентропія результатів господарської діяльності окремих галузей [81]:

$$H_{econ} = - \sum s_i \log s_i \quad (2.3)$$

де  $s_i$  — ймовірність частки галузі в економіці системи.

Тобто, висока ентропія - диверсифікована економіка, а значить і менший структурний ризик.

Байєсівська методологія дозволяє кількісно описати параметричну та ймовірнісну невизначеність. Основна формула [82]:

$$p(\theta|D) \propto p(D|\theta)p(\theta) \quad (2.4)$$

де,  $p(\theta)$  — апіорний розподіл;  $p(D|\theta)$  — правдоподібність;  $p(\theta|D)$  — апостеріорний розподіл параметрів.

Перевагами використання байєсівського підходу є:

- повний розподіл параметрів, а не лише точкові оцінки;
- довірчі (credible) інтервали;
- імовірнісні прогнози:

$$p(Y_{t+h}|D) \quad (2.5)$$

- можливість послідовного оновлення оцінок (байєсівський підхід).

У аналізі та моделюванні ЛСЕС байєсівські та ймовірнісні підходи застосовуються для оцінювання впливу інвестицій на зростання виробництва та зайнятість населення з урахуванням невизначеності параметрів; прогнозування бюджетних показників з урахуванням попередніх періодів, тощо, а також інтеграції експертних знань у модель, яка описує сталий розвиток ЛСЕС. Такий підхід підвищує адаптивність і обґрунтованість управлінських рішень, він особливо ефективний в умовах коротких вибірок і дефіциту даних.

Застосування інтервальних оцінок дозволяє кількісно оцінити варіативність прогнозу. Базова форма оцінки [83]:

$$\hat{Y}_t \pm z_{\alpha/2} \hat{\sigma} \quad (2.6)$$

де,  $\hat{Y}_t$  — точковий прогноз;  $\hat{\sigma}$  - стандартна помилка прогнозу;  $z_{\alpha/2}$  — квантиль нормального розподілу ля довірчого рівня  $1-\alpha$ .

У задачах моделювання ЛСЕС інтервальні та ймовірнісні підходи можуть використовуватися у бюджетному процесі, для формування демографічних прогнозів, оцінювання ризику виникнення бюджетного дефіциту та розробленні сценаріїв розвитку громад (у складі ЛСЕС), що дозволяє враховувати можливі відхилення та підвищувати обґрунтованість управлінських рішень в умовах невизначеності.

Для системного врахування невизначеності у моделях розвитку ЛСЕС доцільно застосовувати різні методи кількісної оцінки, кожен із яких

орієнтований на певний тип невизначеності та дає специфічний аналітичний результат.

Узагальнена порівняльна характеристика ключових підходів наведена в таблиці 2.6.

Таблиця 2.6 - Порівняльна характеристика методів урахування невизначеностей

Назв методу	Тип невизначеності	Результат
Ентропія	Інформаційна, структурна	Індекс невизначеності
Байєсівський підхід	Параметрична, ймовірнісна	Розподіл параметрів
Інтервальні прогнози	Прогнозна	Діапазон можливих значень

Як видно з таблиці 2.6, кожен метод орієнтований на різний аспект невизначеності та формує аналітичні результати різного типу: від індексної оцінки інформаційної неоднорідності до повного ймовірнісного опису параметрів і прогнозних інтервалів. Комплексне застосування цих підходів дозволяє побудувати багаторівневу систему оцінювання ризиків та невизначеності, що є необхідною умовою створення адаптивної інформаційної технології моделювання сталого розвитку ЛСЕС.

### **2.3 Моделі та методи ідентифікація нелінійності та нестационарності процесів розвитку ЛСЕС**

Динаміка ЛСЕС формується під впливом багатofакторного середовища, що характеризується часовою мінливістю, нерівномірністю та складною структурою взаємозв'язків між підсистемами. Внаслідок цього процеси соціально-економічного розвитку територіальних громад і регіонів частіше всього не відповідають припущенням класичних стаціонарних лінійних моделей.

Їхня поведінка характеризується нестационарністю, перемиканням режимів функціонування, тобто, є нелінійною. Є потреба застосування спеціалізованих процедур ідентифікації досліджуваних процесів перед побудовою прогнозних моделей.

Нестационарність [84] означає зміну статистичних характеристик процесу у часі — середнього значення, дисперсії, автокореляційної структури або спектральних властивостей. У контексті ЛСЕС це може проявлятися у:

- довгострокових трендах (економічне зростання або спад);
- змінах сезонності (наприклад, за наявності значної частки сільськогосподарського виробництва, туризму у галузевій структурі складових ЛСЕС);
- зростанні або зменшенні волатильності бюджетних надходжень;
- зміні структури кореляцій між показниками.

Наприклад, бюджетна стійкість громади може демонструвати стаціонарну поведінку у період стабільності, але переходити до нестационарного режиму під час економічної кризи або змін у законодавства, зокрема, податковому або щодо формування бюджетів рівних рівнів.

На рис. 2.3 зображено концептуальну структуру нестационарності часового ряду як багатовимірного явища, що може проявлятися через різні компоненти динаміки соціально-економічних показників [84, 85].

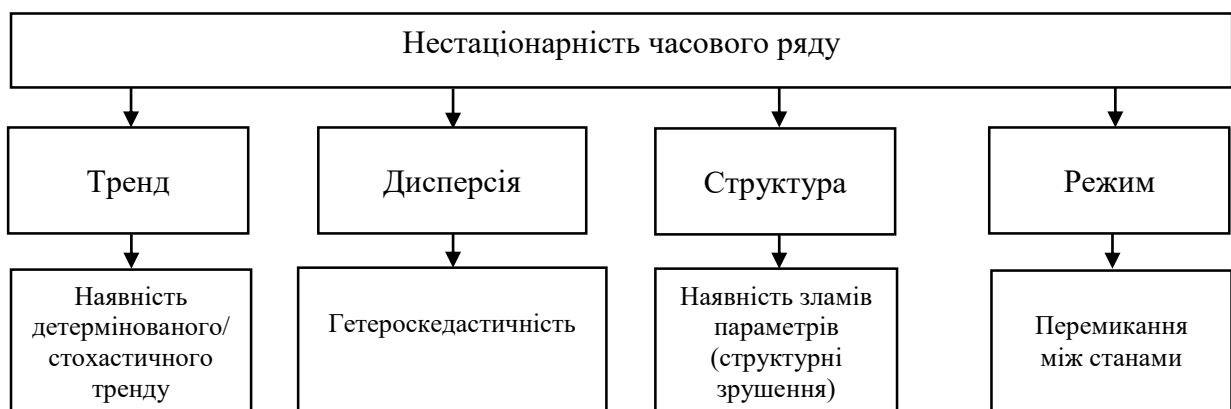


Рисунок 2.3 - Концептуальна структура нестационарності часового ряду як багатовимірного явища, характерного для динаміки ЛСЕС

У верхній частині рис. 2.3 розташовано узагальнююче поняття — «Нестационарність часового ряду» [86], яке виступає вихідною характеристикою динамічного процесу.

Далі нестационарність декомпонується на чотири основні складові [86]:

- тренд - відображає наявність детермінованого або стохастичного тренду, що означає, що середній рівень ряду змінюється з часом, що характерно для економічного зростання, демографічних процесів або бюджетної динаміки.
- дисперсія - пов'язана з гетероскедастичністю — змінністю варіації показника у часі. Це проявляється у зростанні або зменшенні волатильності, що є типовим для кризових періодів.
- структура - характеризується наявністю структурних зламів параметрів - йдеться про зміну функціональних залежностей або коефіцієнтів моделі, наприклад, унаслідок реформ чи економічних трансформацій.
- режим - відображає перемикання між станами системи (наприклад, «зростання – спад», «стабільність – криза»), що описується моделями перемикання режимів або марковськими моделями.

Ігнорування нестационарності призводить до псевдорегресій, нестійких коефіцієнтів та некоректних прогнозів.

Нелінійність [87] означає, що залежність між змінними не може бути адекватно описана лінійною функцією. У ЛСЕС нелінійні ефекти виникають через:

- порогові явища (наприклад, перевищення критичного рівня безробіття);
- асиметричні реакції на позитивні та негативні шоки;
- ефекти насичення;
- взаємодію підсистем (економіка - соціальна сфера- екологія).

Наприклад, зростання інвестицій у громаду може стимулювати зайнятість лише до певного рівня інституційної спроможності. Після досягнення порогу, ефективність інвестицій може зменшуватися через обмеження інфраструктури або кадрового потенціалу.

Нелінійність також може проявлятися у накопичувальних ефектах [86, 87], коли історичні рішення визначають майбутню траєкторію розвитку ЛСЕС.

Структурні зрушення є ключовою характеристикою динаміки ЛСЕС [88]. Вони можуть бути спричинені, наприклад:

- адміністративно-територіальною реформою;
- зміною податкової політики;
- кризами;
- зовнішніми шоками;
- зміною виробничої спеціалізації складових ЛСЕС;
- демографічними змінами.

Структурні зрушення означають, що параметри моделі до та після певного моменту часу істотно відрізняються. Це може стосуватися як середнього рівня показника, так і його варіативності чи чутливості до факторів.

У більш складних випадках система переходить між прихованими режимами (наприклад, «стабільність», «криза», «відновлення»), що потребує застосування моделей зі зміною режимів, зокрема марковських.

Нестационарність є однією з ключових характеристик соціально-економічних часових рядів [89]. Більшість макроекономічних та регіональних показників (ВВП, ВРП, доходи бюджету, інвестиції, демографія, тощо) демонструють трендову або структурну мінливість, що порушує умови класичних регресійних моделей.

Формально стаціонарний процес  $Y_t$  задовольняє умови [90]:

1.  $E(Y_t) = \mu = const$
2.  $Var(Y_t) = \sigma^2 = const$
3.  $Cov(Y_t, Y_{t-k}) = f(k)$

Якщо, хоч одна з умов порушується, ряд є нестационарним.

Для ідентифікації нестационарності застосовують [90]:

1. ADF-тест (розширений тест Дікі-Фулера):

$$\Delta Y_t = \alpha + \gamma Y_{t-1} + \sum_{i=1}^p \beta_i \Delta Y_{t-1} + \varepsilon_t \quad (2.7)$$

де:  $\Delta Y_t = Y_t - Y_{t-1}$ .  $\alpha$  – константа,  $\gamma$  — параметр перевірки на одиничний корінь,  $p$  — кількість лагів різниці для усунення автокореляції залишків,  $\varepsilon_t$  - випадкова помилка.

Гіпотези:

$H_0$  :  $\gamma = 0$ , (наявність одиничного кореня  $\rightarrow$  нестационарність)

$H_1$  :  $\gamma < 0$ , (ряд стаціонарний)

Якщо статистика тесту менше критичного значення, то гіпотезу  $H_0$  відхиляємо.

Наприклад, для ЛСЕС, якщо тест застосувати до ряду доходів бюджету громади, часто отримується  $I(1)$ -процес, що означає необхідність диференціювання перед побудовою ARIMA-моделі.

2. тест Філіпса-Перона (PP) є модифікацією теста Дікі-Фулера, яка коригує стандартні помилки на автокореляцію та гетероскедастичність без додавання лагів у модель [90].

$$\Delta Y_t = \alpha + \beta t + \gamma Y_{t-1} + \varepsilon_t \quad (2.8)$$

де,  $\Delta Y_t = Y_t - Y_{t-1}$ .  $\alpha$  – константа,  $\gamma$  — параметр перевірки на одиничний корінь,  $\varepsilon_t$  - випадкова помилка.

Але корекція відбувається через зміну статистики тесту.

Переваги: робастність до гетероскедастичності, менша чутливість до вибору лагів.

Наприклад, для екологічних показників (викиди  $CO_2$ ) PP-тест часто показує кращу стабільність оцінок, ніж ADF [90].

3. KPSS-тест (тест Квятковськи-Філіпс-Шмідт-Шін)

На відміну від ADF та PP, KPSS перевіряє протилежну гіпотезу.

$$Y_t = r_t + \beta t + \varepsilon_t \quad (2.9)$$

де:  $r_t$  — випадковий блукаючий процес.  $B_t$  – детермінований тренд,  $\varepsilon_t$  – стаціонарний шум

## Гіпотези

- $H_0$ : ряд стаціонарний (навколо тренду)
- $H_1$ : ряд має одиничний корінь - нестаціонарний

## Логіка використання

- ADF: перевіряє наявність одиничного кореня
- KPSS: перевіряє стаціонарність

Спільне використання тестів зменшує ризик помилкової класифікації.

Таблиця 2.7 - Комплементарний підхід: поєднання ADF та KPSS

Перевірка гіпотез тестами:		Висновок
ADF:	KPSS:	
не відхиляє $H_0$	відхиляє $H_0$	I(1), нестаціонарний
відхиляє $H_0$	не відхиляє $H_0$	I(0), стаціонарний
не відхиляє $H_0$	не відхиляє $H_0$	Невизначеність, потребує додаткових тестів
відхиляє $H_0$	відхиляє $H_0$	Можливі структурні злами

Процеси розвитку ЛСЕС не часто є стабільними у довгостроковому періоді. Реформи децентралізації, зміни ринкових тенденцій, зміни у формуванні бюджетів, міграційні хвилі, воєнні події, пандемії, кліматичні зміни, або енергетичні кризи призводять до структурних змін у параметрах моделей. Якщо такі зрушення не враховуються, оцінки параметрів стають зміщеними, а прогнози — нестабільними.

Формально, структурні зрушення означають, що  $\theta_t \neq \theta_{t+k}$ , тобто параметри моделі змінюються після певного моменту часу  $T_b$ .

4. Тест Чоу (заданий момент зламу) [93], його ідея полягає у перевірці гіпотези про стабільність параметрів до і після певної дати  $T_b$ , яка визначається дослідником (наприклад, 2015 рік — початок бюджетної децентралізації).

Нехай базова модель регресії, має вигляд:

$$Y_t = X_t\beta + \varepsilon_t \quad (2.10)$$

Дані діляться на два підперіоди: до  $T_b$  та після  $T_b$ .

Обчислюється F-статистика [94]:

$$F = \frac{(RSS_p - (RSS_1 + RSS_2))/k}{(RSS_1 + RSS_2)/(n - 2k)} \quad (2.11)$$

де,  $RSS_p$  — залишкова сума квадратів для об'єднаної вибірки, а  $RSS_1, RSS_2$  — для підвбірок,  $k$  — кількість параметрів у моделі,  $n$  — загальна кількість спостережень у всій вибірці [94].

Гіпотези

- $H_0$ : параметри стабільні
- $H_1$ : існує структурний злам

Наприклад, перевірка впливу інвестицій на зайнятість до і після 2020 року. Якщо Chow-тест значущий — модель повинна враховувати зміну коефіцієнтів.

5. Тест Квандта-Ендрюса (Quandt–Andrews test) (невідомий момент зламу). Проблемним є те, що у реальних умовах момент зламу невідомий. Рішення: тест проводить серію Чоу-тестів для всіх можливих точок розбиття (крім крайніх 10–15% вибірки) [95].

Обчислюється за формулою:

$$SupF = \max_{T_b} F(T_b) \quad (2.12)$$

де,  $F(T_b)$  - F –статистика, обчислена для конкретної точки можливого зламу  $T_b$ ,  $T_b$  – кандидат на момент структурного зламу,  $\max_{T_b}$  - означає, що розглядаємо найбільше серед  $F$ . Тобто береться максимальне значення F-статистики [95].

Переваги: не потребує апріорного знання дати зламу, дає оцінку ймовірного моменту структурної трансформації.

Наприклад, виявлення моменту різкої зміни бюджетних надходжень громади без попереднього знання причини.

6. Процедура Бай-Перрон (множинні злами) [96] застосовується у випадку, коли у складних системах може бути кілька структурних зламів.

Модель з  $m$  зламами [96]:

$$Y_t = X_t \beta_t + \varepsilon_t, T_{j-1} < t \leq T_j, j = 1, \dots, m+1, \quad (2.13)$$

де,  $Y_t$  - залежна змінна,  $X_t$  — матриця незалежних змінних,  $\beta_j$  — вектор параметрів у  $j$ -му сегменті,  $\varepsilon_t$  — випадкова помилка,  $T_j$  — точки структурних зламів ( $T_0=0$ ,  $T_{m+1} = n$ ). Для кожного проміжку між точками зламу параметри  $\beta_j$  можуть відрізнятися.

Процедура Бай-Перрона мінімізує глобальну суму квадратів залишків [96]:

$$\min_{T_1, \dots, T_m} \sum_{j=1}^{m+1} \sum_{t=T_{j-1}+1}^{T_j} (y_t - X_t \widehat{\beta}_j)^2 \quad (2.14)$$

де  $\widehat{\beta}_j$  — оцінка параметрів у  $j$ -му сегменті після визначення точок зламу

Визначення кількості структурних зламів у часових рядах здійснюється за допомогою інформаційних та послідовних статистичних критеріїв. Найчастіше застосовуються інформаційний критерій Байєса, критерій Лью-Ву-Зідека (Liu–Wu–Zidek (LWZ), а також послідовні тести (SupF - Sequential SupF tests) [97], які дозволяють поетапно перевіряти наявність одного чи кількох зламів у моделі. Інформаційні критерії дають змогу обрати оптимальну кількість точок розриву шляхом мінімізації функції втрат із урахуванням складності моделі, тоді як послідовні тести порівнюють гіпотези щодо збільшення числа зламів.

У контексті ЛСЕС це має практичне значення для аналізу динаміки бюджетних показників громади. Наприклад, для багатьох громад можна очікувати перший структурний злам у 2016 році, пов'язаний із реформами децентралізації, другий — у 2020 році через пандемію COVID-19, і третій — у 2022 році внаслідок воєнних подій та змін у бюджетній політиці. Процедура Бай-Перрона дозволяє формально ідентифікувати ці точки як статистично значущі злами параметрів моделі, що забезпечує коректне подальше моделювання та прогнозування розвитку ЛСЕС та громад і районів у їх складі.

7. Тести CUSUM та CUSUMSQ (стабільність параметрів) [48] - аналізують кумулятивні суми залишків.

Формула CUSUM:

$$CUSUM = \sum_{r=k+1}^t \frac{w_r}{s}, \quad t = k+1, \dots, n \quad (2.15)$$

де  $w_r$  — залишки регресії на момент  $r$ , (різниця між спостереженим і прогнозованим значенням);  $s$  — стандартне відхилення залишків;  $k$  — кількість початкових спостережень, які використовуються для оцінки початкових параметрів моделі;  $n$  — кількість спостережень,  $t$  — поточний момент часу (індекс спостереження).

Якщо траєкторія виходить за довірчі межі, маємо нестабільність параметрів.

CUSUM-SQ - аналізує кумулятивну суму квадратів залишків:

$$CUSUMSQ = \sum_{r=k+1}^t \frac{w_r^2}{\sum_{r=k+1}^n w_r^2} \quad (2.16)$$

де,  $w_r^2$  — квадрат залишків від регресії на момент  $r$ , (різниця між спостереженим і прогнозованим значенням);  $s$  — стандартне відхилення залишків;  $k$  — кількість початкових спостережень, які використовуються для оцінки початкових параметрів моделі;  $n$  — кількість спостережень,  $t$  — поточний момент часу (індекс спостереження) [48].

Для коректного моделювання соціально-економічної динаміки ЛСЕС важливо не лише встановити факт наявності структурних змін, але й визначити їх кількість, характер та момент виникнення. Різні статистичні методи мають різну чутливість до типу зламу, кількості розривів та необхідності попереднього знання дати структурної трансформації. Порівняльна характеристика основних підходів дозволяє обґрунтовано обрати інструментарій залежно від специфіки даних і дослідницької задачі (табл. 2.8).

Таблиця 2.8 - Порівняльна характеристика основних підходів опрацювання структурних зрушень при моделюванні ЛСЕС

Метод	Кількість зламів	Потрібна дата зламу	Тип перевірки
Чоу	1	Так	Жорсткий розрив
Квандта-Ендрюса	1	Ні	Пошук максимуму F
Бай-Перрона	декілька	Ні	Глобальна оптимізація
CUSUM	Невизначена	Ні	Графічна стабільність

Аналіз представлених методів показує, що вибір процедури діагностики залежить від структури часових рядів та поставленої задачі. Якщо момент зламу відомий (наприклад, адміністративна реформа), доцільним є застосування тесту Чоу. У випадку невідомої дати трансформації більш інформативними є тест Квандта-Ендрюса або процедура Бай-Перрона, яка дозволяє виявляти множинні структурні злами. Методи CUSUM та CUSUMSQ доповнюють формальні тести, забезпечуючи графічну оцінку стабільності параметрів та можливість виявлення поступової деградації моделі або зміни дисперсії.

Нелінійність є характерною рисою соціально-економічних процесів. Взаємодія між економічними, соціальними та екологічними підсистемами часто має пороговий, асиметричний або режимний характер. Наприклад, вплив інвестицій на розвиток виробництва може бути різним у фазі економічного зростання та у фазі стагнації, а екологічні витрати можуть мати нелінійний ефект після досягнення певного рівня навантаження [48].

Якщо нелінійність ігнорується, побудовані лінійні моделі можуть давати зміщені оцінки та нестійкі прогнози. Тому перед вибором класу моделі необхідно провести формальну діагностику.

1. Тест Брока-Дечерта-Шейкмана (BDS-тест - Brock–Dechert–Scheinkman) [98] використовується для перевірки незалежності та однаковості розподілу залишків моделі. Він дозволяє виявити приховану нелінійну структуру у часовому ряду.

Ідея тесту полягає в тому, що якщо залишки лінійної моделі є незалежними та ідентично розподіленими, то просторові кореляції у вкладених вимірах відсутні.

Статистика тесту:

$$BDS = \frac{C_m(\epsilon) - C_1(\epsilon)^m}{\sigma_m} \quad (2.17)$$

де,  $C_m(\epsilon)$ — кореляційний інтеграл у  $m$ -вимірному просторі,  $\sigma_m$  — стандартна похибка для виміру  $m$ ,  $m$ - розмірність простору,  $\epsilon$  – радіус, в межах якого порівнюється точка,  $C_1(\epsilon)^m$ — очікуване значення кореляційного інтеграла для незалежних та однаково розподілених випадкових величин ряду, піднятого до степеня  $m$ .

Наприклад, після оцінки лінійної регресії впливу інвестицій на ВРП залишки можуть демонструвати нелінійну залежність, що сигналізує про необхідність застосування порогової або марковської моделі.

2. тест Цая (Tsay-test, TAR- впорядкований авторегресійний тест) [94] спрямований на виявлення порогових ефектів у авторегресійних моделях.

Модель TAR [94]:

$$Y_t = \begin{cases} \phi_1 Y_{t-1} + \varepsilon_t, & Y_{t-d} \leq \gamma \\ \phi_2 Y_{t-1} + \varepsilon_t, & Y_{t-d} > \gamma \end{cases} \quad (2.18)$$

де  $Y_t$  — значення часового ряду в момент  $t$ ,  $Y_{t-1}$  — лаг ряду (тут AR(1)),  $\varepsilon_t$  — випадкова складова,  $Y_{t-d}$  — порогова змінна (може бути лаг самого ряду або інша змінна),  $d$  — затримка для порогової змінної,  $\gamma$  — порогове значення, що визначає режим,  $\phi_1, \phi_2$ — коефіцієнти для двох режимів.

Tsay-тест перевіряє гіпотезу  $\phi_1 \neq \phi_2$ :

$H_0$ :  $\phi_1 = \phi_2$ : лінійна AR-модель достатня

$H_1$ :  $\phi_1 \neq \phi_2$ : існує порогова структура

Наприклад, вплив податкових надходжень на зайнятість може змінюватися після перевищення певного бюджетного порогу.

3. Тест Рамсея (RESET-тест - Ramsey Regression Specification Error Test) [99] перевіряє правильність функціональної форми моделі.

До базової регресії додаються степеневі функції прогнозних значень:

$$Y_t = X_t + \alpha_1 \widehat{Y}_t^2 + \alpha_2 \widehat{Y}_t^3 + \varepsilon_t \quad (2.19)$$

де  $Y_t$  — залежна змінна у момент часу  $t$ ,  $X_t$  — базова лінійна регресія з незалежними змінними  $X_t$ ,  $\widehat{Y}_t$  — прогнозоване значення з базової регресії,  $\widehat{Y}_t^2$ ,  $\widehat{Y}_t^3$  — додані поліноми прогнозу для перевірки нелінійної специфікації,  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  — коефіцієнти поліномів, які перевіряються,  $\varepsilon_t$  — випадкова складова.

Гіпотеза:

- $H_0$ : модель правильно специфікована
- $H_1$ : пропущено нелінійні компоненти

Інтерпретація: якщо додаткові степені значущі, то модель не правильно специфікована.

#### 4. Порівняння інформаційних критеріїв [94, 99]

Нелінійність також може бути виявлена шляхом порівняння:

- лінійної AR-моделі,
- TAR/STAR,
- Марковські моделі з перемиканням станів,
- нейромережевої моделі.

Використовуються критерії:

- Акайке (AIC) [94]:

$$AIC = 2k - 2 \ln(L) \quad (2.20)$$

де  $k$  — кількість оцінюваних параметрів у моделі,  $L$  — функція правдоподібності оціненої моделі.

- Байєса-Шварца (BIC) [94]:

$$BIC = k \ln(n) - 2 \ln(L) \quad (2.21)$$

де  $k$  — кількість оцінюваних параметрів у моделі,  $L$  — функція правдоподібності оціненої моделі,  $n$  — кількість спостережень.

Якщо нелінійна модель має значно менші АІС/ВІС, це свідчить про кращу специфікацію.

Практичне значення виявлення нелінійності для дослідження ЛСЕС полягає у можливості обґрунтованого переходу від спрощених лінійних моделей до більш адекватних інструментів аналізу динаміки розвитку. Якщо результати діагностики свідчать про наявність порогових ефектів або режимних змін, замість класичних АRІМА-моделей доцільно застосовувати порогові специфікації типу TAR або марковські моделі з перемиканням станів, які дозволяють враховувати перемикання між станами системи. У випадках складної багатофакторної взаємодії підсистем ефективними є нейромережеві підходи, а поєднання кількох класів моделей формує основу гібридних систем підтримки прийняття рішень (ГСППР).

У контексті ЛСЕС нелінійність може проявлятися в різних формах. Зокрема, екологічні витрати часто зростають непропорційно після перевищення критичного рівня антропогенного навантаження, що свідчить про експоненційний характер залежності. Демографічні процеси можуть демонструвати асиметричну реакцію на економічні шоки, коли спад зайнятості викликає значно сильніший відтік населення, ніж аналогічне зростання стимулює повернення мігрантів. Аналогічно, бюджетні дефіцити здатні спричиняти нелінійні ефекти у фінансовій стабільності громади, коли перевищення певного порогу різко погіршує кредитоспроможність та інвестиційну привабливість. Таким чином, врахування нелінійності є необхідною умовою побудови адекватних моделей розвитку ЛСЕС та підвищення якості управлінських рішень.

Коректний вибір моделі для аналізу динаміки ЛСЕС неможливий без системної процедури ідентифікації властивостей часового ряду. Соціально-економічні показники можуть одночасно містити тренд, сезонність, структурні зміни, змінну дисперсію та нелінійні залежності, тому їх діагностика повинна здійснюватися у чітко визначеній послідовності. Такий алгоритм забезпечує

перехід від емпіричного спостереження до формалізованого вибору адекватної моделі [100].

#### Етап 1. Попередній аналіз ряду

Виконується графічна візуалізація динаміки показника (лінійні графіки, сезонні діаграми, ковзні середні/дисперсія), а також розрахунок описової статистики: середнього значення, дисперсії, коефіцієнтів асиметрії та ексцесу.

Мета етапу — виявити:

- наявність тренду або сезонності;
- можливі аномальні значення;
- зміну дисперсії;
- потенційні точки структурного перелому.

У контексті ЛСЕС це дозволяє попередньо оцінити, наприклад, стабільність бюджетних доходів або динаміку зайнятості населення.

#### Етап 2. Перевірка стаціонарності

Застосовуються тести ADF, PP та KPSS для визначення порядку інтегрованості процесу  $I(d)$ . Якщо ряд є нестаціонарним, виконується диференціювання або декомпозиція (сезонна або трендова декомпозиція (STL), фільтр Ходріка-Персона (HP-фільтр)) [101].

Результатом є встановлення типу процесу:

- $I(0)$ — стаціонарний;
- $I(1)$ — потребує диференціювання;
- наявність трендової стаціонарності.

#### Етап 3. Аналіз гетероскедастичності

Після усунення тренду перевіряється стабільність дисперсії залишків. Застосовуються:

- ARCH-LM тест;
- тест Бройша–Пагана;
- тест Уайта.

Якщо виявлено змінну дисперсію, доцільним є використання ARCH/GARCH або стохастичних моделей волатильності. Для ЛСЕС це особливо

актуально при аналізі нестабільних економічних показників (інвестиції, податкові надходження).

Етап 4. Тестування структурних зламів - перевіряється стабільність параметрів у часі за допомогою [48, 94, 100]:

- Чоу-тест (для відомої дати);
- Тест Квандта–Ендрюса (невідомо дата);
- Тест Бай-Перрон (множинні злами);
- CUSUM та CUSUMSQ (графічна стабільність).

Цей етап дозволяє ідентифікувати періоди реформ, криз або інституційних трансформацій, що змінюють поведінку системи.

Етап 5. Перевірка нелінійності передбачає застосування [48, 94]:

- тест Брока, Дечерта, Шайнкмана (BDS-тест);
- тест Цая;
- тест Рамсея (RESET);
- порівняння AIC/BIC для альтернативних моделей.

Якщо нелінійність підтверджується, лінійні моделі вважаються недостатніми [94].

Етап 6. Вибір класу моделі [94, 100]

На основі результатів попередніх етапів визначається оптимальний клас моделі (табл 2.9):

Таблиця 2.9 – Рекомендовані до застосування моделі, відповідно до типу нелінійності

Виявлена властивість	Рекомендована модель
I(1) без зламів	ARIMA
Змінна дисперсія	GARCH
Структурні злами	TVP або Bai–Perron
Режимні переходи	Марковські моделі з перемиканням режимів
Порогові ефекти	TAR/STAR
Складна нелінійність	LSTM / гібридні моделі

Послідовність «аналіз – тестування – специфікація» дозволяє уникнути спуріозних регресій, перенавчання моделей та помилкових прогнозів [102]. Вона формує логічний міст між емпіричними даними та побудовою інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень.

Запропонована методологічна процедура забезпечує науково обґрунтований вибір моделі, що враховує властивості динаміки ЛСЕС та рівень невизначеності середовища.

Ідентифікація нестаціонарності та нелінійності є необхідною передумовою побудови адекватних моделей сталого розвитку ЛСЕС. Соціально-економічна динаміка характеризується режимними переходами, структурними зламами та асиметричними реакціями системи на зовнішні впливи. Використання комплексу статистичних тестів та аналітичних процедур дозволяє визначити тип процесу і забезпечити обґрунтований вибір методів моделювання — від класичних ARIMA до марковських і нейромережевих моделей. Це створює методологічну основу для формування адаптивної системи прогнозування в умовах невизначеності.

## **2.4 Методологія підготовки даних для моделювання сталого розвитку ЛСЕС**

Якість прогнозних моделей у СППР безпосередньо залежить від якості вхідних даних. У контексті моделювання сталого розвитку ЛСЕС підготовка даних є критично важливим етапом, оскільки соціально-економічна інформація часто характеризується різномірністю, різною періодичністю спостережень, пропусками, неспівставністю, наявністю аномальних значень, тощо.

Методологія підготовки даних включає комплекс процедур нормалізації, очищення, імпутації, синхронізації та формування стандартизованих вибірок для подальшого аналізу та прогнозування [48].

Соціально-економічні показники мають різні одиниці вимірювання (грн, %, осіб, тони, км<sup>2</sup>, тощо), що унеможлиблює їх безпосереднє порівняння та

агрегування. Для забезпечення зіставності застосовуються процедури масштабування, такі, як: Min–Max нормалізація, стандартизація (z-score), ранжування та робастне масштабування [48].

Min–Max нормалізація — це метод масштабування даних, який перетворює значення показника до заданого інтервалу, зазвичай  $[0,1]$ , шляхом лінійного перетворення на основі мінімального та максимального значень вибірки. У результаті найменше значення ознаки відповідає 0, найбільше — 1, а всі інші значення пропорційно розподіляються між ними. [48, 94]

$$X' = \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \quad (2.22)$$

Основною перевагою Min–Max нормалізації є збереження відносних пропорцій між значеннями, що дозволяє коректно відображати структуру даних без спотворення взаємозв'язків між об'єктами. Це особливо важливо при побудові інтегральних індексів, багатокритеріальних оцінок або агрегованих показників, де кожна ознака повинна мати однаковий масштаб і вплив.

Разом з тим, метод має суттєвий недолік — високу чутливість до викидів. Якщо у вибірці присутні аномально великі або малі значення, вони можуть значно змінити діапазон масштабування, що призводить до «стискання» більшості даних у вузькому інтервалі.

Стандартизація (z-score) — це метод перетворення даних, при якому значення кожної ознаки центруються відносно середнього та масштабуються відповідно до стандартного відхилення. У результаті перетворення середнє значення ознаки стає рівним нулю, а стандартне відхилення — одиниці, що забезпечує уніфікований масштаб для всіх змінних [48].

$$Z = \frac{X - \mu}{\sigma} \quad (2.23)$$

де,  $\mu$  — середнє значення,  $\sigma$  — стандартне відхилення [48].

Суть методу полягає у вимірюванні того, на скільки стандартних відхилень конкретне значення відхиляється від середнього значення вибірки. Це дозволяє інтерпретувати дані у відносних одиницях та порівнювати ознаки, які спочатку мали різні масштаби та одиниці вимірювання.

Основною перевагою стандартизації є усунення впливу масштабу ознак, що є критично важливим для багатьох алгоритмів аналізу даних. Зокрема, цей підхід ефективно використовується у методах, що базуються на відстанях або варіації даних, таких як метод головних компонент (PCA) та алгоритми кластеризації.

Водночас, хоча стандартизація менш чутлива до викидів порівняно з Min–Max нормалізацією, вона все ж може зазнавати впливу екстремальних значень, оскільки середнє та стандартне відхилення змінюються під їх впливом.

Ранжування та робастне масштабування — це підходи до нормалізації даних, які орієнтовані на зменшення впливу викидів та асиметрії розподілу. Вони базуються не на крайніх значеннях або середньому, а на більш стійких статистиках, таких як медіана та міжквартильний розмах (IQR), що робить їх більш надійними для реальних даних із шумом та аномаліями [48].

$$X' = \frac{X - median}{IQR} \quad (2.24)$$

де IQR — міжквартильний розмах [146].

Робастне масштабування передбачає центрування даних відносно медіани та масштабування за допомогою міжквартильного розмаху (IQR), який визначається як різниця між 75-м та 25-м процентилями. Такий підхід дозволяє зберегти структуру основної маси даних, ігноруючи вплив екстремальних значень.

Ранжування, у свою чергу, полягає у заміні значень ознаки їх порядковими номерами (рангами) у відсортованому наборі даних. Це дозволяє перейти від абсолютних значень до відносного порядку, що є корисним у випадках, коли важлива не величина, а позиція об'єкта відносно інших.

Основною перевагою цих підходів є їх стійкість до викидів та здатність коректно працювати з асиметричними та ненормальними розподілами. Вони дозволяють уникнути спотворення даних, яке виникає при використанні класичних методів нормалізації в умовах шуму або екстремальних значень.

До недоліків можна віднести втрату інтерпретованості абсолютних значень (особливо у випадку ранжування), а також можливу втрату інформації про реальні відстані між спостереженнями.

У соціально-економічних даних пропуски є типовим явищем, що виникає внаслідок затримок у звітності, змін методології збору даних, різної періодичності публікацій, а також через технічні або організаційні обмеження. Наявність пропущених значень у часових рядах ускладнює проведення аналізу, знижує точність моделей та може призводити до викривлення результатів. У цьому контексті імпутація виступає ключовим етапом попередньої обробки даних, спрямованим на відновлення повних та узгоджених часових рядів.

Заповнення (імпутація) пропусків [48] — це процес заміни відсутніх значень оціненими або апроксимованими значеннями на основі наявної інформації. Вибір методу імпутації залежить від природи даних, структури пропусків (випадкові чи систематичні), а також від вимог до точності та інтерпретованості результатів.

Згладжування Калмана (Kalman Smoothing) [103] — це розширення методу фільтрації Калмана, яке використовується в рамках моделей простору станів для оцінювання прихованих (латентних) станів системи з урахуванням усіх доступних спостережень (як минулих, так і майбутніх). На відміну від фільтрації, яка оцінює стан у момент часу  $t$  лише на основі даних до  $t$ , згладжування дозволяє отримати більш точні оцінки, використовуючи всю часову послідовність.

Цей підхід особливо ефективний для відновлення пропущених значень у часових рядах, оскільки дозволяє інтерполювати дані, враховуючи динаміку процесу, шум вимірювань та приховану структуру системи.

Математична постановка моделі у просторі станів наступна. Модель описується двома основними рівняннями [48, 103]:

- рівнянням стану (динаміка системи):

-

$$x_t = Ax_{t-1} + w_t \quad (2.25)$$

де,  $A$  — матриця переходу станів (як поточний стан залежить від попереднього),  $w_t$  —  $N(0, Q)$  шум процесу, який моделює невраховану динаміку,  $x_t$  — прихований стан у момент часу  $t$

- рівнянням спостереження:

$$y_t = Hx_t + v_t \quad (2.26)$$

де,  $H$  — матриця спостереження, яка пов'язує стан і вимірювання,  $v_t$  -  $N(0, R)$  шум вимірювання, що враховує похибки вимірювання,  $y_t$  — спостережувані дані

Фільтрація Калмана (прямий прохід) - на першому етапі виконується стандартна фільтрація [103]:

Прогноз стану:

$$\hat{x}_{t|t-1} = A\hat{x}_{t-1|t-1} \quad (2.27)$$

$$P_{t|t-1} = AP_{t-1|t-1}A^T + Q \quad (2.28)$$

Оновлення стану:

$$K_t = P_{t|t-1}H^T (HP_{t|t-1}H^T + R)^{-1} \quad (2.29)$$

де  $K_t$  — коефіцієнт Калмана [103].

Оновлення оцінки стану

$$\hat{x}_{t|t} = \hat{x}_{t|t-1} + K_t(y_t - H\hat{x}_{t|t-1}) \quad (2.30)$$

Оновлення коваріації

$$P_{t|t} = (I - K_t H) P_{t|t-1} \quad (2.31)$$

Згладжування Калмана (зворотний прохід) - після фільтрації виконується згладжування (наприклад, алгоритм Раута–Тунга–Стрібеля, RTS smoother), який уточнює оцінки [103]:

Матриця згладжування ( $C_t$  — матриця згладжування):

$$C_t = P_{t|t} A^T P_{t+1|t}^{-1} \quad (2.32)$$

Згладжена оцінка стану:

$$\hat{x}_{t|T} = \hat{x}_{t|t} + C_t (\hat{x}_{t+1|T} - \hat{x}_{t+1|t}) \quad (2.33)$$

де,  $\hat{x}_{t|T}$  — згладжена оцінка стану на момент  $t$  з урахуванням усіх спостережень до моменту  $T$ ;

ЕМ-алгоритм (Expectation–Maximization algorithm) [48] — це ітеративний статистичний метод оцінювання параметрів моделей у випадках, коли дані є неповними, містять пропуски або включають приховані (латентні) змінні. Метод дозволяє знаходити оцінки параметрів, що максимізують функцію правдоподібності, навіть якщо частина інформації відсутня або не спостерігається безпосередньо.

Ідея ЕМ-алгоритму полягає у чергуванні двох етапів: оцінювання очікуваних значень прихованих змінних (Е-крок) та оптимізації параметрів моделі (М-крок). Такий підхід дозволяє поступово уточнювати як параметри, так і оцінки пропущених даних, забезпечуючи збіжність до локального максимуму правдоподібності. Математична постановка задачі наступна.

Нехай,  $X$  — спостережувані дані;  $Z$  — приховані змінні або пропущені значення;  $\theta$  — параметри моделі, метою є максимізація правдоподібності:

$$\theta^* = \arg \max_{\theta} \log p(X|\theta) \quad (2.34)$$

Оскільки частина даних  $Z$  невідома, використовується повна правдоподібність  $p(X, Z|\theta)$ .

Е-крок (Expectation step): обчислюється математичне сподівання логарифма повної правдоподібності за умовою поточних оцінок параметрів [147]:

$$Q(\theta|\theta^{(k)}) = \mathbb{E}_{z|X,\theta^{(k)}} [\log p(X, Z|\theta)] \quad (2.35)$$

М-крок (Maximization step): оновлюються параметри шляхом максимізації отриманої функції [148, 149]:

$$\theta^{(k+1)} = \mathit{arg\,max}_{\theta} Q(\theta|\theta^{(k)}) \quad (2.36)$$

Інтерпретація в задачах імпутації. У контексті відновлення пропусків EM-алгоритм:

- на Е-кроці оцінює відсутні значення на основі поточної моделі;
- на М-кроці оновлює параметри моделі з урахуванням як реальних, так і «відновлених» даних.

Це дозволяє поступово покращувати як якість імпутації, так і параметри моделі.

Метод найближчих сусідів (k-Nearest Neighbors (kNN)) [104] для імпутації пропусків — це непараметричний метод, який відновлює відсутні значення на основі схожості між об'єктами у просторі ознак. Ідея полягає в тому, що для кожного об'єкта з пропущеним значенням знаходяться  $k$  найближчих (найбільш подібних) об'єктів за іншими доступними ознаками, після чого пропуск оцінюється як агрегована характеристика цих сусідів.

Метод не передбачає жорстких припущень щодо розподілу даних і добре працює у випадках складних нелінійних залежностей, що часто характерно для соціально-економічних систем.

Алгоритм методу [104]

Крок 1. Для об'єкта з пропущеним значенням формується підпростір доступних (непропущених) ознак.

Крок 2. Обчислюється відстань до інших об'єктів (зазвичай використовується евклідова відстань, але можливі й інші метрики).

Крок 3. Вибираються  $k$  найближчих сусідів.

Крок 4. Пропущене значення оцінюється як:

- середнє значення (для числових змінних);
- мода (для категоріальних змінних);
- або зважене середнє з урахуванням відстані.

Математична інтерпретація: нехай, потрібно оцінити пропущене значення  $x_i$ . Тоді:

$$\hat{x}_i = \frac{1}{k} \sum_{j \in N_k(i)} x_j \quad (2.37)$$

або у зваженому вигляді:

$$\hat{x}_i = \frac{\sum_{j \in N_k(i)} \omega_j x_j}{\sum_{j \in N_k(i)} \omega_j}, \quad \omega_j = \frac{1}{d(i,j)} \quad (2.38)$$

де:  $N_k(i)$  — множина  $k$  найближчих сусідів;  $d(i,j)$  — відстань між об'єктами  $i$  та  $j$ ;  $w_j$  — ваги, обернено пропорційні відстані [104].

Регресійна імпутація [48] — це метод відновлення пропущених значень, який базується на побудові статистичної або машинної моделі залежності між змінними. Ідея полягає у використанні доступних (спостережуваних) ознак як предикторів для прогнозування відсутніх значень цільової змінної.

Такий підхід дозволяє враховувати структурні взаємозв'язки між змінними та забезпечує більш точне відновлення даних порівняно з простими методами (середнє, медіана), особливо у багатовимірних соціально-економічних системах.

Математична постановка:

Нехай,  $y$  — змінна з пропущеними значеннями;  $X = (x_1, x_2, \dots, x_p)$  — набір допоміжних (пояснювальних) змінних.

Тоді модель має вигляд:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_p x_p + \varepsilon, \quad (2.39)$$

де:  $\beta$  — параметри моделі;  $\varepsilon$  — випадкова похибка.

Після оцінювання параметрів на повних спостереженнях, модель використовується для прогнозування пропущених значень:

$$\hat{y} = f(X) \quad (2.40)$$

Типи регресійної імпутації:

1. Лінійна регресія (найпростіший варіант, ефективний при наявності лінійних залежностей між змінними).
2. Поліноміальна або нелінійна регресія (використовується, коли залежності є складнішими).
3. Регресія з регуляризацією (Lasso, Ridge) (дозволяє уникнути перенавчання та відбирати значущі ознаки).
4. Методи машинного навчання: випадковий ліс (Random Forest), метод градієнтного спуску (Gradient Boosting), нейронні мережі

Аномальні значення (викиди) є характерною особливістю соціально-економічних даних і можуть виникати внаслідок помилок збору інформації, змін методології, одноразових шоків (кризи, інвестиційні сплески) або специфічних локальних подій.

Наявність таких значень суттєво впливає на оцінювання параметрів моделей, викликає зміщення статистичних характеристик та знижує стабільність і надійність результатів аналізу. Тому, застосування робастних методів очищення є необхідним етапом підготовки даних, особливо в задачах прийняття рішень.

Робастна обробка спрямована не на повне видалення аномалій, а на зменшення їх впливу на модель, зберігаючи при цьому інформативність даних [48, 94, 100].

Таблиця 2.10 – Методи опрацювання аномальних значень

Метод	Суть методу	Переваги	Недоліки	Доцільність використання
Губер-оцінювання	Комбінує квадратичну та лінійну функції втрат для обмеження впливу великих відхилень	Стійкість до викидів; збереження ефективності для «нормальних» даних	Потребує вибору порогового параметра	Регресійні моделі, економічні дані з помірними викидами
Функція втрат Тьюкі	Повністю обмежує вплив великих відхилень після заданого порогу	Висока робастність; ефективно «відсікання» викидів	Може ігнорувати важливі екстремальні значення	Дані з сильними викидами або шумом
Вінзорування	Замінює крайні значення на відповідні квантилі (наприклад, 1% і 99%)	Простота реалізації; збереження кількості спостережень	Втрата інформації про реальні екстремуми	Фінансові та бюджетні показники
Локальна регресія (LOESS)	Локальне згладжування даних з використанням вагових коефіцієнтів	Врахування локальної структури; гнучкість	Висока обчислювальна складність	Часові ряди, тренди, нелінійні залежності
Фільтр Хольдрика-Прескота (HP filter)	Декомпозиція ряду на тренд та циклічну компоненту	Виділення довгострокових тенденцій; виявлення аномалій	Чутливість до параметра згладжування	Макроекономічні і часові ряди
Медіана абсолютних відхилень (MAD)	Робастна оцінка варіації на основі медіани абсолютних відхилень	Стійкість до викидів; проста інтерпретація	Менш ефективний при нормальному розподілі	Виявлення аномалій у шумних даних

Аналіз наведених методів показує, що робастне очищення даних не має універсального підходу, і вибір конкретного методу залежить від структури даних, характеру викидів та цілей подальшого аналізу.

Методи типу Губер-оцінювання та Тьюкі-фільтрації [105] є доцільними у задачах параметричного моделювання, де важливо зберегти баланс між точністю оцінок і стійкістю до аномалій. Водночас вінзування забезпечує простий і практичний спосіб обмеження впливу екстремальних значень без видалення спостережень, що особливо актуально для фінансових і бюджетних показників.

Для часових рядів ефективними є методи згладжування та декомпозиції, зокрема локальна регресія та фільтр Хольдрика-Прескота (HP filter) [106], які дозволяють виділяти тренди та виявляти аномальні відхилення у динаміці показників. Метод MAD [48] виступає як базовий інструмент для первинної діагностики викидів завдяки своїй простоті та робастності.

У контексті аналізу соціально-економічних даних територіальних громад доцільним є комбіноване використання методів: первинне виявлення викидів (метод MAD) [48], їх обмеження (вінзування або робастні функції втрат) та подальше згладжування часових рядів (LOESS, HP filter).

Такий підхід дозволяє забезпечити баланс між збереженням інформативності даних та підвищенням стабільності моделей, що є критично важливим для систем підтримки прийняття рішень.

У задачах аналізу сталого розвитку ЛСЕС використовується інформація з різнорідних джерел (державна статистика, відкриті дані, міжнародні бази, локальні звіти громад), що призводить до неоднорідності даних. Зокрема, показники можуть відрізнятися за періодичністю (місячні, квартальні, річні), часовими інтервалами спостережень, а також рівнем територіальної агрегації (країна, область, громада).

Без попереднього узгодження такі дані є некоректними для спільного аналізу, моделювання та побудови інтегральних індексів.

Синхронізація часових рядів — це процес приведення даних до єдиного часово-просторового масштабу, що забезпечує їхню порівнюваність і сумісність у межах аналітичної моделі.

Основні процедури узгодження [107]

1. Агрегація передбачає перехід від більш детальної періодичності до менш детальної, наприклад:

- місячні-квартальні (сума або середнє);
- кварталні - річні.

Вибір операції залежить від економічного змісту показника:

- потоки (доходи, витрати) — агрегуються сумуванням;
- рівні (індекси, запаси) — усередненням.

2. Інтерполяція використовується для переходу від менш детальної періодичності до більш детальної: річні, кварталні або місячні.

Методи [48]:

- лінійна інтерполяція;
- сплайни;
- метод Дентона (Denton-метод) (з урахуванням допоміжних індикаторів);
- метод Чоу-Лін (Chow-Lin) (економетричний підхід).

Це дозволяє підвищити часову роздільну здатність даних для подальшого аналізу.

3. Часове вирівнювання передбачає узгодження часових шкал:

- приведення всіх рядів до єдиного календаря;
- врахування лагів (затримок) між показниками;
- синхронізація початкових і кінцевих періодів.

Наприклад, економічні ефекти інвестицій можуть проявлятися із запізненням, що потребує зсуву рядів.

4. Дефляція забезпечує приведення номінальних показників до реальних шляхом усунення впливу інфляції [108]:

$$X_t^{real} = \frac{X_t^{nominal}}{CPI_t} 100 \quad (2.41)$$

де  $CPI_t$  — індекс споживчих цін [108].

Це дозволяє коректно порівнювати показники у часі без викривлення інфляційними процесами.

5. Перерахунок показника «на душу населення» застосовується для врахування масштабів територій [109]:

$$X_t^{pc} = \frac{X_t}{Population_t} \quad (2.42)$$

Такий підхід дозволяє порівнювати громади різного розміру; уникнути домінування великих територій у моделях; підвищити інтерпретованість показників.

6. Просторова узгодженість передбачає приведення даних до єдиного територіального рівня: агрегація з рівня громад до районів, регіонів; дезагрегація за допомогою ваг (населення, площа, економічна активність).

Синхронізація та формування узгоджених часових рядів є фундаментальним етапом підготовки даних, який забезпечує їхню цілісність, узгодженість та аналітичну придатність. Комплексне застосування процедур агрегації, інтерполяції, вирівнювання, дефляції та нормалізації дозволяє сформувати єдину інформаційну основу для побудови надійних моделей і підтримки обґрунтованих управлінських рішень у сфері соціально-економічного розвитку.

Після етапів очищення, нормалізації, імпутації пропусків та синхронізації даних формується аналітичний набір даних, придатний для подальшого моделювання та прийняття рішень. Такий набір даних має узгоджену структуру, єдиний часовий масштаб і містить релевантні змінні для аналізу. Формально набір даних можна представити як [48, 94]:

$$D = \{X_t, Y_t, Z_t\} \quad (2.43)$$

де:  $X_t$  — пояснювальні змінні, що використовуються для моделювання;  $Y_t$  — цільові змінні, які необхідно прогнозувати або класифікувати;  $Z_t$  — контекстні

фактори (екзогенні змінні), що впливають на процес, але не завжди є прямими предикторами (наприклад, політичні, сезонні, зовнішні економічні умови) [48].

Ключові процедури [48]

1. Розбиття на початкову та тестову вибірки. Дані поділяються на:

- навчальна вибірка — використовується для оцінювання параметрів моделі;
- тестова вибірка — використовується для незалежної перевірки якості моделі.

Для часових рядів застосовується послідовне розбиття [94]:

$$T_{train}: [t_1, \dots, t_k], T_{test}: [t_{k+1}, \dots, t_T], \quad (2.44)$$

Це дозволяє уникнути порушення часової структури даних.

2. Крос-валідація - метод багаторазової перевірки моделі шляхом поділу даних на підвибірки [48, 100]:

- k-блочна крос-валідація (k-fold cross-validation);
- стратифікована вибірка (stratified sampling) (для класифікації).

Забезпечує більш надійну оцінку узагальнюючої здатності моделі.

3. Валідація «ковзного вікна» (Rolling-window validation) (для часових рядів) – спеціалізований підхід для часових даних, який імітує реальний процес прогнозування [110]:

$$[t_1, \dots, t_k] \rightarrow t_{k+1}, [t_1, \dots, t_{k+1}] \rightarrow t_{k+2}, \quad (2.45)$$

Або у вигляді рухомого вікна фіксованої довжини:

$$[t_1, \dots, t_{i+w}] \rightarrow t_{i+w+1}, \quad (2.46)$$

4. Балансування вибірки. Особливо важливо для задач класифікації, де класи можуть бути незбалансованими (наприклад, рідкісні події — кризи, дефолти, аномалії) [111].

Методи:

- оверсемплінг (oversampling) (наприклад, SMOTE – метод синтетичної генерації меншості);
- андесемплінг (undersampling);
- вагове коригування класів.

Це дозволяє уникнути зміщення моделі в бік домінуючого класу.

Формування стандартизованих вибірок є завершальним етапом підготовки даних, який трансформує сирі, неоднорідні дані у структурований аналітичний ресурс. Коректне застосування процедур розбиття, валідації та балансування забезпечує об'єктивну оцінку моделей, підвищує їхню узагальнюючу здатність і є необхідною умовою для побудови надійних інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень.

## **2.5 Моделі аналізу динаміки ЛСЕС у задачі забезпечення їх сталого розвитку**

Аналіз динаміки ЛСЕС вимагає використання різних класів моделей, здатних враховувати тренди, сезонність, волатильність, структурні зміни, режимні переходи та складні нелінійні залежності. Вибір моделі визначається характером даних, типом невизначеності та стратегічною метою прогнозування.

Класичні моделі часових рядів є базовим інструментарієм для аналізу, прогнозування та інтерпретації динаміки соціально-економічних показників. Вони дозволяють формалізувати залежності між значеннями показника у часі, враховувати тренди, сезонність та випадкові коливання. У контексті ЛСЕС такі моделі є основою для побудови інформаційних технологій, використовуваних у СППР [98].

ARIMA / SARIMA / SARIMAX [94] моделі є базовими інструментами аналізу та прогнозування часових рядів, що дозволяють враховувати автокореляцію, тренд і випадкові коливання даних. Розширення SARIMA дає змогу моделювати сезонні компоненти, тоді як SARIMAX включає екзогенні

змінні, що дозволяє враховувати вплив зовнішніх факторів. Такі моделі широко застосовуються для прогнозування соціально-економічних показників у ЛСЕС.

Базова модель ARIMA(p,d,q) має вигляд [94]:

$$\phi(B)(1 - B)^d Y_t = \theta(B)\varepsilon_t \quad (2.47)$$

де,  $\mathbf{B}$  — оператор лагу:  $BY_t = Y_{t-1}$ ;  $d$  — порядок диференціювання (усунення тренду);  $\phi(\mathbf{B}) = 1 - \phi_1 \mathbf{B} - \phi_2 \mathbf{B}^2 - \dots - \phi_p \mathbf{B}^p$  — AR-поліном;  $\theta(\mathbf{B}) = 1 + \theta_1 \mathbf{B} + \dots + \theta_q \mathbf{B}^q$  — MA-поліном;  $\varepsilon_t$  — білий шум.

SARIMA (сезонна модель) [94].

$$\phi(B)\Phi(B^s)(1 - B)^d(1 - B^s)^D Y_t = \theta(B)\Theta(B^s)\varepsilon_t \quad (2.48)$$

де,  $s$  — сезонний період (наприклад, 12 - для місячних даних);  $D$  — сезонне диференціювання;  $\Phi, \Theta$  — сезонні поліноми.

SARIMAX (з екзогенними змінними) [94]

$$Y_t = ARIMA - \text{процес} + \beta X_t \quad (2.49)$$

де  $X_t$  — зовнішні фактори (інвестиції, демографія, трансферти) [48, 94].

Етапи побудови ARIMA:

Крок 1. Перевірка стаціонарності (ADF-тест);

Крок 2. Визначення  $p, d, q$  (ACF/PACF);

Крок 3. Оцінювання параметрів (MLE);

Крок 4. Діагностика залишків;

Крок 5. Прогнозування.

Моделі простору станів описують часові ряди через систему рівнянь стану та спостереження, що дозволяє враховувати приховані (латентні) компоненти процесу. Вони забезпечують гнучке та адаптивне моделювання динаміки системи з використанням, зокрема, фільтра Калмана для оцінювання станів.

Загальна форма:

- рівняння стану [112]:

$$x_t = Ax_{t-1} + \varpi_t \quad (2.50)$$

рівняння спостереження:

$$y_t = Hx_t + v_t \quad (2.51)$$

де,  $x_t$  — прихований стан;  $y_t$  — спостереження;  $A, H$  — матриці;  $w, v_t$  — шум [112].

У таблиці 2.11 наведено порівняльну характеристику класичних моделей часових рядів, що дозволяє оцінити їхні ключові переваги та обмеження. Це забезпечує обґрунтований вибір моделі залежно від структури даних, наявності сезонності, зовнішніх факторів та вимог до гнучкості й інтерпретованості в задачах аналізу ЛСЕС.

Таблиця 2.11 – Порівняльна характеристика моделей часових рядів, застосовуваних для моделювання розвитку ЛСЕС [48, 94, 112]

Модель	Переваги	Обмеження
ARIMA	простота, інтерпретованість	лінійність, стаціонарність
SARIMA	врахування сезонності	складність налаштування
SARIMAX	включення факторів	потреба у зовнішніх даних
Моделі простору станів	гнучкість, латентні стани	складність

Класичні моделі часових рядів залишаються ключовим інструментом аналізу соціально-економічних процесів. ARIMA-підходи забезпечують базове прогнозування, моделі простору станів — гнучке моделювання динаміки. Їх комбіноване використання дозволяє ефективно враховувати як стабільні, так і змінні характеристики ЛСЕС, що підвищує точність прогнозів і якість управлінських рішень.

У соціально-економічних системах, зокрема ЛСЕС, значну роль відіграє не лише динаміка середніх значень показників, але й їхня мінливість (волатильність). Періоди стабільності можуть змінюватися фазами підвищеної нестабільності, що безпосередньо впливає на ризики управлінських рішень. Для формалізації таких ефектів застосовуються моделі сімейства ARCH/GARCH.

ARCH (Autoregressive Conditional Heteroskedasticity). Модель ARCH(q) описує залежність поточної дисперсії від попередніх шоків [94, 112]:

$$\varepsilon_t \sim \mathcal{N}(0, \sigma_t^2) \quad (52)$$

$$\sigma_t^2 = \omega + \sum_{i=1}^q \alpha_i \varepsilon_{t-i}^2 \quad (2.53)$$

де,  $\sigma_t^2$  — умовна дисперсія;  $\varepsilon_t$  — квадрати попередніх помилок;  $\alpha_i$  — параметри чутливості до шоків [179].

GARCH (Generalized ARCH). Розширення ARCH, яке враховує також попередню волатильність [94]:

$$\sigma_t^2 = \omega + \sum_{i=1}^q \alpha_i \varepsilon_{t-i}^2 + \sum_{j=1}^p \beta_j \sigma_{t-j}^2 \quad (2.54)$$

Найчастіше використовується GARCH(1,1):

$$\sigma_t^2 = \omega + \alpha \varepsilon_{t-1}^2 + \beta \sigma_{t-1}^2 \quad (2.55)$$

DCC-GARCH (DCC - Dynamic Conditional Correlation). Для багатовимірних систем важливо враховувати не лише волатильність окремих показників, але й їх взаємозалежність у часі. Це реалізується через DCC-GARCH [94, 100].

Коваріаційна матриця [112]:

$$H_t = D_t R_t D_t \quad (2.56)$$

де,  $D_t$  — діагональна матриця стандартних відхилень (з GARCH);  $R_t$  — матриця кореляцій, що змінюється у часі.

Динаміка кореляцій [180]:

$$Q_t = (1 - \alpha - b)\bar{Q} + \alpha(\varepsilon_{t-1}\varepsilon_{t-1}^T) + bQ_{t-1} \quad (2.57)$$

$R_t = \text{нормалізація}(Q_t)$

ARCH/GARCH [94, 112] моделі дозволяють ефективно описувати динаміку волатильності економічних показників, тоді як DCC-GARCH розширює цей підхід на багатовимірні системи, враховуючи взаємозалежності між змінними. Їх використання у ЛСЕС забезпечує більш глибоке розуміння ризиків, підвищує точність прогнозів і створює основу для побудови адаптивних систем підтримки прийняття рішень.

Марковські підходи [113] є важливим класом стохастичних моделей, що дозволяють описувати динаміку систем із дискретними станами та ймовірнісними переходами між ними. У контексті ЛСЕС, такі моделі дають змогу формалізувати еволюцію громади як послідовність переходів між рівнями розвитку або станами стабільності.

Ключова ідея полягає у марковській властивості [113, 114]:

$$P(S_{t+1}|S_t, S_{t-1}, \dots) = P(S_{t+1}|S_t) \quad (2.58)$$

тобто, майбутній стан залежить лише від поточного.

Марковські ланцюги: математична постановка [113, 114]:

Нехай,  $S_t \in \{1, \dots, K\}$  — стан системи (наприклад: низький, середній, високий рівень розвитку).

Ймовірність переходу:

$$P(S_{t+1} = j | S_t = i) = p_{ij} \quad (2.59)$$

Матриця переходів:

$$\begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1K} \\ p_{21} & p_{22} & \dots & p_{2K} \\ \vdots & \ddots & & \vdots \\ p_{K1} & \dots & p_{K2} & p_{KK} \end{pmatrix} \quad (2.60)$$

де:

$$\sum_{j=1}^K p_{ij} = 1$$

Розподіл станів описує зміну ймовірностей перебування системи у кожному зі станів у часі та дозволяє аналізувати її еволюцію. Стаціонарний розподіл характеризує довгострокову рівновагу системи, до якої вона прагне незалежно від початкового стану.

Розподіл станів [113, 114]:

$$\pi_{t+1} = \pi_t P \quad (2.61)$$

Стаціонарний розподіл:

$$\pi = \pi P \quad (2.62)$$

Марківські моделі з перемиканням станів (Markov-switching models. MS-AR) [115] методи моделювання часових рядів з марковськими процесами, дозволяючи враховувати перемикання між режимами.

Математична постановка (MS-AR) [115]

$$Y_t = \mu s_t + \phi s_t Y_{t-1} + \varepsilon_t \quad (2.63)$$

де,  $S_t$  — прихований стан; параметри залежать від режиму [115].

Керовані марковські процеси (MDP) є розширенням марковських моделей, у якому враховується вплив управлінських рішень. MDP визначається як кортеж [116]:

$$(S, A, P, R, \gamma) \quad (2.64)$$

де,  $S$  — множина станів;  $A$  — множина дій;  $P(s'|s,a)$  — ймовірності переходів;  $R(s,a)$  — функція винагороди;  $\gamma$  — коефіцієнт дисконту.

Метою оптимізації політики є знаходження оптимальної стратегії управління, яка максимізує очікувану сумарну вигоду системи у довгостроковій перспективі. Рівняння Беллмана формалізує цей процес, визначаючи оптимальне рішення як баланс між поточною винагородою та майбутніми очікуваними результатами. Ціль [115, 116]:

$$\pi^* \operatorname{argmax}_{\pi} \mathbb{E} \left[ \sum_{t=0}^{\infty} \gamma^t R(S_t, A_t) \right] \quad (2.65)$$

Рівняння Беллмана [116]:

$$V(s) = \max_a \left[ R(s, a) + \gamma \sum_{s'} P(s'|s, a) V(s') \right] \quad (2.66)$$

Марковські моделі забезпечують потужний інструментарій для аналізу динаміки соціально-економічних систем, дозволяючи описувати переходи між станами та виявляти структурні зміни. Розширення у вигляді Марківських

моделей з перемиканням станів дозволяє враховувати нелінійні режими, тоді як керовані марковські процеси інтегрують управлінські рішення у модель, формуючи основу для інтелектуального стратегічного управління ЛСЕС.

Байєсівські підходи [117] до моделювання часових процесів займають особливе місце у задачах аналізу соціально-економічних систем, оскільки дозволяють враховувати невизначеність, причинно-наслідкові зв'язки та неповноту даних. У цьому контексті важливими є динамічні байєсівські мережі (ДБМ, Dynamic Bayesian Networks, DBN) та моделі BSTS, які забезпечують гнучке моделювання складних процесів у ЛСЕС.

ДБМ [117] є розширенням класичних байєсівських мереж на часовий вимір і дозволяють моделювати ймовірнісні залежності між змінними у часі, враховуючи як їх внутрішні зв'язки, так і динаміку розвитку. Нехай [187],  $X_t = (X_t^1, X_t^2, \dots, X_t^n)$  — вектор змінних у момент часу  $t$  [187].

Тоді спільний розподіл:

$$P(X_{1:T}) = \prod_{t=1}^T \prod_{i=1}^n P(X_t^i | Pa(X_t^i)) \quad (2.67)$$

де:  $Pa(X_t^i)$  — множина батьківських (впливових) змінних; залежності можуть бути як внутрішньочасовими, так і міжчасовими ( $t-1$  та  $t$ ) [117].

2. Байєсів структурний часовий ряд (БСЧР, Bayesian Structural Time Series, BSTS)) — це байєсівський підхід до моделювання часових рядів, який базується на декомпозиції ряду на структурні компоненти та оцінюється у моделях простору станів [117].

$$Y_t = \mu_t + \tau_t + \beta X_t + \varepsilon_t \quad (2.68)$$

де:  $\mu_t$  — тренд;  $\tau_t$  — сезонність;  $X_t$  — регресори (екзогенні змінні);  $\beta$  — коефіцієнти;  $\varepsilon_t$  — шум [117].

Компоненти моделі мають власну динаміку:

$$\mu_t = \mu_{t-1} + \eta_t \quad (2.69)$$

У таблиці 2.12 відображено відмінності між двома байєсівськими підходами до моделювання ДМБ [117] орієнтовані на виявлення та аналіз

причинно-наслідкових зв'язків у складних системах, тоді як БСЧР фокусуються на декомпозиції часових рядів і оцінці впливу управлінських втручань. Їх поєднання дозволяє отримати як глибоке розуміння структури системи, так і точні прогнози її динаміки.

Таблиця 2.12 – Аналіз відмінностей між двома байєсівськими підходами до моделювання

Характеристика	ДМБ	БСЧР
Тип моделі	Графова	Часовий ряд
Основний фокус	Причинні залежності	Декомпозиція та прогноз
Робота з даними	Дефіцит даних	Часові ряди
Застосування	Складні системи	Політики та інтервенції

ДМБ та БСЧР [117] є взаємодоповнюючими підходами до моделювання невизначеності у часових процесах. ДМБ забезпечують глибокий аналіз причинно-наслідкових зв'язків, тоді як БСЧР дозволяє оцінювати ефекти управлінських втручань та формувати точні прогнози. Їх інтеграція створює потужну основу для побудови інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень у ЛСЕС.

## **2.6 Розроблення методики прогнозування сталого розвитку ЛСЕС в умовах невизначеності**

Застосування ефективної методики моделювання сталого розвитку ЛСЕС в умовах невизначеності є ключовим етапом побудови надійних прогнозів та прийняття ефективних управлінських рішень. На відміну від класичного детермінованого підходу, сучасна методологія передбачає формалізацію невизначеності як невід'ємної характеристики соціально-економічної динаміки.

У контексті ЛСЕС невизначеність має багатовимірний характер і проявляється через варіативність прогнозів, ризики подій, структурні зміни та нестабільність параметрів. Тому моделювання повинно включати як кількісну оцінку розкиду можливих траєкторій розвитку, так і аналіз екстремальних сценаріїв.

Одним із базових інструментів моделювання за умов невизначеності, є інтервальні оцінки прогнозів, які дозволяють перейти від детермінованого (точкового) прогнозу до оцінки діапазону можливих значень із заданою довірчою ймовірністю. Це є критично важливим у задачах аналізу соціально-економічних систем, де присутні невизначеність, шум та структурні зміни.

Формалізація інтервального прогнозу. Нехай точковий прогноз має вигляд [48, 94]:

$$\hat{Y}_t = f(X_t) \quad (2.70)$$

Тоді довірчий (інтервальний) прогноз:

$$Y_t \in \left[ \hat{Y}_t - z_{\alpha/2} \cdot \sigma_t, \hat{Y}_t + z_{\alpha/2} \cdot \sigma_t \right] \quad (2.71)$$

де:  $\sigma_t$  — стандартна помилка прогнозу;  $z_{\alpha/2}$  — квантиль нормального розподілу (наприклад,  $z_{0.025} \approx 1.96$  для 95% довірчого інтервалу);  $\alpha$  — рівень значущості.

Інтервальна оцінка прогнозу відображає сукупний вплив різних джерел невизначеності:

- стохастичний шум у даних;
- похибки вимірювання;
- невизначеність параметрів моделі;
- структурні зміни;
- неповнота або неточність даних (пропуски, агрегація).

У загальному вигляді маємо:

$$\sigma_t^2 = \sigma_{noise}^2 + \sigma_{model}^2 + \sigma_{data}^2 \quad (2.72)$$

Таблиця 2.13 - Підходи до урахування фактора невизначеності [118, 119]

Категорія	Елемент	Опис	Практичне значення
Джерела невизначеності	Стохастичний шум	Випадкові коливання у даних	Збільшує варіативність прогнозу
	Похибки вимірювання	Неточності збору даних	Викликає зміщення оцінок
	Невизначеність моделі	Обмеженість або неправильна специфікація моделі	Знижує точність прогнозу
	Структурні зміни	Зміна закономірностей у часі	Погіршує стабільність моделі
	Неповнота даних	Пропуски, агрегація, неточності	Підвищує ризик некоректних висновків
Формалізація невизначеності	Дисперсія прогнозу	$\sigma_t^2 = \sigma_{noise}^2 + \sigma_{model}^2 + \sigma_{data}^2$	Декомпозиція джерел помилки
Типи інтервальних оцінок	Довірчі інтервали	Оцінюють невизначеність середнього значення	Використовуються для статистичних висновків
	Прогнозні інтервали	Враховують варіацію нових спостережень	Найбільш практичні для прогнозування
	Байєсівські інтервали	Грунтуються на апостеріорному розподілі	Враховують повну невизначеність параметрів
Методи оцінювання	Аналітичні методи	Формули для лінійних моделей, ARIMA	Швидкі, але обмежені припущеннями
	Bootstrap	Ресемплінг даних	Універсальний, не потребує нормальності
	Квантільна регресія	Оцінка квантилів розподілу	Робастний підхід
	Байєсівські методи	Апостеріорні розподіли	Гнучкість, але висока складність
	Ensemble methods	Дисперсія ансамблю моделей	Практичний підхід у ML
Інтерпретація	Діапазон значень	Межі можливих значень прогнозу	Оцінка невизначеності
	Рівень ризику	Ширина інтервалу	Чим ширше, тим більший ризик
	Сценарний аналіз	Порівняння альтернатив	Підтримка прийняття рішень
	Стабільність системи	Зміна ширини інтервалу у часі	Виявлення кризових періодів
Візуалізація	Fan charts	Графічне представлення інтервалів	Інтуїтивне сприйняття невизначеності
	Рівні довіри (50%, 80%, 95%)	Різні смуги інтервалів	Відображення сценаріїв
	Динаміка інтервалів	Розширення/звуження у часі	Аналіз нестабільності

Систематизація підходів до фактора невизначеності дозволяє комплексно враховувати джерела похибок, обирати адекватні методи оцінювання та забезпечувати інтерпретованість результатів. Використання інтервальних оцінок у поєднанні з сучасними методами (бутстреп, ансамблі, байєсівські підходи) створює основу для ризик-орієнтованого аналізу та підвищує обґрунтованість управлінських рішень у ЛСЕС.

Для дослідження соціально-економічних системах, зокрема, ЛСЕС, важливою характеристикою є не лише середній рівень показників, що описують їх структуру та динаміку, але й їх варіативність, взаємозв'язки та мінливість у часі. Для формалізації цих властивостей застосовуються моделі волатильності, які дозволяють оцінювати змінність дисперсії процесу та ідентифікувати періоди підвищеного ризику.

Класичним інструментом є моделі сімейства ARCH/GARCH, які описують умовну гетероскедастичність, тобто залежність дисперсії від попередніх значень процесу. Базова модель GARCH(1,1) [94, 112]:

$$\begin{aligned} y_t &= \mu + \varepsilon_t, \varepsilon_t \sim \mathcal{N}(0, \sigma_t^2) \\ \sigma_t^2 &= \omega + \alpha \varepsilon_{t-1}^2 + \beta \sigma_{t-1}^2 \end{aligned} \quad (2.73)$$

де,  $\sigma_t^2$  — умовна дисперсія (волатильність);  $\varepsilon_t$  — «новини» або шоки попереднього періоду;  $\sigma_t$  — попередній рівень волатильності;  $\alpha, \beta$  — параметри моделі.

Модель GARCH [48] дозволяє враховувати ефект кластеризації волатильності, коли періоди високої нестабільності змінюються аналогічними періодами, і навпаки. Це є типовою властивістю соціально-економічних та фінансових процесів.

Розширені підходи до аналізу ризиків [119, 120]

1. DCC-GARCH дозволяє моделювати динамічні кореляції між кількома часовими рядами, що важливо для:

- аналізу взаємозалежності доходів, витрат та інвестицій;
- оцінки системних ризиків;

- виявлення ефектів «поширення» нестабільності між показниками.

2. Quantile Regression (квантильна регресія) дає можливість оцінювати поведінку показників у «хвостах» розподілу:

- аналіз найгірших сценаріїв (нижні квантилі);
- оцінка екстремальних ризиків;
- робастність до викидів.

3. Value-at-Risk (VaR) - класичний інструмент ризик-менеджменту у фінансах, який визначає максимальні можливі втрати з заданою ймовірністю [171]:

$$P(Y_t < VaR_\alpha) = \alpha \quad (2.74)$$

У контексті дослідження сталого розвитку ЛСЕС VaR може використовуватися для:

- оцінки ризику недоотримання доходів бюджетом;
- планування резервів суб'єктів господарювання, банків, тощо;
- формування фінансової політики складових ЛСЕС – громад, районів.

Моделі волатильності є важливим інструментом аналізу ризиків у соціально-економічних системах. Їх застосування дозволяє перейти від статичного аналізу до динамічного врахування нестабільності, що є критично важливим для ефективного управління бюджетними, інвестиційними та економічними процесами на рівні ЛСЕС.

Байєсівський підхід [117] є одним із найбільш потужних інструментів моделювання невизначеності, оскільки дозволяє поєднувати емпіричні дані з апіорними знаннями (експертними оцінками, результатами попередніх досліджень, теоретичними припущеннями). На відміну від класичних частотних методів, байєсівський підхід розглядає параметри моделі як випадкові величини, що мають власний розподіл [117].

$$p(\theta|D) = \frac{p(D|\theta)p(\theta)}{p(D)} \quad (2.75)$$

де  $p(\theta)$  — апіорний розподіл, що відображає початкові уявлення про параметри;  $p(D|\theta)$  — функція правдоподібності;  $p(\theta|D)$  — апостеріорний розподіл, який

враховує як дані, так і апріорні знання;  $p(D)$  — нормувальна константа [117].

Це особливо важливо для управління розвитком соціально-економічних систем (зокрема, ЛСЕС), оскільки інформація надходить поступово, а умови постійно змінюються.

Байєсівські підходи охоплюють як задачі прогнозування, аналізу залежностей, так і оптимальності рішень. Їх комбіноване використання дозволяє побудувати комплексні СППР, що враховують невизначеність, динаміку процесів та багатофакторний вплив, що є критично важливим для управління розвитком ЛСЕС.

Таблиця 2.12 – Узагальнення застосування байєсівських моделей для прогнозування розвитку ЛСЕС в умовах невизначеності [48, 117]

Модель / підхід	Суть методу	Основні можливості	Переваги	Доцільність використання
Байєсівська модель часових рядів (Bayesian Structural Time Series (BSTS))	Модель часових рідів декомпозицією на тренд, сезонність та регресійні компоненти	Врахування структурних змін, причинно-наслідковий аналіз, прогнозування	Гнучкість; інтерпретованість; робота з невизначеністю	Оцінка ефектів реформ, програм розвитку, прогнозування соціально-економічних показників
Динамічні мережі Байєса (Dynamic Bayesian Networks (DBN))	Графові ймовірнісні моделі, що описують залежності між змінними у часі	Моделювання причинно-наслідкових зв'язків; аналіз складних систем	Врахування динаміки; інтеграція багатьох факторів	Аналіз залежностей між показниками (економіка, демографія, фінанси)
Марковський процес прийняття рішень (Markov Decision Processes (MDP)) з байєсівським оновленням	Моделі прийняття рішень у стохастичном середовищі з оновленням оцінок станів	Оптимізація стратегій; врахування ризику та невизначеності	Прийняття оптимальних рішень; адаптивність	Планування розвитку громади, управління ресурсами, вибір стратегій інвестування

У задачах моделювання сталого розвитку ЛСЕС важливо враховувати не лише найбільш імовірну траєкторію розвитку, але й альтернативні варіанти, що відображають різні умови функціонування системи. Для цього застосовується сценарний аналіз, який дозволяє формувати множину можливих сценаріїв та оцінювати їх наслідки для ключових показників [117].

Сценарний підхід базується на припущенні, що майбутній розвиток системи є невизначеним і залежить від сукупності внутрішніх та зовнішніх факторів. У рамках аналізу зазвичай формуються такі типи сценаріїв:

- базовий сценарій — відображає найбільш імовірний розвиток за умови збереження поточних тенденцій;
- оптимістичний сценарій — передбачає сприятливі умови (зростання економіки, збільшення інвестицій, стабільна політика);
- песимістичний сценарій — враховує негативні тенденції (зниження доходів, демографічний спад);
- кризовий сценарій — моделює екстремальні ситуації з різкими структурними змінами.

Стрес-тестування як інструмент аналізу ризиків, на відміну від сценарного аналізу, що розглядає узагальнені траєкторії розвитку, стрес-тестування, орієнтоване на моделювання екстремальних, але потенційно можливих подій, які можуть суттєво вплинути на функціонування системи.

Типові приклади стрес-сценаріїв у ЛСЕС:

- падіння доходів підприємств на 20% і більше;
- різке зростання рівня безробіття;
- скорочення або затримка міжбюджетних трансфертів;
- екологічні або техногенні катастрофи;
- макроекономічні шоки (інфляція, зміна валютного курсу).

Стрес-тестування дозволяє оцінити стійкість системи до шоків, визначити критичні точки та сформулювати заходи реагування.

Методологічні підходи до реалізації сценарного аналізу та стрес-тестування охоплюють різні математичні та імітаційні підходи:

1. Монте-Карло симуляції - симуляції є стохастичним методом моделювання, який дозволяє оцінювати поведінку складних систем шляхом багаторазового випадкового генерування сценаріїв на основі заданих імовірнісних розподілів вхідних параметрів.

Нехай, досліджуваний показник (наприклад, бюджет громади, або ЛСЕС, сформованої на основі декількох громад) визначається як функція випадкових змінних [3, 48]:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (2.76)$$

де,  $X_i \sim f_i(\theta_i)$  — випадкові вхідні параметри з відомими або оціненими розподілами;  $Y$  — результат (цільова змінна) [175].

Монте-Карло оцінка базується на генерації  $N$  реалізацій:

$$Y^{(k)} = f(X_1^{(k)}, X_2^{(k)}, \dots, X_n^{(k)}), k = 1, \dots, N \quad (2.77)$$

У рамках імітаційного моделювання (зокрема, Монте-Карло) після генерації множини сценаріїв здійснюється оцінка основних статистичних характеристик результатів. Очікуване значення відображає середній прогнозований рівень показника та використовується як базова оцінка. Дисперсія характеризує ступінь варіативності результатів і є мірою невизначеності або ризику. Ймовірність кризової події визначається як частка сценаріїв, у яких значення показника виходить за критичний поріг, що дозволяє кількісно оцінити ризик настання небажаних станів системи.

Очікуване значення [112, 114]:

$$E[Y] \approx \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N Y^{(k)} \quad (2.78)$$

Дисперсія:

$$\text{Var}(Y) \approx \frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^N (Y^{(k)} - \mathbb{E}[Y])^2 \quad (2.79)$$

Ймовірність кризової події:

$$P(Y < Y_{crit}) \approx \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \mathbf{1}(Y^{(k)} < Y_{crit}) \quad (2.80)$$

Алгоритм Монте-Карло [121]

Крок 1. Задати розподіли  $X_i$ ;

Крок 2. Згенерувати випадкові вибірки;

Крок 3. Обчислити  $Y(k)$ ;

Крок 4. Повторити  $N$  разів;

Крок 5. Оцінити розподіл результату.

2. Моделі з марковськими перемиканнями використовуються для описування процесів, які можуть переходити між різними режимами (станами), кожен з яких має власні параметри [114].

Нехай,  $S_t \in \{1, \dots, K\}$  — прихований стан системи;  $Y_t$  — спостережуваний процес. Тоді:

$$Y_t = \mu_{S_t} + \phi_{S_t} Y_{t-1} + \varepsilon_t \quad (2.81)$$

$$Y_t = \mu_{S_t} + \phi_{S_t} Y_{t-1} + \varepsilon_t \quad (2.82)$$

де,  $\mu_{S_t}$  — параметри, що залежать від стану;  $\varepsilon_t \sim N(0, \sigma_{S_t})$

Марковський процес переходів можна представити наступним чином:

- ймовірності переходів:

$$P(S_t = j | S_{t-1} = i) = p_{ij} \quad (2.83)$$

Матриця переходів:

$$P = \begin{pmatrix} p_{11} & \cdots & p_{1K} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{K1} & \cdots & p_{KK} \end{pmatrix} \quad (2.84)$$

Ймовірність стану  $P(S_t = i | Y_i, \dots, Y_t)$  оцінюється через алгоритм фільтрації (Hamilton filter) та згладжування. Монте-Карло (Monte Carlo) симуляції та Марківські моделі з перемиканням станів є взаємодоповнюючими інструментами аналізу невизначеності [114].

Перші дозволяють оцінити розподіл можливих результатів, тоді як другі — структуру динаміки системи та зміну її режимів. Їх комбіноване використання забезпечує глибокий аналіз ризиків і підвищує якість прогнозування в задачах управління ЛСЕС.

Сценарний аналіз та стрес-тестування є ключовими інструментами моделювання невизначеності та ризиків у ЛСЕС. Їх застосування дозволяє перейти від статичного прогнозування до сценарно-орієнтованого управління, що враховує можливі відхилення від базової траєкторії розвитку. У поєднанні з імітаційними та стохастичними методами ці підходи забезпечують глибоке розуміння поведінки системи та підвищують обґрунтованість управлінських рішень у ЛСЕС.

Узагальнено, пропонована методика моделювання сталого розвитку ЛСЕС представлена у табл. 2.13

Методика, представлена в таблиці 2.13 призначена для підтримки прийняття рішень щодо формування ЛСЕС – локальних просторово-зосереджених соціально-економічних систем на засадах кооперації та інтеграції для мобілізації спільних зусиль територіальних громад для вирішення задач досягнення цілей сталого розвитку в умовах обмеженості фінансових,

інвестиційних ресурсів, відкритості національної економіки, військового конфлікту, погіршення екологічної та демографічної ситуації.

Таблиця 2.13 – Методика моделювання та прогнозування сталого розвитку ЛСЕС

Етап	Пропоновані методичні підходи
Попередній аналіз проблеми, оцінювання потенціалу можливої ЛСЕС	Збір інформації, SWOT-аналіз, відбір кандидатів до ЛСЕС (формування складу ЛСЕС – просторова організація)
Попередня підготовка даних	Збір інформації, попередня обробка даних, підготовка даних до аналізу
	Обробка пропусків, пошук аномалій
	Виявлення закономірностей у досліджуваних процесах, зв'язків у даних, вибір територій-кандидатів до складу ЛСЕС (якщо ЛСЕС не утворена)
Формування наборів даних, необхідних для подальшого дослідження	
Моделювання структури	Моделювання галузевої структури (пропозиції по декількох варіантах, пропонується використання ймовірно-статистичних моделей), відбір кращих варіантів
Формування сценаріїв розвитку	Сценарний аналіз, експертні оцінювання
Моделювання динаміки ЛСЕС з визначеною галузевою структурою	Для кожного з сценаріїв розвитку виконати: 1. Скорочення розмірності задачі моделювання. 2. Масштабування розподілів даних з метою їх приведення до зручної для подальшого використання форми й дискретизація неперервних змінних. 3. Формулювання семантичних обмежень. 4. Пошук структур моделей-кандидатів. На цьому кроці з множини можливих структур моделей вибирається декілька кращих моделей-кандидатів за допомогою відповідних критеріїв якості та оцінюються їх параметри. Застосовується методика структурно-параметричної адаптації. 5. Порівняння характеристик моделей-кандидатів з метою вибору кращої для опису досліджуваного процесу 6. Вибір моделей-кандидатів (використовуючи критерії оцінювання якості моделей)
Моделювання складових сталого розвитку ЛСЕС	Для кожного сценарію розвитку ЛСЕС змоделювати її динаміку за впливу чинників: екологічної, соціальної, економічної складових, оцінити потенційні ризики та можливості досягнення показників сталого розвитку, визначених у відповідних державних програмах та стратегіях. Використовуються як окремі моделі, так і їх ансамблі
Прогнозування, оцінювання результатів	Побудувати прогнози розвитку ЛСЕС. Проаналізувати отримані результати, виконати оцінювання прогнозів, використовуючи систему критеріїв оцінювання якості прогнозів. Запропонувати варіанти структури та розвитку ЛСЕС.

Координація всіх етапів технологічного ланцюга у галузях, пріоритетних для ЛСЕС, зменшення транзакційних витрат, залучення інвестицій, оптимізація внутрішніх фінансових ресурсів, раціональне використання об'єктів соціальної сфери, охорони здоров'я, телекомунікацій, транспортної мережі, створюватиме загальний синергетичний ефект, дозволить забезпечити фінансову стійкість,

бюджетну незалежність громад та конкурентоспроможність підприємств. Ефективність управлінських рішень щодо формування ЛСЕС пропонується оцінювати, скориставшись комплексною оцінкою ефективності, запропонованої у [122], основу якої становить збалансована система показників, орієнтована на досягнення ключових якісних та кількісних чинників, що впливають на розвиток територіальних громад та добробут населення, визначених у адаптованих для України індикаторах досягнення цілей сталого розвитку в Україні на період до 2030 року [123-125].

## **Висновки до розділу 2**

На основі аналізу інформаційних джерел та сучасного стану та перспектив розвитку місцевого та регіонального рівня, сформовано методологічну основу моделювання розвитку ЛСЕС в умовах невизначеності.

1. Проаналізовано основні види невизначеності, характерні для місцевого рівня національної соціально-економічної системи, причини їх виникнення та методичні підходи до їх розкриття у задачах підтримки прийняття рішень в управлінні розвитком ЛСЕС.

2. Визначено, що подолання невизначеності є складною, але та на даний час не вирішеною проблемою підтримки прийняття рішень в управлінні місцевим розвитком.

3. Територіальні громади продемонстрували стійкість та згуртованість, навіть в складних умовах військової агресії, однак, як показала реформа децентралізації, не використаним залишається потенціал спільної взаємодії, яка може бути реалізована у рамках ЛСЕС, для обґрунтування складу яких потрібні відповідні аналітичні інструменти.

4. Встановлено, що потребує вирішення задача формування складу (структури) ЛСЕС, який би забезпечував не лише позитивну динаміку соціально-економічного розвитку, а й досягнення цілей сталого розвитку .

5. Встановлено, що для формування ЛСЕС важливо проаналізувати не лише поточний стан громад-кандидатів, виявити їх сильні та слабкі сторони, а й оцінити перспективи їх взаємодії в складі ЛСЕС, потенційну можливість досягнення цілей сталого розвитку, запропонувати варіанти ЛСЕС, забезпечити прийняття обґрунтованих рішень.

6. Обґрунтовано необхідність врахування нелінійності, нестаціонарності та структурних зрушень, що характерні для розвитку соціально-економічних систем місцевого рівня у процесі обґрунтування управлінських рішень щодо створення ЛСЕС.

7. Визначено, що для обґрунтування структури та дослідження динаміки розвитку ЛСЕС, необхідно розробити аналітичний інструментарій, у якому мають бути поєднані традиційні підходи: SWOT, PEST аналіз, експертні оцінювання, тощо, а й математичні моделі - регресійні, ймовірно-статистичні моделі, машинного навчання, тощо.

8. Встановлено, що для прогнозування розвитку ЛСЕС, необхідно застосовувати як моделі, які враховують попередній стан системи, так і такі, що не спираються на ретроспективу, а й забезпечують прогнози високої якості в умовах структурних зрушень – формування нової соціально-економічної системи ЛСЕС шляхом об'єднання декількох територіально близько розташованих громад (або окремих адміністративно-територіальних одиниць різних громад).

9. Розроблено методику моделювання сталого розвитку ЛСЕС, яка може бути реалізована у відповідній інформаційній технології.

## РОЗДІЛ 3

### РОЗРОБЛЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ МОДЕЛЮВАННЯ СТАЛОГО РОЗВИТКУ ЛСЕС

#### **3.1 Концептуальна схема інформаційної технології моделювання сталого розвитку ЛСЕС у контексті використання у відповідній СППР**

Запропонована інформаційна технологія моделювання сталого розвитку ЛСЕС базується на інтеграції методів інтелектуального аналізу даних, статистичного моделювання, машинного навчання та систем підтримки прийняття рішень в умовах невизначеності та неповноти інформації. Такий підхід дозволяє формувати комплексне уявлення про стан системи, виявляти приховані закономірності її розвитку та забезпечувати обґрунтованість управлінських рішень. Концептуально, інформаційна технологія реалізує багаторівневу структуру обробки та трансформації даних, яка відображає повний цикл перетворення первинної інформації у знання та рекомендації. До складу цієї структури входять такі функціональні рівні [126]:

- рівень збору та інтеграції даних, який забезпечує отримання даних із різнорідних джерел (статистичні бази, відкриті API, сенсорні дані, економічні показники), їх агрегацію, уніфікацію форматів та формування єдиного інформаційного простору;

- рівень попередньої обробки, призначений для очищення даних, обробки пропусків, виявлення та усунення аномалій, нормалізації та приведення часових рядів до узгодженого вигляду, що забезпечує підвищення якості подальшого моделювання;

- рівень аналізу та моделювання, на якому здійснюється побудова математичних моделей різних типів (регресійних, кластеризаційних, байєсівських, моделей часових рядів), що дозволяє виявляти залежності між показниками, оцінювати вплив факторів та формувати прогнози розвитку системи;

- рівень оцінювання ризиків та сценарного аналізу, який забезпечує оцінювання невизначеності, формування множини можливих сценаріїв розвитку ЛСЕС, а також кількісну оцінку ризиків на основі ймовірнісних та стохастичних методів;

- рівень підтримки прийняття рішень, що забезпечує генерацію рекомендацій, ранжування альтернатив та вибір оптимальних управлінських стратегій з урахуванням заданих критеріїв ефективності.

Ключовою особливістю запропонованої інформаційної технології є перехід від класичного підходу «дані-прогноз» до більш складної та інформаційно насиченої парадигми: дані-ознаки-ризик-сценарій-рекомендації. Крім того, враховуючи особливості управління соціально-економічними системами, потрібен зворотній зв'язок щодо ефективності прийнятих рішень.

У межах цієї парадигми первинні дані трансформуються у простір ознак, який відображає суттєві характеристики системи. На основі цього простору здійснюється оцінювання ризиків, що дозволяє врахувати не лише очікувані значення показників, але й їх варіативність, нестабільність та потенційні загрози. Подальше формування сценаріїв розвитку забезпечує аналіз альтернативних траєкторій функціонування системи, що є критично важливим для прийняття як оперативних, так і стратегічних рішень в умовах невизначеності.

Запропонована концептуальна схема також передбачає наявність зворотних зв'язків між рівнями, що забезпечує адаптивність та керованість системи. Зокрема, результати моделювання та оцінювання ризиків можуть використовуватися для уточнення на етапі попередньої обробки даних щодо розширення часового перетину збору даних або корекції набору ознак, що підвищує точність та стійкість моделей.

Важливою характеристикою інформаційної технології є її орієнтація на роботу з динамічними, неоднорідними та частково невизначеними даними, що є типовим для задач моделювання сталого розвитку. Це обумовлює використання гібридних підходів, які поєднують детерміновані та ймовірнісні методи, а також інтеграцію моделей різної природи в єдину аналітичну систему.

Наприклад, для проектування складу ЛСЕС можна запропонувати інформаційну технологію, представлену на рис. 3.1.



Рисунок 3.1 – Інформаційна технологія обґрунтування рішень щодо формування та розвитку ЛСЕС

ЛСЕС розглядається з точки зору складної багаторівневої системи, між елементами системи здійснюється обмін ресурсами: виробничими, трудовими, інвестиційними, спільно використовується соціальна та транспортна інфраструктури. Таким чином, запропонована концептуальна схема інформаційної технології забезпечує системний підхід до аналізу та прогнозування розвитку ЛСЕС, дозволяє враховувати складну структуру взаємозв'язків між показниками, невизначеність середовища та

багатоваріантність можливих сценаріїв, що в сукупності створює основу для підвищення ефективності прийняття управлінських рішень.

Інформаційна технологія пропонується до використання у складі СППР органів державного управління та місцевого самоврядування. Однак, вона може бути використана й окремо для розв'язання задач моделювання виробничої спеціалізації підприємств, інфраструктури громади чи району, тощо.

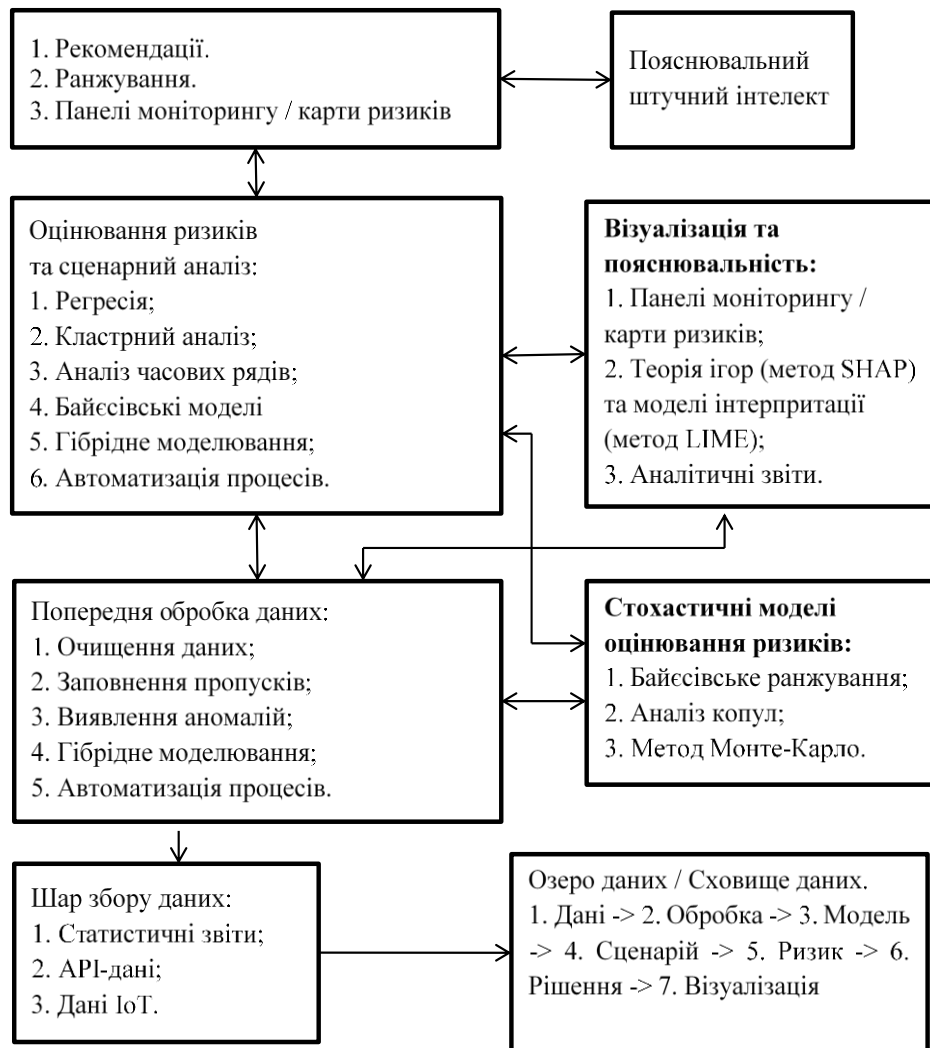


Рисунок 3.2 – Архітектура СППР на основі інформаційної технології моделювання розвитку ЛСЕС

Архітектура такої СППР має бути побудована за модульним багаторівневим принципом і забезпечувати повний цикл обробки даних — від їх отримання до формування обґрунтованих управлінських рішень. Запропонована архітектура орієнтована на роботу з великими обсягами різномірних даних, підтримку аналітики в реальному або квазі-реальному часі, а також інтеграцію

методів машинного навчання, статистичного аналізу та ймовірнісного моделювання в єдиному інформаційному середовищі.

До складу архітектури входять основні функціональні рівні, представлені у таблиці 3.1:

Таблиця 3.1 — Функціональний склад рівнів архітектури СППР

Рівень	Основне призначення	Ключові функції	Методи та інструменти	Результат
збору та інтеграції даних	збір, зберігання та інтеграція даних	інтеграція різнорідних джерел (API, Open data, IoT); організація Data Lake / DWH; формування часових рядів; забезпечення цілісності, збереження	Data Lake (S3, MinIO), DWH (PostgreSQL, OLAP), API, streaming; Time-series DB (TimescaleDB)	консолідоване, узгоджене сховище даних
попередньої обробки	підготовка даних до моделювання	ETL/ELT процеси, очищення та нормалізація, обробка пропусків та аномалій, відбір значущих чинників	ETL pipelines (Airflow, Prefect), Normalization (Min-Max, Z-score), Imputation (kNN, EM, Kalman), Feature engineering	узгоджений простір ознак
аналізу та моделювання	побудова моделей та прогнозування	побудова моделей, навчання, оцінювання параметрів, валідація та порівняння, адаптація моделей	ML (regression, ensembles, NN); Time series (ARIMA, LSTM); Bayesian networks; Hybrid models	Прогнози та формалізовані залежності
оцінювання ризиків та сценарного аналізу	оцінювання невизначеності та ризиків	кількісна оцінка ризиків, агрегування ризиків, сценарне моделювання, оцінювання ризиків, сценаріїв	Monte Carlo simulation; Bayesian inference; Risk aggregation (weighted, top-k); Copula models	розподіли ризиків та інтегральні оцінки
підтримки прийняття рішень	Формування варіантів управлінських рішень	генерація рекомендацій, багатокритеріальна оптимізація, ранжування сценаріїв, візуалізація та XAI	MCDA; дашборди; BI; SHAP; LIME та оцінювання сценаріїв	управлінські рішення

Інформаційна технологія моделювання сталого розвитку ЛСЕС є ключовим компонентом відповідних СППР та забезпечує повний життєвий цикл роботи з даними — від їх отримання до формування аналітичних представлень, придатних для моделювання, оцінювання ризиків і генерації звітів для підтримки прийняття управлінських рішень.

На відміну від аналогічних інформаційних технологій, де акцент робиться на зберіганні та накопиченні даних, дана інформаційна технологія виконує когнітивну функцію трансформації даних у знання, що безпосередньо впливають на прийняття рішень. Такий підхід відповідає сучасній парадигмі розроблення СППР (піраміді DIKW) [127] (рис 3.3).



Рисунок 3.3 – Data-Information-Knowledge- Wisdom/Decision [127]

У межах інформаційної технології передбачено:

- забезпечення якості та достовірності інформації;
- узгодження різнорідних джерел;
- синхронізацію часових рядів;
- зниження невизначеності;
- підготовку даних до аналітичної обробки.

Це робить її не просто інфраструктурним компонентом, а інформаційно-аналітичною основою всієї системи підтримки прийняття рішень.

Інформаційне наповнення для моделювання сталого розвитку ЛСЕС формується шляхом інтеграції різнорідних даних з різних джерел, що відображають багатовимірну, динамічну та ієрархічну природу ЛСЕС. Такий

підхід дозволяє забезпечити комплексне охоплення факторів, що впливають на розвиток системи, а також створює основу для побудови адекватних моделей, оцінювання ризиків і формування обґрунтованих управлінських рішень.

Для більш детального розкриття ролі інформаційної технології в архітектурі СППР систематизовано її ключові функції, їх зміст та значення у контексті підтримки прийняття рішень.

Таблиця 3.2 – Функції розробленої інформаційної технології у контексті використання її у складі СППР

Функція	Опис	Значення для СППР
Інтеграція даних	Об'єднання різнорідних джерел	Формування єдиного інформаційного простору
Очищення та узгодження	Усунення шуму, пропусків, аномалій	Зниження невизначеності
Формування ознак	Побудова набору чинників	Основа для моделей
Аналітична підготовка	Агрегація, трансформація	Підтримка прогнозування
Забезпечення якості	Контроль цілісності, узгодженості даних	Підвищення достовірності рішень

На відміну від традиційних підходів, дана інформаційна технологія передбачається до використання у СППР, де джерела даних відіграють не лише роль постачальників інформації, але й виступають активними елементами формування знань, оскільки їх інтеграція дозволяє виявляти приховані залежності, кореляції та причинно-наслідкові зв'язки між показниками.

Система джерел даних щодо розвитку ЛСЕС виступає не просто сукупністю інформаційних потоків, а інтегрованою інформаційною основою, що забезпечує формування цілісного уявлення про стан ЛСЕС, створює передумови

для ефективного аналізу, прогнозування та підтримки прийняття управлінських рішень.

Таблиця 3.3 – Роль джерел даних, що описують стан та динаміку ЛСЕС, їх складових та зовнішнє середовище

Тип джерела	Приклади	Роль у СППР
Державні дані	Державна служба статистики, міністерства, обласні та районні адміністрації, Є-Data	Забезпечують базові макроекономічні та показники місцевого та сталого розвитку, що використовуються як референтна основа для аналізу стану системи та побудови індикаторів сталого розвитку
Міжнародні джерела	World Bank, OECD	Дозволяють здійснювати міждержавні та міжрегіональні порівняння, оцінювати позицію системи у глобальному контексті та формувати бенчмарки
ІоТ / сенсорні дані	Екологічні сенсори, транспортні системи, супутникові дані	Забезпечують високочастотні дані в режимі реального часу, що дозволяє оперативно реагувати на зміни та виявляти аномальні ситуації
Дані суб'єктів господарювання	Бюджети, інвестиції, доходи	Відображають економічну динаміку, структуру витрат та ресурсний потенціал системи, що є критичним для прогнозування розвитку
Локальні дані громад	Звіти ОМС, внутрішні системи	Забезпечують деталізовану інформацію на рівні громад, що дозволяє враховувати локальні особливості та підвищує точність моделей

Інтеграція зазначених джерел даних характеризується низкою особливостей, що суттєво ускладнюють побудову ефективного інформаційно-аналітичного середовища, спрямованого на забезпечення підтримки прийняття рішень якісною аналітичною інформацією.

Насамперед, дані мають гетерогенний характер і можуть бути представлені у структурованому, напівструктурованому та неструктурованому вигляді. Крім

того, джерела відрізняються за частотою оновлення — від потокових даних у режимі реального часу до агрегованих річних показників, що потребує додаткових процедур синхронізації. Важливим фактором є також варіативність якості та достовірності даних, що обумовлює необхідність їх перевірки та очищення. У даних часто присутні пропуски, шуми та аномалії, які можуть негативно впливати на результати аналізу та моделювання. Окремою проблемою є необхідність узгодження часових і просторових масштабів, для забезпечення коректності порівняння та інтеграції показників.

У зв'язку з цим особливостями, в інформаційній технології застосовуються гібридні підходи до інтеграції даних, які поєднують класичні ETL/ELT-процеси з методами об'єднання даних з різних джерел, процедурами узгодження часових рядів та алгоритмами оцінювання достовірності даних [128]. Такий підхід дозволяє підвищити якість інформаційної бази та забезпечити її придатність до подальшого аналізу.

Для забезпечення ефективного управління різнорідними даними, реалізується багаторівнева архітектура їх зберігання, яка передбачає розподіл даних залежно від ступеня їх обробки та призначення. Такий підхід дозволяє оптимізувати продуктивність системи, забезпечити гнучкість аналітичних процесів і підтримати як оперативний, так і стратегічний рівні прийняття рішень. Кожен рівень архітектури виконує окрему функціональну роль у трансформації даних — від збереження сирової інформації до формування агрегованих аналітичних представлень, придатних для використання в СППР.

Таблиця 3.4 – Опис багаторівневої архітектури зберігання даних

Рівень	Технології	Призначення	Роль у СППР
Data Lake	S3, MinIO	Сирі дані	Гнучкість та історичність
OLTP / Time-Series	PostgreSQL, TimescaleDB	Операційні дані	Швидкий доступ
Data Warehouse	OLAP	Агреговані дані	Аналітика та підтримки прийняття рішень

На рис. 3.4 представлено узагальнену архітектуру, яка охоплює три основні етапи: збір даних, попередню обробку та аналіз даних, інтерпретація та представлення результатів.

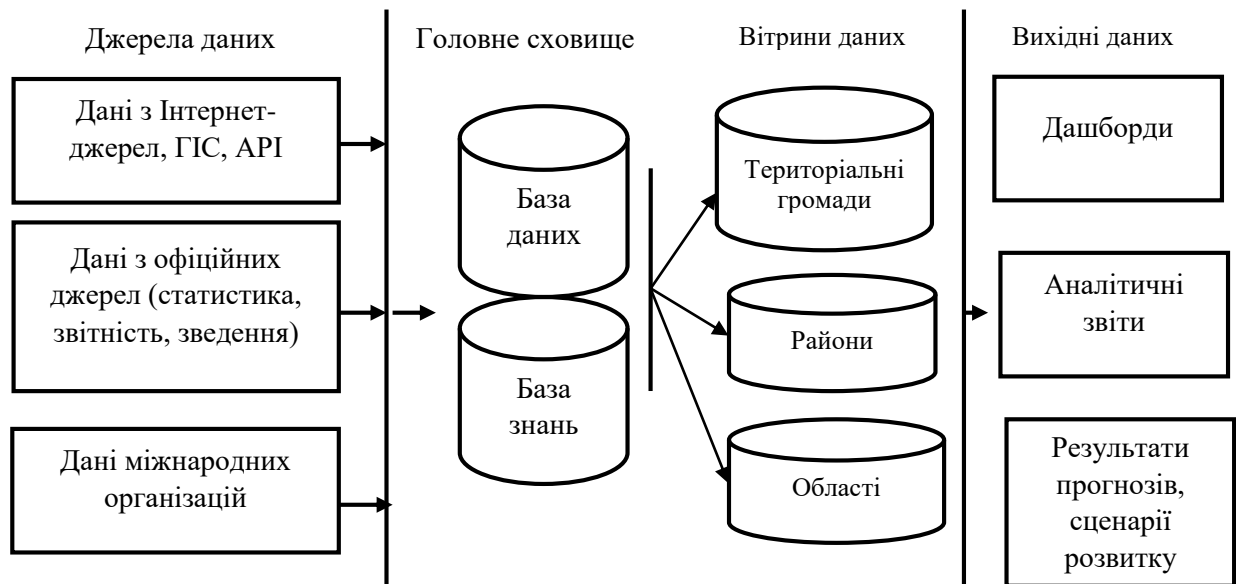


Рисунок 3.4 – Етапи оброблення даних, що реалізовані у інформаційній технології моделювання сталого розвитку ЛСЕС

На етапі збору даних здійснюється інтеграція інформації з різномірних джерел, зокрема API операторів, даних OpenStreetMap та GTFS транспортних даних, GIS. Дані отримуються за допомогою механізмів скрейпінгу (Data Scraper) та інструментів маршрутизації (Graphhopper Routing Engine), що дозволяє формувати первинні потоки інформації [129].

Етап попередньої обробки включає трансформацію даних у стандартизований формат (GBFS), збереження потоків геолокаційних даних, а також побудову похідних структур, зокрема визначення поїздок та формування наборів даних про переміщення. Додатково реалізуються процедури очищення, агрегації та підготовки даних до подальшого аналізу.

На етапі аналітики та візуалізації здійснюється обробка даних із використанням інструментів Python (за можливості й інструменти компанії SAS Institute) (рис. 3.5), що включає описову статистику, просторовий та часовий аналіз, а також аналіз “першої та останньої милі”. Результати аналізу

відображаються у вигляді візуалізацій (графіків, діаграм, карт), що забезпечує інтерпретацію даних та підтримку прийняття рішень.

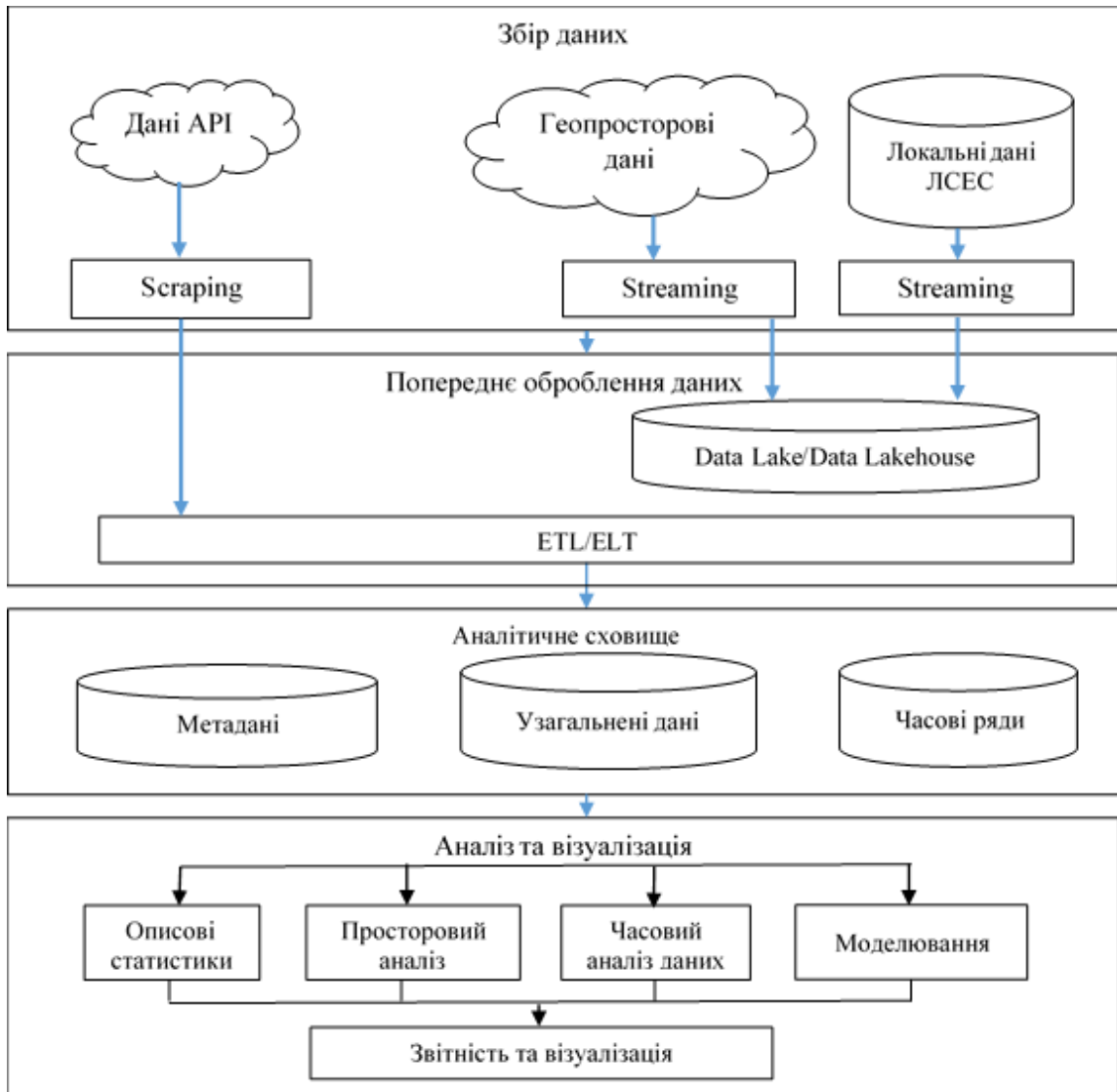


Рисунок 3.5 – Етапи збору та оброблення, аналізу та візуалізації даних

ETL/ELT-процеси є центральним механізмом функціонування СППР, оскільки саме вони забезпечують трансформацію первинних, часто неструктурованих і неоднорідних даних у узгоджене аналітичне представлення, придатне для подальшого моделювання, оцінювання ризиків і прийняття управлінських рішень. У контексті дослідження сталого розвитку ЛСЕС ці процеси виконують не лише технічну функцію обробки даних, але й відіграють ключову роль у зниженні невизначеності та підвищенні якості інформаційної бази системи.

На етапі «Збір даних» здійснюється збір даних із різноманітних джерел, включаючи API, потокові сервіси та файлові сховища. Це дозволяє сформувавши повну та актуальну інформаційну базу, що відображає поточний стан системи.

Етап «Попереднє оброблення даних» є найбільш критичним з точки зору використання інформаційної технології у складі СППР, оскільки саме тут відбувається очищення даних, нормалізація, узгодження форматів, обробка пропусків та аномалій, а також формування похідних ознак. Якість виконання цього етапу безпосередньо впливає на точність моделей і достовірність подальших управлінських рішень, оскільки дозволяє суттєво зменшити рівень невизначеності.

На етапі «Завантаження до сховища» підготовлені дані завантажуються у відповідні сховища (Data Lake, OLTP, Data Warehouse) [130], що забезпечує їх доступність для аналітичних запитів, побудови моделей та візуалізації. Це створює основу для подальшої роботи всіх компонентів СППР.

Таблиця 3.5 — ETL процеси у СППР

Етап	Основні операції	Роль у прийнятті рішень
Збір	API, потокове оброблення, файли	Формування інформаційної бази
Оброблення	очищення, нормалізація	Зменшення невизначеності
Завантаження	збереження у сховищах	Підготовка до аналізу

Забезпечення якості даних є фундаментальною умовою ефективного їх використання у СППР, оскільки саме якість вхідної інформації визначає точність моделей, достовірність оцінювання ризиків і, відповідно, обґрунтованість прийнятих рішень. У цьому контексті інформаційно-аналітичне середовище реалізує комплекс методів і процедур, спрямованих на виявлення та усунення недоліків даних, їх узгодження та підвищення надійності. Основні механізми забезпечення якості даних, наведено в таблиці 3.6

Таблиця 3.6 — Процедури забезпечення якості даних

Назва процедури	Методи	Вплив на якість СППР
Обробка пропусків	kNN, EM, Kalman	Зменшення похибки
Нормалізація	Min-Max, Z-score	Узгодження масштабу
Аномалії	IQR, Isolation Forest	Виявлення ризиків
Синхронізація	передискретизація	Коректність моделей
Управління версіями даних	версіонування даних	Відтворюваність

Дана інформаційна технологія є інтегруючим компонентом СППР, який забезпечує безперервний обмін даними між різними функціональними рівнями системи управління. Вона виконує роль зв'язуючої ланки, що трансформує дані на кожному етапі їх обробки та передає результати у вигляді, придатному для подальшого аналізу, оцінювання ризиків і підтримки прийняття рішень. Взаємодію інформаційної технології за основними рівнями СППР наведено в таблиці 3.7.

Таблиця 3.7 — Інтеграція інформаційної технології з рівнями СППР

Рівень СППР	Взаємодія
Моделювання	надання простору чинників
Аналіз ризиків	передача розподілів
Прийняття рішень	дані для дашбордів
Попереднє оброблення	очищені дані

Таким чином, інформаційна технологія, запропонована в даній роботі, формує інформаційно-аналітичне середовище СППР, забезпечує комплексну інтеграцію, обробку та трансформацію даних у знання, придатні для прийняття управлінських рішень. На відміну від традиційних підходів, вона виконує не

лише інфраструктурну, але й аналітичну та методологічну функцію, забезпечуючи зниження невизначеності, підвищення якості моделей та обґрунтованість прийнятих рішень у задачах сталого розвитку ЛСЕС.

### **3.2 Проєктування підсистеми попереднього оброблення даних**

Підсистема попереднього оброблення даних є критично важливим компонентом інформаційної технології моделювання сталого розвитку ЛСЕС і виконує функцію підготовки вхідних даних до подальшого аналізу, моделювання та оцінювання ризиків.

На відміну від ETL-рівня, який забезпечує інтеграцію та базову трансформацію даних, дана підсистема реалізує більш глибоку аналітичну обробку, спрямовану на підвищення якості даних, зменшення невизначеності та формування стабільного простору ознак.

Основною метою підсистеми є мінімізація впливу шуму, пропусків, аномалій та структурних спотворень на результати моделювання, що безпосередньо впливає на точність прогнозів і коректність управлінських рішень.

Підсистема попередньої обробки даних займає проміжне, але критично важливе місце в архітектурі СППР, розташовуючись між рівнем обробки даних та рівнем моделювання.

Вона виконує функцію трансформації первинних, частково оброблених даних у якісно підготовлений простір ознак, придатний для подальшого аналітичного моделювання.

На відміну від ETL/ELT-процесів, які забезпечують базову інтеграцію та технічну обробку даних, підсистема попередньої обробки реалізує поглиблену аналітичну підготовку, спрямовану на зменшення впливу шуму, пропусків, аномалій і структурних спотворень.

Це дозволяє підвищити стабільність моделей, зменшити похибку прогнозування та забезпечити коректність оцінювання ризиків.

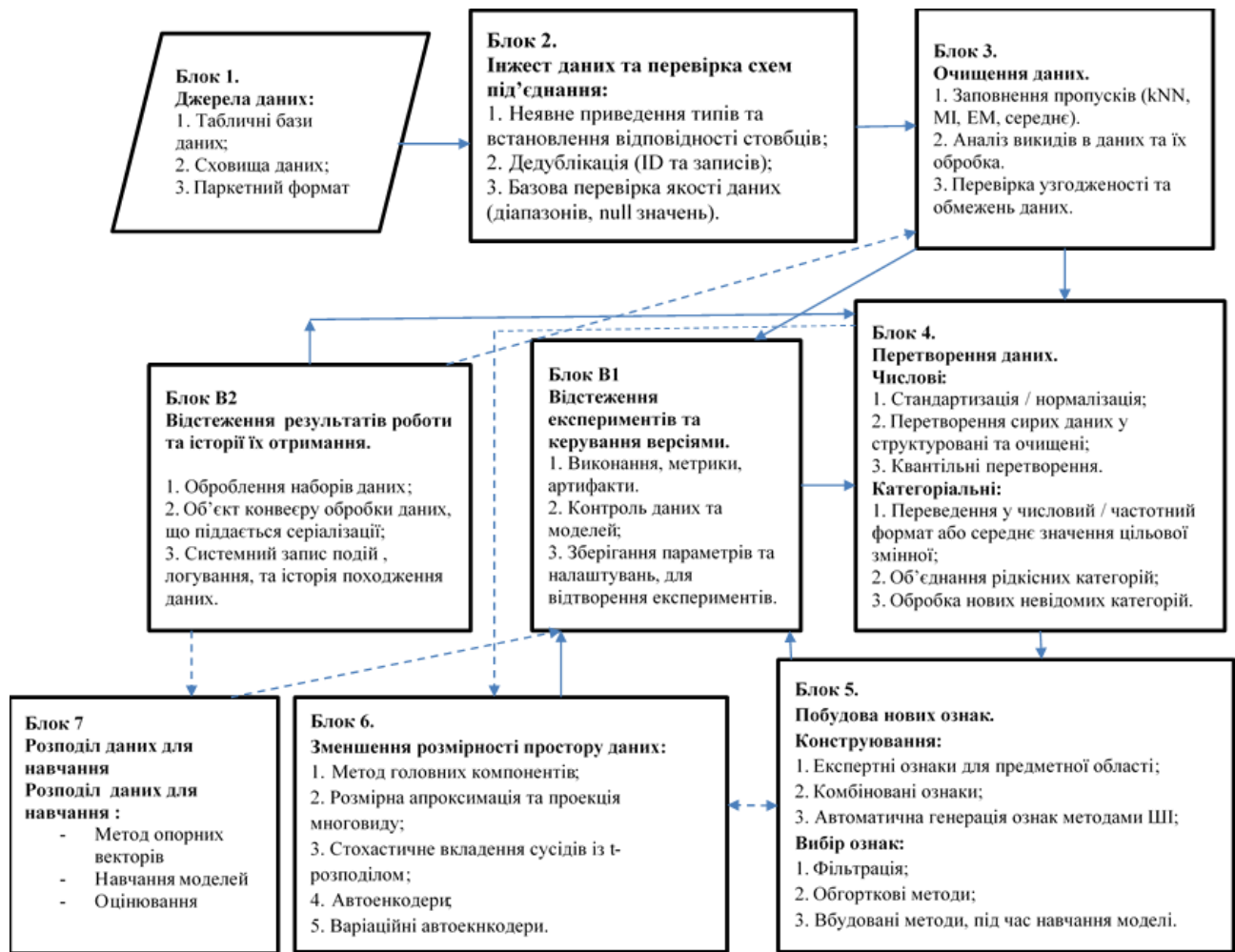


Рисунок 3.9 – Підсистема попередньої обробки даних

Фактично, саме на цьому рівні формується якість вхідного простору ознак, від якої безпосередньо залежить ефективність усіх наступних етапів функціонування СППР — від моделювання до прийняття рішень.

Таблиця 3.8 — Функції попередньої обробки даних

Функція	Опис	Вплив на СППР
Підготовка даних	Очищення, узгодження, стандартизація	Забезпечує коректність вхідних даних
Зниження шуму	Фільтрація та згладжування	Зменшує дисперсію похибок
Обробка пропусків	Імпутація значень	Запобігає зміщенню моделей
Формування часових рядів	Синхронізація, декомпозиція	Підвищує якість прогнозування
Підвищення робастності	Обробка викидів та аномалій	Забезпечує стійкість моделей

Підсистема попередньої обробки виступає критичним буфером між даними та моделями, який перетворює нестабільні, зашумлені та неповні дані у структуровану аналітичну основу, реалізується як невід’ємна складова автоматизованих конвеєрів даних та забезпечує безперервну інтеграцію з іншими рівнями архітектури СППР. Саме на цьому рівні відбувається перехід від «даних» до «якісної інформації», що визначає надійність усієї системи підтримки прийняття рішень.

Таблиця 3.9 — Місце підсистеми в pipeline СППР

Етап	Вхід	Вихід	Роль
оброблення	сирі/частково оброблені дані	базово трансформовані дані	інтеграція
підготовка до аналізу	неочищені дані	очищений набір чинників	підготовка до моделювання
моделювання	простір ознак	прогнози, залежності	аналітика

Інформаційна технологія функціонує як розширений аналітичний етап у межах ETL/ELT-процесів, зокрема на стадії підготовки до аналізу, де виконується поглиблена обробка даних із використанням статистичних і машинних методів.

Таблиця 3.10 — Інтеграція підсистеми попередньої обробки в СППР

Компонент СППР	Тип інтеграції	Функціональна роль
ETL/ELT процеси	Розширений етап підготовки даних	Поглиблена обробка, очищення та нормалізація даних
Моделювання	Передача набору ознак	Забезпечення якісних вхідних даних для моделей
Аналіз ризиків	Передача аномалій	Використання аномалій як факторів ризику
Зберігання даних	Запис оброблених даних	Збереження узгоджених та очищених наборів

Інтеграція з основними компонентами СППР забезпечує узгоджений рух даних у межах наскрізного конвеєру даних та реалізацію концепції переходу від сирих даних до обґрунтованих рішень.

Крім інтеграції з іншими компонентами системи, підсистема підтримує ряд механізмів автоматизації, які забезпечують стабільність, масштабованість та відтворюваність аналітичних процесів.

Таблиця 3.11 – Механізми автоматизації підсистеми

Механізм	Опис	Значення для СППР
Версіонування даних	Збереження різних версій оброблених наборів	Забезпечення відтворюваності результатів
Відтворюваність конвеєра даних	Фіксація параметрів та кроків обробки	Підвищення надійності аналітики
Автоматичне оновлення	Регулярне виконання конвеєра даних	Актуальність даних
Адаптивність методів	Налаштування під нові типи даних	Гнучкість системи

Попередня обробка даних - не лише етап підготовки даних, але й інтегрований, автоматизований компонент, який може бути використаний у СППР, так, що забезпечує узгодженість усіх рівнів системи, підвищує якість аналітичних результатів і створює передумови для стабільного функціонування моделей та прийняття обґрунтованих управлінських рішень.

### 3.3 Підсистема побудови математичних моделей

Підсистема побудови математичних моделей є ядром аналітичної частини інформаційної технології та виконує ключову роль у трансформації підготовлених даних у формалізовані знання, придатні для прогнозування, оцінювання ризиків і підтримки прийняття управлінських рішень.

На відміну від інших рівнів архітектури, які забезпечують якість та узгодженість даних, дана підсистема відповідає за побудову моделей, здатних відображати складні нелінійні, стохастичні та причинно-наслідкові залежності між показниками розвитку локальних соціально-економічних систем (ЛСЕС).



Рисунок 3.10 – Використання даних у процесі побудови моделей

На рис. 3.10 представлено типовий процес обробки даних при вирішенні задач моделювання, який складається з наступних етапів.

Етап 1. Постановка задачі та її формалізація, що включає:

- 1.1. визначення цілей (прогноз, класифікація, оцінка ризику);
- 1.2. формування цільової змінної;
- 1.3. вибір метрик оцінювання якості моделі (MAE, RMSE, F1, ROC-AUC тощо);
- 1.4. врахування специфіки сталого розвитку (екологічні, соціальні, економічні індикатори).

Етап 2. Збір та інтеграція даних, з різноманітних джерел, як то:

- 2.1. статистичні дані (Державна служба статистики України);

- 2.2. відкриті API та реєстри;
- 2.3. дані з різноманітних датчиків та сенсорів (IoT-дані);
- 2.4. геодані;
- 2.5. інтеграція різнорідних даних: просторових; часових; табличних.

Етап 3. Попередня обробка даних. Цей етап включає:

- 3.1. очищення;
- 3.2. обробка пропусків;
- 3.3. видалення аномалій;
- 3.4. нормалізації та стандартизацію даних;
- 3.5. кодування категоріальних ознак (переведення категоріальних позначень у числові значення);
- 3.6. синхронізація часових рядів;
- 3.7. агрегація по територіях (громада, регіон).

Етап 4. Дослідницький аналіз даних, що включає:

- 4.1. статистичні характеристики;
- 4.2. кореляційний аналіз;
- 4.3. виявлення залежностей;
- 4.4. аналіз розподілів;
- 4.5. візуалізація просторових патернів.

Етап 5. Формування ознак моделі та створення нових індикаторів:

- 5.1. інтегральні показники сталого розвитку;
- 5.2. індекси вразливості;
- 5.3. лагові змінні (для часових рядів);
- 5.4. просторові ознаки (сусідство, кластери);
- 5.5. відбір ознак.

Етап 6. Розбиття даних на навчальний, валідаційний та тестовий набори даних, із використанням методів – відкладеної вибірки, крос-валідації (перехресної перевірки) та часового розбиття вибірки.

Етап 7. Побудова та навчання моделі, що включає вибір моделей – регресія (лінійна, гребенева, Lasso), дерева рішень (випадковий ліс), градієнтний бустинг

(градієнтний бустинг, лайт градієнтний бустинг), нейронні мережі. В рамках цього етапу важливу роль грає підбір гіперпараметрів різними методами, як то пошук по сітці та байєсівської оптимізації.

Етап 8. Оцінювання якості моделі, відбувається із використанням відповідних метрик для різних моделей:

8.1. регресія – статистики RMSE та MAE;

8.2. класифікація – статистики Accuracy, F1-score;

Окрім цього проводиться перевірка узагальнюючої здатності та аналіз перенавчання моделі.

Етап 9. Інтерпретація результатів включає аналіз важливості ознак та використання методів пояснення для оцінки впливу факторів на сталий розвиток (методи адитивного пояснення, наприклад, на основі значень Шеплі та локально інтерпретована модель-агностичні пояснення).

Етап 10. Впровадження моделі передбачає зазвичай:

10.1. інтеграцію моделі в інформаційну систему;

10.2. створення API або аналітичної панелі;

10.3. автоматизація прогнозування.

Етап 11. Моніторинг та підтримка моделі містить:

11.1. контроль якості прогнозів;

11.2. відстеження дрейфу даних;

11.3. періодичне перенавчання моделей;

11.4. версіонування моделей і даних.

Ключовою особливістю розробки є використання гібридного (багатомодельного) підходу, що передбачає поєднання різних класів моделей залежно від структури даних, рівня невизначеності та цілей аналізу. Це дозволяє забезпечити баланс між точністю прогнозування, інтерпретованістю результатів і стійкістю моделей до змін середовища.

Інформаційна технологія функціонує на рівні моделювання та виступає ключовою ланкою між підготовкою даних і оцінюванням результатів моделювання. Вона отримує на вхід очищений та узгоджений простір ознак після

попередньої обробки даних і формує прогностні оцінки та залежності, які передаються до інших підсистем СППР, зокрема, аналізу ризиків, оцінювання моделей-кандидатів.

Для систематизації функціонального призначення модуля побудови математичних моделей, доцільно виокремити його основні функції, які охоплюють повний цикл моделювання — від вибору та навчання моделей до генерації прогнозів і передачі результатів у підсистему оцінювання результатів. Кожна з цих функцій відіграє важливу роль у формуванні аналітичної основи СППР та забезпеченні обґрунтованості управлінських рішень. Основні функції підсистеми моделювання наведено в таблиці 3.12.

Таблиця 3.12 — Функції підсистеми моделювання

Функція	Опис	Роль у СППР
Побудова моделей	Вибір та навчання моделей	Формування аналітичної основи
Оцінювання параметрів	Налаштування параметрів моделей	Підвищення точності
Валідація	Перевірка якості моделей	Забезпечення надійності
Порівняння моделей	Вибір найкращої моделі	Оптимізація результатів
Генерація прогнозів	Отримання майбутніх значень	Основа для рішень
Передача результатів	Інтеграція з рівнем опрацювання ризиків	Формування ризиків

Передбачено використання різних класів моделей, кожен з яких орієнтований на вирішення окремих аналітичних задач — від виявлення залежностей і сегментації даних до прогнозування та моделювання невизначеності. Використання широкого спектра моделей дозволяє комплексно аналізувати ЛСЕС, враховувати різні аспекти даних та підвищувати якість отриманих результатів.

Основні класи моделей, що застосовуються в інформаційній технології, наведено в таблиці 3.13.

Таблиця 3.13 – Класи моделей застосовувані у інформаційній технології моделювання сталого розвитку ЛСЕС

Клас моделей	Приклади	Призначення	Переваги
Регресійні	лінійна, гребенева, Lasso	Аналіз залежностей	Інтерпретованість
Кластеризація	k-means, DBSCAN	Сегментація	Виявлення структури
Часові ряди	ARIMA, SARIMA, LSTM	Прогнозування	Динаміка системи
Байєсівські	Мережі Байєса	Причинність	Опрацювання невизначеністю
Ансамблі / ML	Випадковий ліс, градієнтний бустинг	Прогнозування	Висока точність

ЛСЕС - складні соціально-економічні системи, що функціонують в мінливому середовищі під впливом внутрішніх та зовнішніх чинників, тому жоден окремий клас моделей не здатний повною мірою відобразити всі аспекти динаміки, невизначеності та взаємозв'язків між показниками.

Використання гібридних підходів у підсистемі моделювання дозволяє поєднати переваги різних класів моделей та компенсувати їхні обмеження.

Зокрема, комбінування статистичних і нейронних моделей забезпечує врахування як лінійних, так і нелінійних закономірностей, інтеграція регресійних і байєсівських підходів — поєднання інтерпретованості та роботи з невизначеністю, а використання кластеризації разом із прогнозуванням — адаптацію моделей до різних груп об'єктів або сценаріїв. У результаті це сприяє підвищенню точності прогнозів, гнучкості аналітичної системи та обґрунтованості прийняття управлінських рішень.

У зв'язку з цим у застосовується гібридний підхід до моделювання, який передбачає комбінування різних типів моделей для підвищення точності прогнозів, покращення інтерпретованості результатів та врахування багатовимірної структури даних. Основні варіанти таких комбінацій наведено в таблиці 3.14

Таблиця 3.14 – Гібридні підходи

Комбінація	Ідея	Результат
ARIMA-LSTM	Поєднання класичних статистичних моделей для виявлення тренду та сезонності з нейронними мережами для моделювання нелінійних залежностей	Підвищення точності прогнозування за рахунок урахування як лінійних, так і складних нелінійних компонент
Регресійні моделі-мережа Байєса	Інтеграція регресійного аналізу для оцінки впливу факторів із байєсівськими мережами для моделювання причинно-наслідкових зв'язків та невизначеності	Покращення інтерпретованості результатів і можливість роботи з неповними та зашумленими даними
Кластеризація-Прогноз	Використання кластеризації для сегментації об'єктів або періодів із подальшим застосуванням моделей прогнозування для кожного сегмента	Формування більш точних і адаптивних прогнозів та персоналізація сценаріїв розвитку

Процес побудови математичних моделей реалізується як послідовний конвеєр, що охоплює всі етапи — від специфікації моделі до генерації прогнозів. Такий підхід забезпечує системність, відтворюваність і контроль якості моделей на кожному етапі.

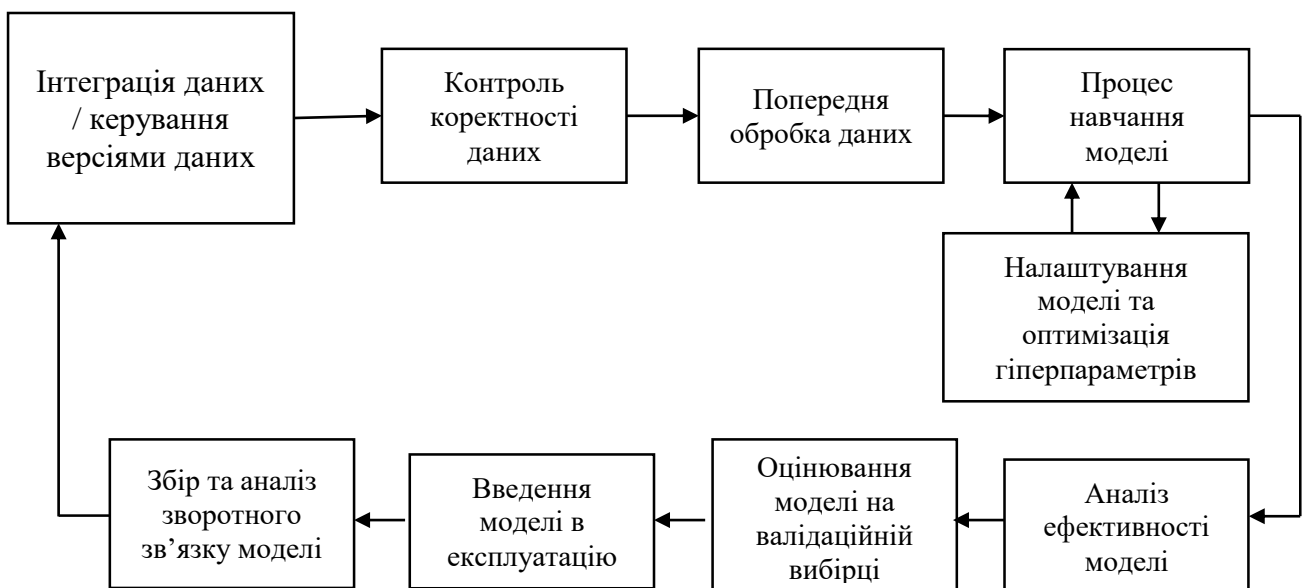


Рисунок 3.11 – Схема побудови моделей

Важливою особливістю є використання формалізованих процедур валідації та порівняння моделей, що дозволяє обрати найбільш ефективну модель для подальшого використання в СППР.

Таблиця 3.15 – Конвейєрне моделювання

Етап	Опис	Результат
Специфікація	Вибір моделі та змінних	Структура моделі
Навчання	Оцінювання параметрів	Навчена модель
Валідація	Train/Test, CV	Оцінка якості
Порівняння	Метрики (RMSE, MAE)	Вибір моделі
Прогнозування	Генерація значень	Прогнози

Побудова математичних моделей забезпечує формалізацію складних процесів розвитку ЛСЕС шляхом інтеграції статистичних, економетричних, машинних і байєсівських підходів, тощо. Використання гібридного моделювання дозволяє підвищити точність прогнозів, врахувати невизначеність і забезпечити стійкість моделей до змін середовища. Це створює аналітичну основу для подальшого використання розробленої інформаційної технології для прийняття обґрунтованих управлінських рішень в управлінні ЛСЕС, забезпеченню досягнення цілей сталого розвитку.

### **3.4 Реалізація прогнозування та сценарного аналізу розвитку ЛСЕС**

Модулі прогнозування та сценарного аналізу є логічним продовженням модуля моделювання та забезпечують перехід від точкових прогнозів до аналізу множини можливих траєкторій розвитку (ЛСЕС) в умовах невизначеності та для досягнення цілей сталого розвитку.

Основною метою розроблення даних модулів є формування альтернативних сценаріїв розвитку, оцінювання стійкості системи до зовнішніх

і внутрішніх впливів, а також підготовка інформаційної основи для оцінювання структури системи, ризиків і прийняття відповідних управлінських рішень.

На відміну від класичного прогнозування, що орієнтоване на єдине очікуване значення, підсистема реалізує підхід: «прогноз-множина сценаріїв-оцінка ризику/(та/або невизначеності)-підтримка рішення»

Модулі функціонують на стику шарів: Моделювання та Аналізу ризиків і виконують роль трансформаційного рівня, який переводить результати моделювання у форму, придатну для урахування невизначеності, аналізу досягнення цілей сталого розвитку, моніторингу ефективності управління соціально-економічним розвитком складових ЛСЕС (громад, районів та/або їх об'єднань), за потреби, може бути додано модуль аналізу прогнозів та візуалізації результатів.

На рис. 3.12 представлено основні типи сценаріїв розвитку ЛСЕС у часовій динаміці.

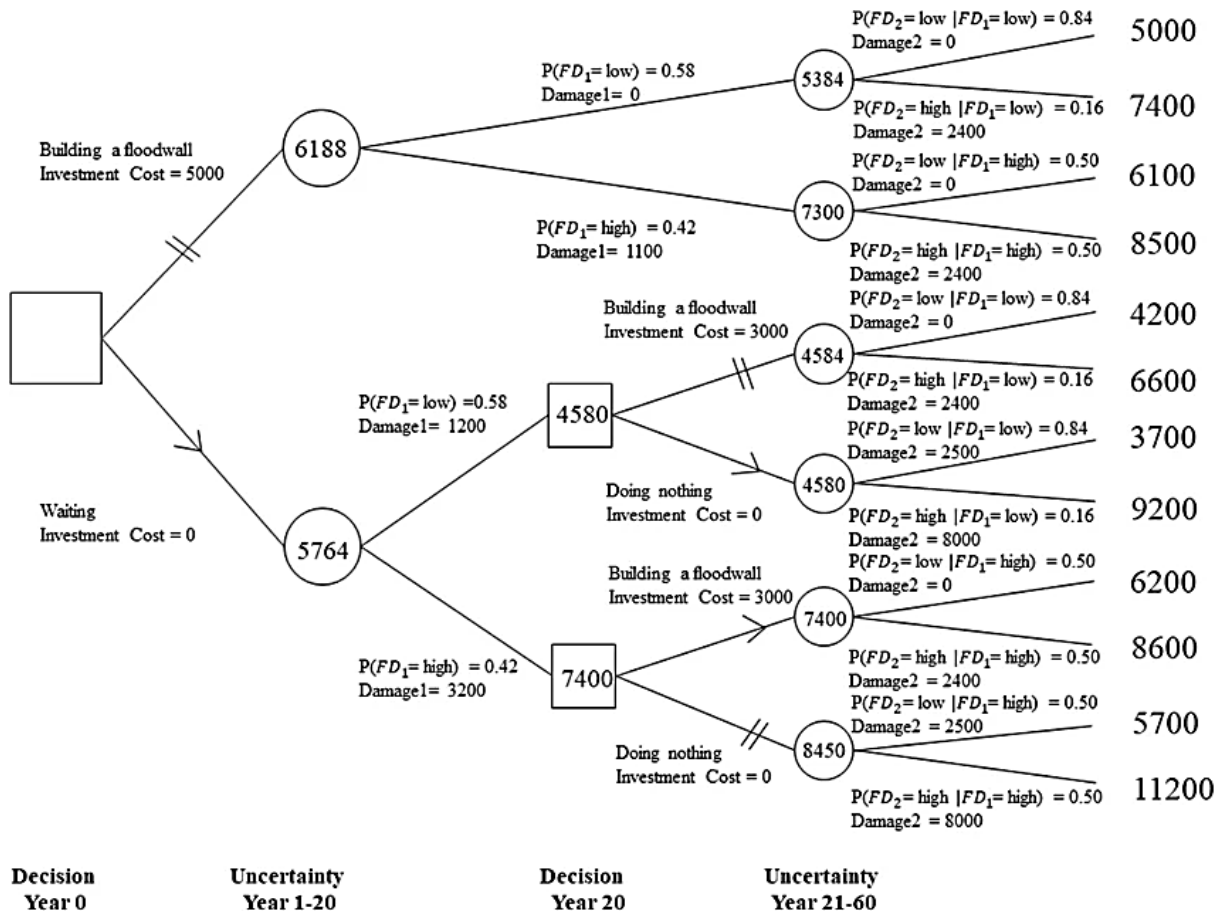


Рисунок 3.12 – Приклад сценаріїв досягнення сталого розвитку ЛСЕС

Базовий сценарій (рис. 3.13) відображає найбільш імовірну траєкторію розвитку системи за поточних умов і використовується як референтна точка для порівняння.

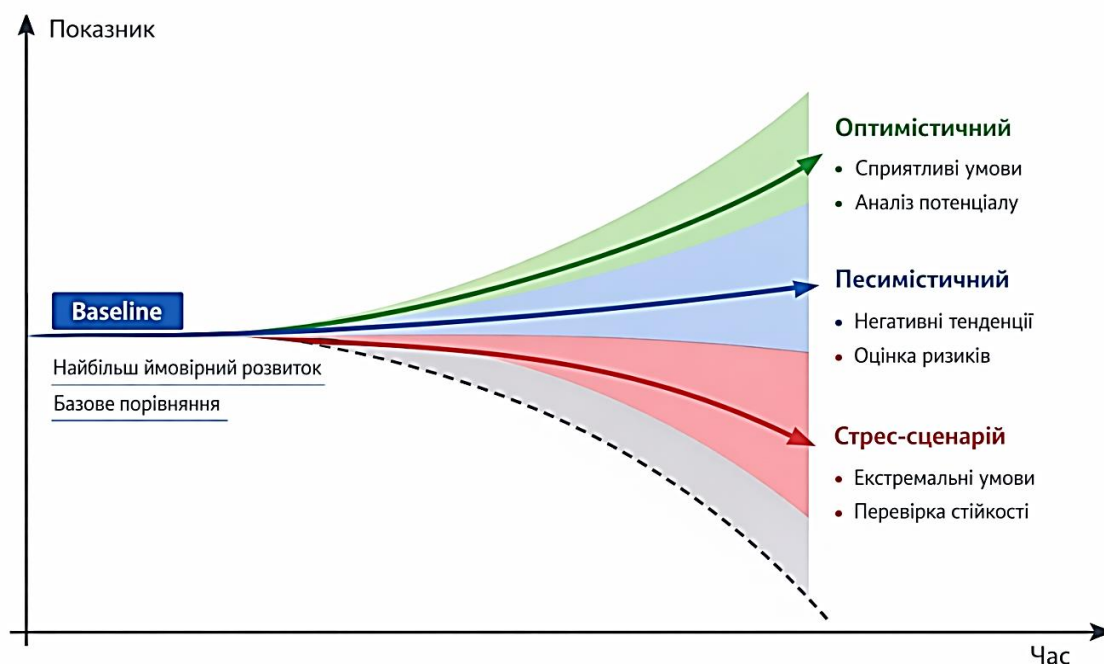


Рисунок 3.13 – Побудована множина сценаріїв розвитку ЛСЕС

Оптимістичний сценарій демонструє розвиток за сприятливих умов, що характеризуються позитивними економічними тенденціями та ефективними управлінськими рішеннями. Песимістичний сценарій відображає негативні тенденції розвитку системи та використовується для оцінювання потенційних ризиків. Стрес-сценарій моделює екстремальні умови функціонування системи, включаючи кризові явища та зовнішні шоки, і дозволяє оцінити її стійкість та адаптивність.

Представлена на рис. 3.13 множина сценаріїв ілюструє варіативність можливих траєкторій розвитку ЛСЕС та забезпечує основу для аналізу невизначеності, ризику й підтримки прийняття обґрунтованих управлінських рішень у СППР.

На рис. 3.14 представлено екранну форму розробленого додатку, який демонструє реалізацію підтримки прийняття рішень. Екранна форма інтегрує результати аналізу, моделювання та прогнозування.

У верхній частині відображено макроекономічні показники, зокрема ВВП (та його приріст), індекс сталого розвитку, витрати бюджету та рівень безробіття, крім того, можуть бути відображені й показники соціально-економічного розвитку громад, районів, ЛСЕС, тощо.

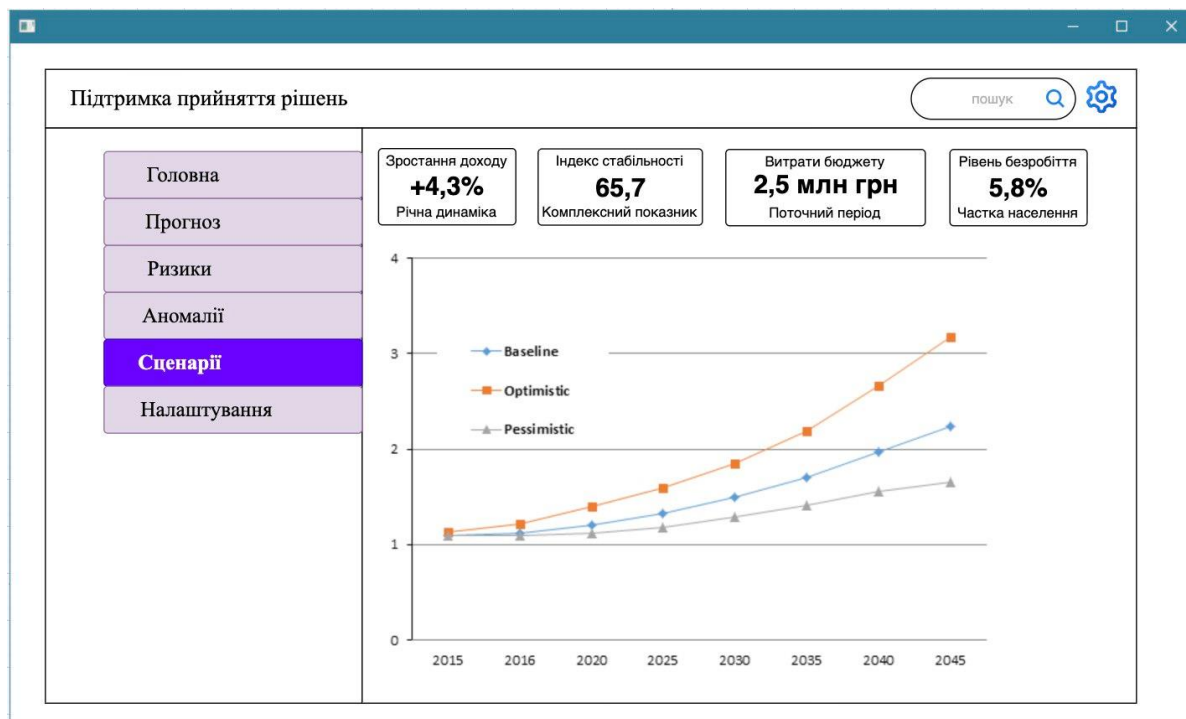


Рисунок 3.14 – Екранна форма прогнозування сталого розвитку ЛСЕС за різних сценаріїв

На формі представлений графік прогнозу показників сталого розвитку ЛСЕС, який демонструє динаміку процесу за різних сценаріїв. Це дозволяє користувачу порівняти, оцінити можливі траєкторії розвитку та розглянути альтернативні варіанти.

Таблиця 3.16 — Роль підсистеми у СППР

Компонент	Взаємодія	Результат
Моделювання	Отримання прогнозів	Базові сценарії
Аналіз сценаріїв	Генерація альтернатив	Множина траєкторій
Аналіз ризиків	Передача сценаріїв	Оцінка ризиків

Таблиця 3.17 — Методи, застосовувані у сценарному аналізі

Метод	Суть	Роль у СППР
Сценарний аналіз	Що-якщо- аналіз	Порівняння стратегій
Монте-Карло	Генерація розподілів	Оцінка невизначеності
Системної динаміки	Моделі зворотних зв'язків	Довгостроковий аналіз
Марківські моделі з перемиканням режимів	Режими системи	Виявлення фаз

Такий підхід дає змогу не лише оцінити очікувану динаміку показників, але й визначити рівень ризику, межі можливих відхилень та чутливість системи до змін вхідних параметрів. Це, у свою чергу, забезпечує прийняття більш обґрунтованих рішень, особливо в умовах високої невизначеності та нестабільності середовища.

Інформаційна технологія використовує комплекс підходів, що дозволяють працювати з невизначеністю. Аналіз невизначеності та стійкості є ключовим елементом, який може бути реалізований у відповідній СППР, оскільки дозволяє перейти від детермінованих оцінок до імовірнісного представлення результатів. На відміну від класичних підходів, де прогноз задається одним значенням, у роботі розглядається розподіл можливих результатів, що відображає варіативність розвитку системи та вплив різних факторів. Основні показники оцінювання невизначеності наведено в таблиці 3.18.

Таблиця 3.18 — Оцінювання невизначеності

Показник	Опис
Дисперсія	Варіативність результатів
Довірчі інтервали	Межі прогнозу
Ймовірність подій	Ризик негативних сценаріїв
Чутливість	Вплив факторів

Таким чином, реалізація прогнозування та сценарного аналізу забезпечує перехід від детермінованого прогнозування до комплексного аналізу

невизначеності. Використання сценарних, стохастичних та динамічних моделей дозволяє враховувати множинність можливих траєкторій розвитку ЛСЕС, оцінювати їх стійкість та формувати обґрунтовану основу для подальшого оцінювання ризиків і підтримки прийняття рішень.

### 3.5 Реалізація механізмів зменшення невизначеності й оцінювання ризиків у забезпеченні сталого розвитку ЛСЕС

Оцінювання ризиків є ключовим компонентом підтримки прийняття рішень щодо розвитку ЛСЕС та досягнення цілей сталого розвитку, який забезпечує трансформацію результатів прогнозування та сценарного аналізу у кількісні оцінки ризику, необхідні для прийняття обґрунтованих управлінських рішень. На відміну від традиційного підходу, де прогноз розглядається як кінцевий результат, у запропонованій інформаційній технології реалізується концепція: «виявлення аномалій-передбачення наслідків-сценарій-ризик»

Це означає, що ризик формується як інтегральна функція кількох складових (рис. 3.15):



Рисунок 3.15 – Оцінювання ризиків у розробленій інформаційній технології

Алгоритм оцінювання ризику при моделюванні сталого розвитку ЛСЕС.

КРОК 1. Збір даних.

КРОК 2. Перевірка якості даних.

КРОК 3. Нормалізація даних та приведення до аналітичного вигляду.

КРОК 4. Обчислення показників  $P, I, V, S$ .

КРОК 5. Функція агрегації ризику

$$R = f(P, I, V, S)$$

де  $R$  – ризик (risk);  $P$  – ймовірність події (probability);  $I$  – вплив (inference);  $V$  – вразливість системи (vulnerability);  $S$  – стійкість системи (resilience).

КРОК 6. Просторово-часовий аналіз.

КРОК 7. Сценарне моделювання.

КРОК 8. Візуалізація результатів.

В загальному вигляді алгоритм включає наступні етапи.

Етап 1. Збір даних та формування простору факторів ризику

Визначення множини факторів  $X$ :

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\} \quad (3.1)$$

Це можуть бути наступні групи факторів: економічні (доходи, безробіття), соціальні (демографія, доступність), екологічні (забруднення, ресурси), інфраструктурні (транспорт, доступність послуг).

Етап 2. Перевірка якості даних.

Краще всього збір та інтеграція даних робити з таких джерел: статистичні дані (Державна служба статистики України), геопросторові дані, логістичні дані, сенсорні / потокові дані.

Етап 3. Попередня обробка та нормалізація даних.

Наприклад, формула для нормалізації даних може мати наступний вигляд:

$$x_i^{norm} = \frac{x_i - \min(x_i)}{\max(x_i) - \min(x_i)} \quad (3.2)$$

Етап 4. Оцінювання компонент ризику, складається з чотирьох підетапів.

4.1 Ймовірність подій, із використанням статистичних методів та машинного навчання (регресія, класифікація, дерева рішень, байєсівський підхід).

$$P = \Pr(\text{Event}|X)$$

де,  $Pr$  – ймовірність відбуття події Event за умови наявності апріорних факторів  $X$ .

4.2 Вплив ( $I$  – impact) який здійснює подія.

$$I = \sum_i w_i \cdot impact_i$$

4.3 Вразливість ( $V$  – vulnerability) – це ступінь, до якого система може зазнати негативного впливу, обчислюється як:

$$V = f(exposure, sensitivity)$$

де,  $exposure$  – це ступінь контакту системи з потенційно небезпечними факторами;  $sensitivity$  – це ступінь, до якого система реагує на вплив.

4.4 Стійкість ( $S$ ) – це здатність системи протистояти впливам, адаптуватися до змін та відновлюватися після порушень, обчислюється як:

$$S = f(adaptivity, capacity)$$

де,  $adaptivity$  – здатність системи змінювати свою поведінку у відповідь на зовнішні впливи;  $capacity$  – наявні ресурси системи для протидії ризикам і відновлення.

5. Інтегральна функція ризику.

Пропонується наступна узагальнена модель:

$$R = \sum_{i=1}^n w_i \cdot P_i \cdot I_i \cdot \frac{V_i}{S_i} \quad (3.3)$$

де  $w_i$  – це ваги, які обчислюються із використанням методів експертного попарного порівняння або методами на основі обчислення ентропії.

6. Просторово-часовий аналіз ризику – це оцінка ризику для різних територій, який використовується для районів з високим транспортним навантаженням, зон з низькою доступністю послуг та території з високою щільністю населення, із використанням таких методів як – GIS-аналіз, теплові карти щільності ризику, методи кластеризації (k-середніх, DBSCAN) та просторові метрики.

7. Сценарне моделювання, в простому базовому вигляді призначене для формування оптимістичного, базового та кризового сценаріїв.

8. Візуалізація та інтерпретація результатів зазвичай включає побудову теплових карт ризику; 3D поверхень; карт доступності; кластеризацію територій.

Таким чином, ризик розглядається не як окремий показник, а як багатовимірна характеристика стану системи, що враховує як ймовірність, так і потенційний вплив подій. Для формалізації функціонального призначення системи оцінювання ризиків доцільно виокремити її основні функції, які охоплюють процес трансформації аналітичних результатів у кількісні показники ризику та їх подальшу інтерпретацію в контексті підтримки прийняття рішень. Кожна з функцій забезпечує окремий етап обробки невизначеності — від інтеграції даних до формування індикаторів і передачі результатів у систему підтримки прийняття рішень. Основні функції підсистеми наведено в табл. 3.19.

Таблиця 3.19 — Функції оцінювання ризиків

Функція	Опис	Роль у СППР
Інтеграція даних	Об'єднання прогнозів і сценаріїв	Формування бази ризику
Кількісна оцінка	Обчислення ризиків	Формалізація невизначеності
Агрегування	Об'єднання показників	Узагальнення ризику
Індикатори	Побудова метрик	Інтерпретація
Передача результатів	Інтеграція з СППР	Прийняття рішень

Особливістю розробленого додатку є наявність інформаційного блоку, який відображає етапи побудови прогнозів. У верхній частині екрану (рис. 3.16) розміщено елемент форми, який вмикає сигнал тривоги, який інформує користувача про можливі негативні тенденції, наприклад ризик дефіциту бюджету внаслідок змін бюджетних надходжень, тощо.

Ліва панель навігації забезпечує доступ до основних модулів системи, зокрема прогнозування, аналізу ризиків, виявлення аномалій та сценарного аналізу. Така структура інтерфейсу забезпечує зручність використання та підтримує процес прийняття управлінських рішень на основі комплексного аналізу даних.

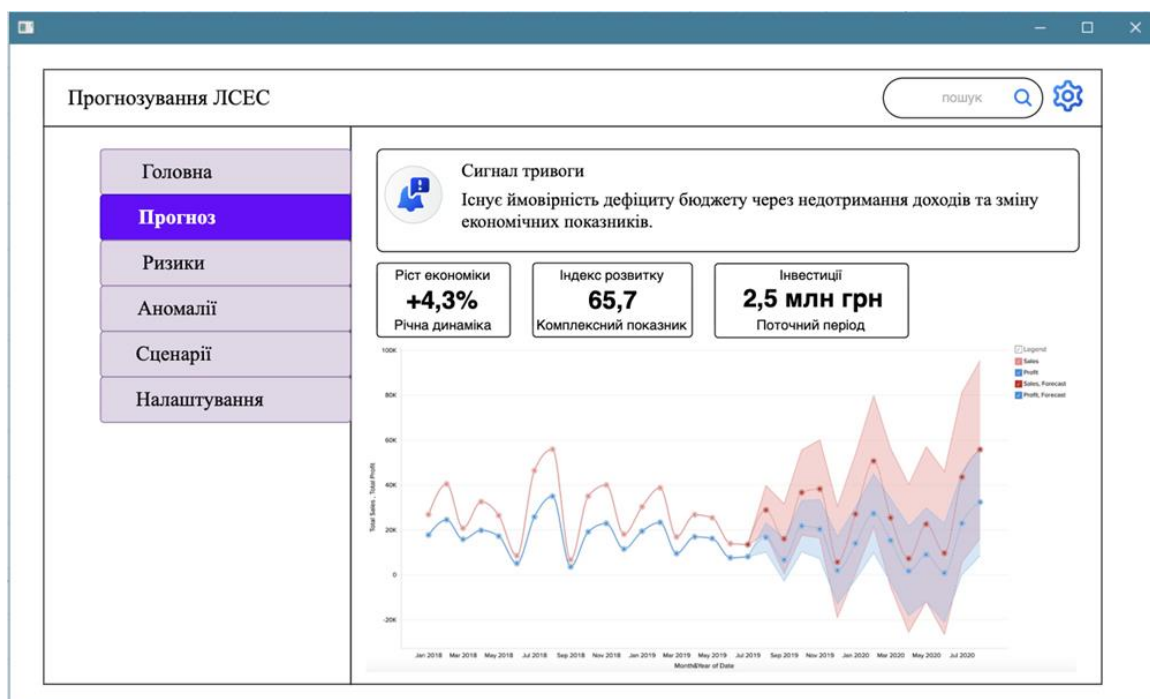


Рисунок 3.16 – Екранна форма побудови прогнозу із сповіщенням про виявлення негативних тенденцій розвитку ЛСЕС

На рис. 3.17 представлено інтерфейс підсистеми виявлення аномалій, яка забезпечує ідентифікацію відхилень у ключових показниках ЛСЕС.

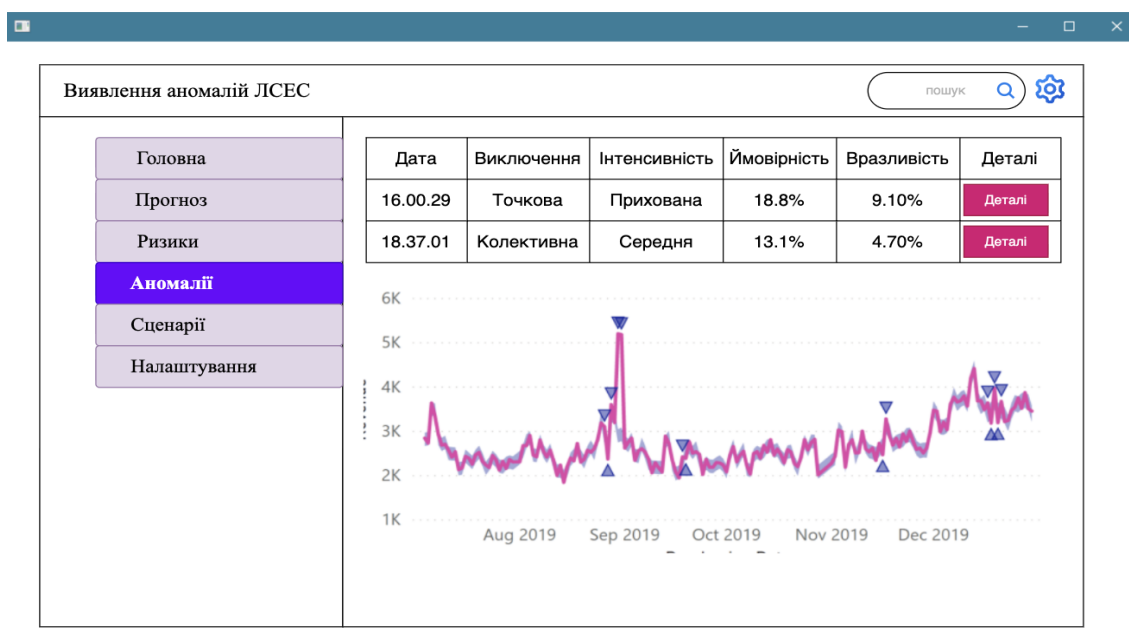


Рисунок 3.17 – Екранна форма виявлення аномалій

У верхній частині форми (рис. 3.17) відображено таблицю нещодавно виявлених аномалій із зазначенням дати, типу аномалії (точкова, контекстуальна, колективна), інтенсивності, ймовірності та рівня вразливості. Нижче представлено графічну візуалізацію динаміки показників із позначенням аномальних значень різних типів, що дозволяє аналізувати поведінку системи у часі. Кольорове маркування забезпечує швидку ідентифікацію характеру відхилень.

На рис. 3.18 представлено узагальнену схему процесу виявлення, класифікації та аналізу аномалій щодо розвитку ЛСЕС в контексті їх утворення на основі населених пунктів, громад, районів (можливо й областей).

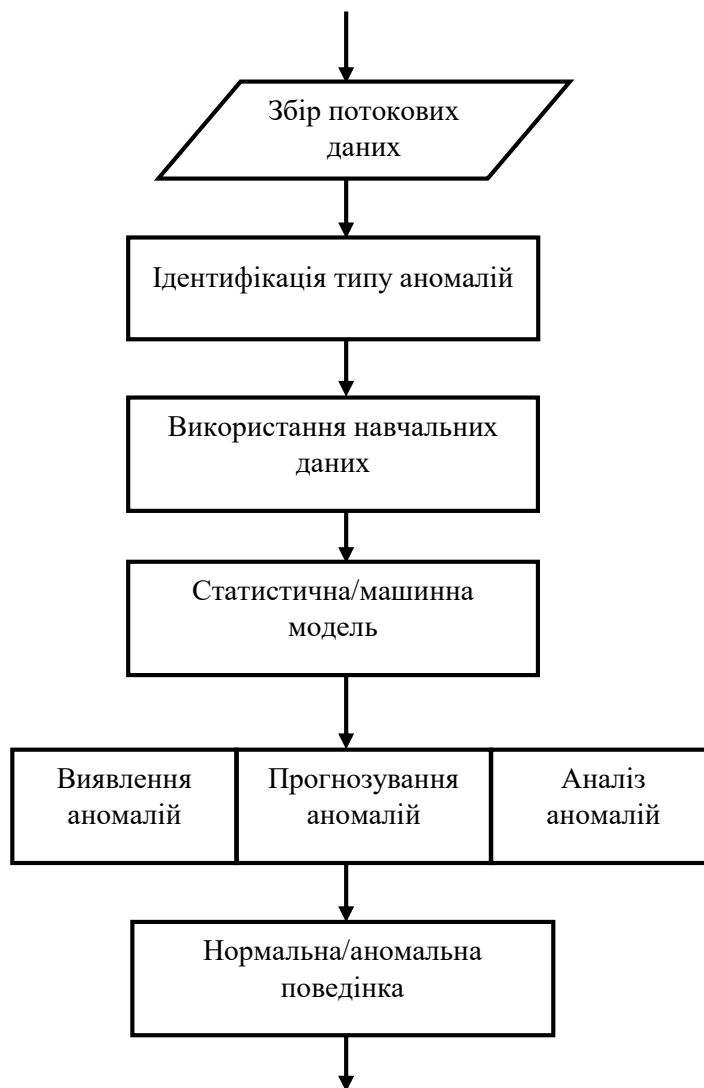


Рисунок 3.18 Методика реагування на аномалії розвитку ЛСЕС у розробленій інформаційній технології

Представлена схема демонструє інтегрований підхід до обробки аномалій, який поєднує класифікацію, моделювання та аналітику, забезпечуючи підвищення точності виявлення відхилень і своєчасну реакцію на потенційні ризики.

Процес починається зі збору потокових даних, після чого здійснюється ідентифікація типу аномалії. На цьому етапі визначається, чи належить відхилення до точкових, контекстуальних або масових аномалій, що дозволяє врахувати природу порушення.

Далі здійснюється перевірка наявності навчальних даних, що визначає можливість застосування відповідних статистичних або машинних моделей. На основі цього формується модель (Статистична/Машинне навчання), яка використовується для виконання трьох основних задач: виявлення аномалій, прогнозування аномалій та їх подальшого аналізу.

Результатом роботи системи є класифікація поведінки як нормальної або аномальної, що є основою для подальшого оцінювання ризиків та підтримки прийняття управлінських рішень у СППР.

Реалізація підсистеми пошуку аномалій відіграє важливу роль у процесі прийняття рішень, оскільки дозволяє своєчасно виявляти потенційні загрози, що можуть трансформуватися у ризики, та передавати відповідну інформацію до підсистеми оцінювання ризиків.

Дослідження аномалій розвитку ЛСЕС дозволяє вчасно переглянути рішення, що було прийнято виходячи з попередніх умов, виявити проблеми, не типові варіанти розвитку подій чи зміни значень індикаторів.

### **Висновки до розділу 3**

1. Запропоновано нові та удосконалено існуючі моделі та методи, що застосовуються для прогнозування розвитку соціально-економічних систем місцевого рівня.

2. На основі проведеного дослідження сформовано концептуальну схему інформаційної технології, яка відображає логіку трансформації даних у знання та рішення, а також розроблено багаторівневу архітектуру СППР

3. Визначено ключові функціональні підсистеми СППР, зокрема підсистему обробки даних, підсистему попередньої обробки, підсистему побудови математичних моделей, підсистему прогнозування та сценарного аналізу, а також підсистему оцінювання ризиків.

4. Розроблено інформаційну технологію моделювання сталого розвитку ЛСЕС, яка інтегрує сучасні підходи аналізу даних, машинного навчання та підтримки прийняття рішень у єдину узгоджену архітектуру.

5. Розроблена інформаційна технологія орієнтована на комплексну обробку даних, формування аналітичних моделей, оцінювання невизначеності та ризиків, а також генерацію варіантів управлінських рішень.

6. Розроблено методика оцінювання ризиків, характерних для ЛСЕС в умовах невизначеності, яка базується на інтеграції результатів прогнозування, сценарного аналізу та ймовірнісних характеристик системи

7. Для забезпечення зрозумілості аналітичного процесу та коректної інтерпретації результатів, запропоновано розмежування понять «аномалія», «прогноз», «сценарій» та «ризик».

8. У розробленій інформаційній технології інтегровано методи пояснюваного штучного інтелекту, що забезпечують інтерпретацію результатів моделювання, виявлення ключових факторів впливу та підвищення довіри до системи з боку користувачів.

9. Розроблена інформаційна технологія забезпечує підвищення точності прогнозування завдяки врахуванню складних нелінійних і стохастичних залежностей, а також створює основу для підтримки прийняття обґрунтованих управлінських рішень у задачах сталого розвитку ЛСЕС.

## РОЗДІЛ 4

### ОБЧИСЛЮВАЛЬНІ ЕКСПЕРИМЕНТИ З ВИКОРИСТАННЯМ РОЗРОБЛЕНОЇ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ

#### 4.1 Інформаційна технологія моделювання сталого розвитку ЛСЕС

Характерною особливістю задач дослідження процесів розвитку ЛСЕС є відсутність достатньо довгих часових рядів показників, що їх описують, а також їх нелінійний і нестационарний характер. Прикладом застосування розробленої інформаційної технології, є задача моделювання сталого розвитку ЛСЕС на прикладі територіальних громад, що розташовані таким чином, що межують між собою, використовують спільну транспортну та соціальну інфраструктуру, фактично утворюючи ЛСЕС.

У процесі моделювання дослідження використовувалися статистичні дані соціально-економічного розвитку, показники фінансової стійкості місцевих бюджетів, результати порівняльного аналізу ефективності бюджетних програм, а також розширений набір індикаторів, що застосовуються в бюджетному процесі та оцінювання соціально-економічного розвитку громад та регіонів. Дослідження охоплювало дані понад 30 громад. Набір даних сформовано на основі показників соціально-економічного розвитку громад, звітів про виконання місцевих бюджетів, даних відкритих API. У дослідженні використано дані, отримані з відкритих джерел. Зв'язки між показниками та приховані закономірності в даних виявлялися за допомогою методів інтелектуального аналізу даних.

Найбільші труднощі пов'язані з обробкою пропущених даних і подоланням проблеми «прокляття розмірності», оскільки часові ряди соціально-економічних показників часто містять значну кількість пропусків у відносно коротких вибірках великої кількості змінних, що описують систему. Дана ситуація виникла внаслідок як зміни складу громад та районів - змін на

місцевому та регіональному рівнях, що відбувались в ході реформи децентралізації, а також загальних макроекономічних тенденцій в країні.

Запропонована інформаційна технологія передбачає її використання в різних інтелектуальних системах підтримки прийняття рішень, завдяки чому є достатньо гнучкою та може адаптуватися до конкретних аналітичних завдань. Її загальна схема наведена на рис. 4.1.



Рисунок 4.1 – Схема застосування розробленої інформаційної технології для моделювання сталого розвитку ЛСЕС

Перед побудовою моделей дані було попередньо підготовлено із застосуванням процедур ETL. Зокрема, усунуто пропуски, інтервальні змінні перетворено на категоріальні, а аномальні значення виключено з аналізу. Для

зменшення мультиколінеарності використано метод головних компонентів. Заповнення пропущених значень здійснювалося за допомогою обчислення середнього між сусідніми значеннями ряду, а також із застосуванням регресійних моделей — як при незначній (до 5%), так і при більшій (близько 20%) частці пропусків. Якість регресійних моделей оцінювалася за показником MAPE.

Крім того, на етапі збору та попередньої обробки даних, з метою кращого розуміння предметної області та виокремлення ключових факторів, було сформовано SWOT-таблицю.

Програмна реалізація даної інформаційної технології виконана в середовищі SAS Enterprise Guide мовою SAS Base, однак, спрощений варіант, реалізований мовою Python [3]. Додаток є гнучким та таким, що легко перебудовується під потреби задачі в цілому або для реалізації окремих етапів аналітичного процесу. Структура додатку представлена на рис. 4.2.

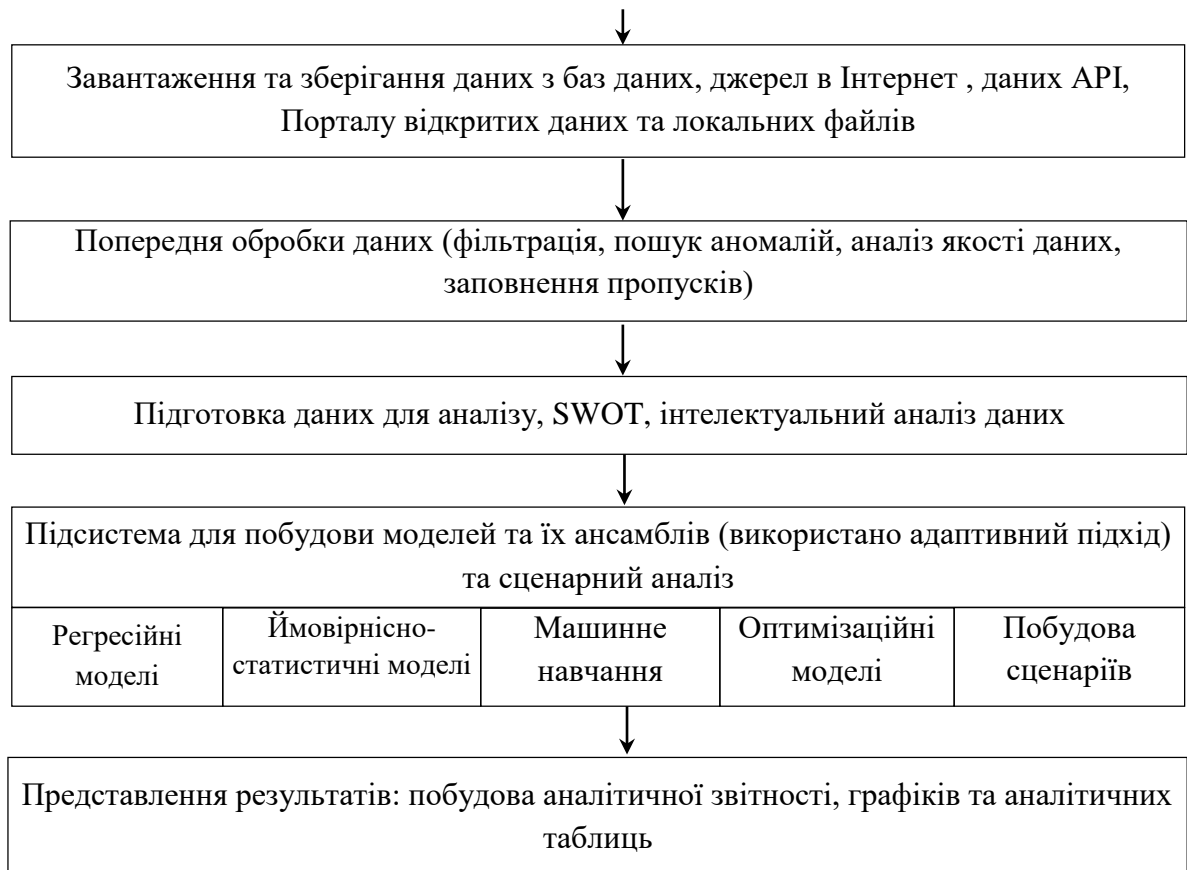


Рисунок 4.2 – Структура додатку, розробленого на базі запропонованої інформаційної технології

Як показано на рис. 4.2, програмне забезпечення складається з кількох взаємопов'язаних модулів, які формують основу інформаційного забезпечення аналітичного процесу. Така структура дає змогу враховувати особливості предметної області.

Розроблена інформаційна технологія також застосовувалася для прогнозування дохідної та видаткової частин місцевих бюджетів різних територіальних громад. Для моделювання показника «виконання бюджету за видатками» було використано лінійну регресію з автоматичним відбором регресорів за методом Stepwise. Для побудови математичної моделі прогнозування показника «виконання бюджету за видатками» було використано модель лінійної регресії із вибором регресорів в автоматичному режимі за методом Stepwise (рис. 4.3).

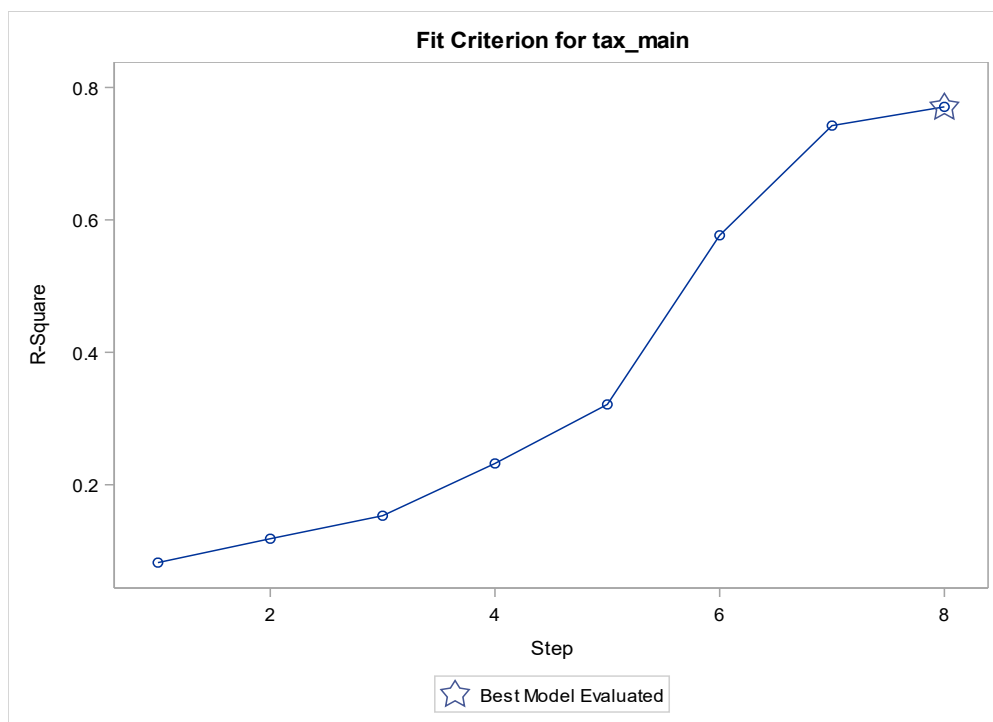


Рисунок 4.3 – Зміна статистики  $R^2$  моделі в залежності від вибору та підмішування до моделі, для прогнозування показника «виконання бюджету за видатками», регресорів в автоматичному режимі Stepwise.

Оцінка коефіцієнтів моделі для прогнозування показника «виконання бюджету за видатками» представлена в таблиці 4.1

Таблиця 4.1 – Оцінка коефіцієнтів моделі для прогнозування показника “виконання бюджету за видатками”.

Variable	Parameter Estimate	Standard Error	Type II SS	F Value	Pr > F
Intercept	4931,382	1937,419	35011483	6,48	0,0272
tax_02	-0,00102	0,000227	1,08E+08	19,95	0,001
tax_03	-0,00028	5,37E-05	1,43E+08	26,39	0,0003
tax_04	0,000728	0,000166	1,04E+08	19,18	0,0011
tax_06	-0,00027	0,000232	7348032	1,36	0,2682
tax_13	-0,0015	0,00036	94268356	17,44	0,0015
tax_16	0,000252	0,000195	9028945	1,67	0,2226
tax_17	-0,0007	0,00114	2069216	0,38	0,5487
tax_18	0,000471	0,000155	50248489	9,3	0,0111
Intercept	4931,382	1937,419	35011483	6,48	0,0272
tax_02	-0,00102	0,000227	1,08E+08	19,95	0,001
tax_03	-0,00028	5,37E-05	1,43E+08	26,39	0,0003

Проаналізувати якість отриманого прогнозу можна за даними рис. 4.4

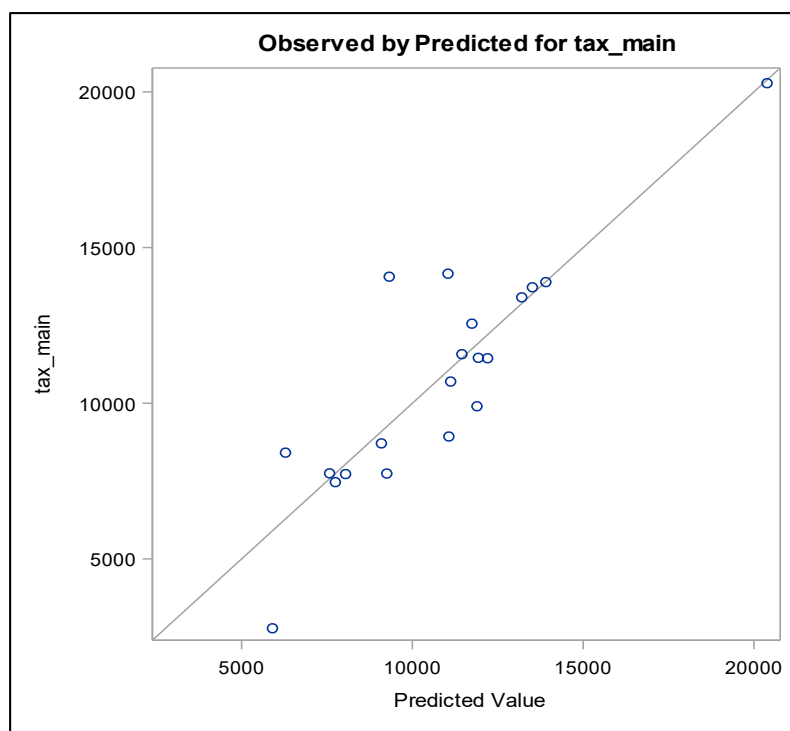


Рисунок 4.4 – Розподіл реальних та прогнозованих значень показника “виконання бюджету за видатками”

Отримана математична модель має наступні прогнозуючі характеристики:  
 $RMSE = 172$ .  $MAPE = 14,8\%$   $R^2 = 0,75$ .

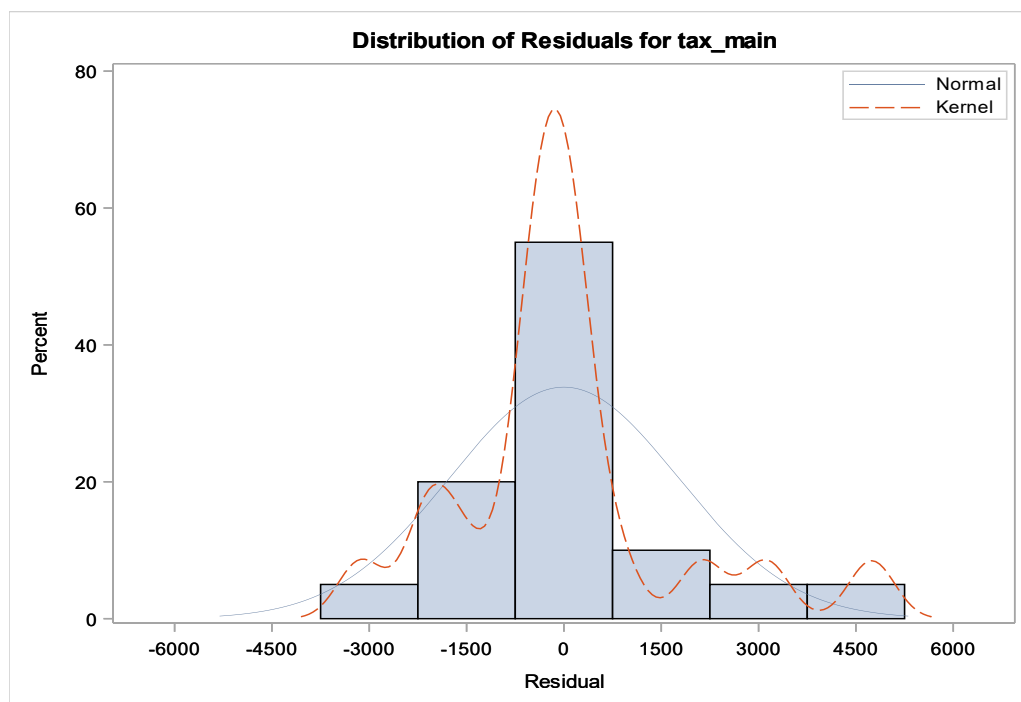


Рисунок 4.5 - Гістограма розподілу залишків моделі для прогнозування показника “виконання бюджету за видатками”

Для прогнозування показника «виконання бюджету за доходами» було побудовано модель лінійної регресії із вибором регресорів в автоматичному режимі за методом Stepwise (табл. 4.2)

Таблиця 4.2 – Оцінка коефіцієнтів моделі для прогнозування показника “виконання бюджету за доходами”

Variable	Parameter Estimate	Standard Error	Type II SS	F Value	Pr > F
Intercept	5860,72	1861,797	80858385	9,91	0,0104
profit_01	-2,1E-05	1,81E-05	11334648	1,39	0,2658
profit_02	0,000255	0,000109	44432025	5,45	0,0418
profit_03	0,000163	7,62E-05	37158922	4,55	0,0586
profit_04	0,00204	0,00123	22360301	2,74	0,1288
profit_05	-0,0003	0,0001	72025718	8,83	0,014
profit_07	-6,9E-05	0,000154	1636555	0,2	0,6638
profit_08	0,000557	0,000175	82805684	10,15	0,0097
profit_09	-0,00018	0,000209	5761351	0,71	0,4204
profit_10	-0,00029	0,000443	3446947	0,42	0,5304

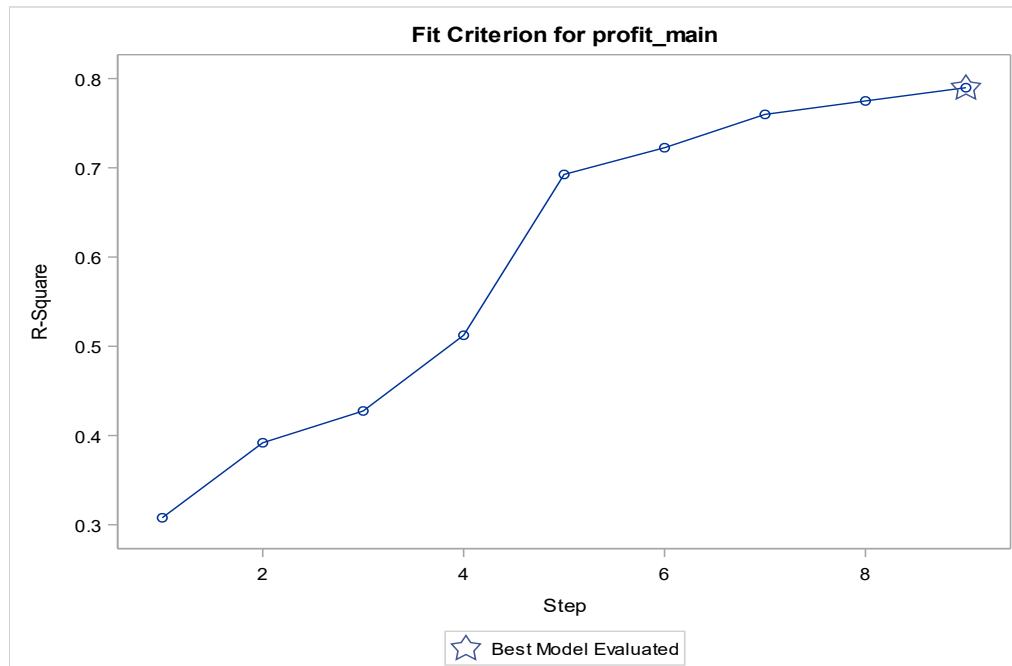


Рисунок 4.6 – Зміна статистики  $R^2$  моделі в залежності від вибору та підмішування до моделі, для прогнозування показника “виконання бюджету за доходами”, регресорів в автоматичному режимі Stepwise

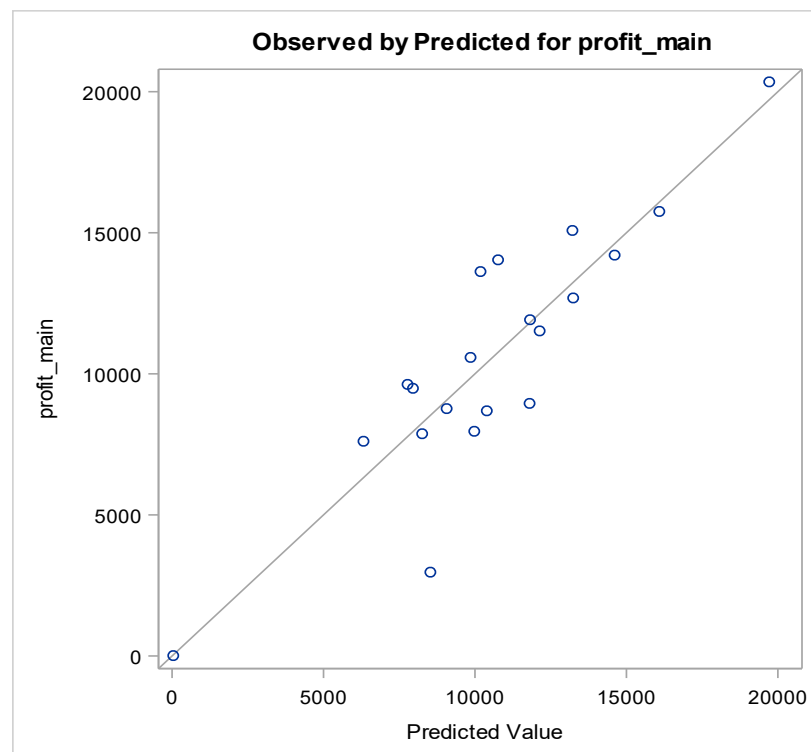


Рисунок 4.7 – Розподіл реальних та прогнозованих значень показника “виконання бюджету за видатками”

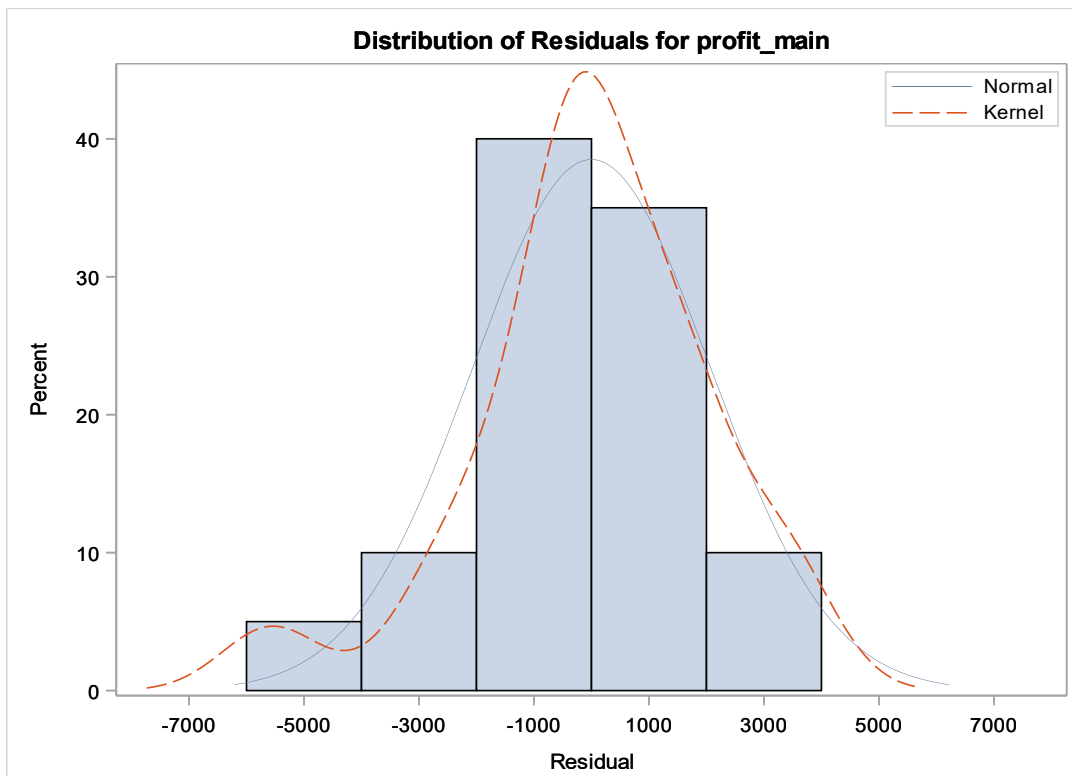


Рисунок 4.8 – Гістограма розподілу залишків моделі для прогнозування показника “виконання бюджету за доходами”

Отримана математична модель має наступні прогнозуючі характеристики:  $RMSE = 2019$ ,  $MAPE = 24,9 \%$ ,  $R^2 = 0,7898$ .

Запропонована інформаційна технологія являє собою комплекс засобів, орієнтованих на інтелектуальний аналіз даних, зокрема дослідження причинно-наслідкових зв'язків, класифікацію, кластеризацію, прогнозування та візуалізацію результатів. У розробленому застосунку ключова увага зосереджена саме на роботі з даними. Отримані результати дають можливість «спроєктувати» оптимальну структуру місцевого бюджету, орієнтованого на вирішення задач сталого розвитку ЛСЕС та окремих громад у її складі, обрати кращий варіант для об'єднання чи спільного використання ресурсів.

Модуль збору та підготовки даних до аналізу, а також їх використання під час побудови моделей, передбачає застосування API-інтерфейсу. Це зумовлено тим, що в межах предметної області користувачам необхідно обробляти значні обсяги інформації, отриманої як із внутрішніх аналітичних звітів і статистичних джерел, так і з мережі Інтернет.

Окрім цього, у процесі накопичення даних виникає потреба в заповненні пропусків і перевірці якості наборів даних, зокрема їхньої цілісності та достовірності. Для цього передбачено модуль попередньої обробки, який може використовувати інструменти інтелектуального аналізу даних.

У блоці обробки даних можуть застосовуватися різні системи управління базами даних, зокрема MySQL, PostgreSQL тощо. Для побудови математичних моделей можуть використовуватися різноманітні аналітичні платформи та засоби розробки, такі як R, Python та інші.

Також передбачена можливість підключення до серверів SAS Foundation і Metadata Server для забезпечення надійного зберігання та швидкого оброблення значних обсягів даних. Процес вибору джерела даних є досить простим: необхідно обрати SAS-таблицю для аналізу та задати відповідні метадані згідно з цілями дослідження, переміщуючись ієрархією папок проекту.

## **4.2 Застосування ланцюгів Маркова для розроблення сценаріїв формування ЛСЕС**

Особливе місце серед аналітичних інструментів займають математичні моделі. Вони широко застосовуються для дослідження та прогнозування розвитку соціально-економічних систем і характеризуються різноманітністю моделей та можливістю їхніх композицій. У ситуаціях невизначеності, коли необхідно передбачити майбутній стан не лише на основі історичних даних, а й з урахуванням очікуваних змін, наприклад у галузевій структурі або складі територіальної громади, особливо корисними стають ймовірно-статистичні моделі.

Розроблювана методика передбачає застосування математичних моделей — ланцюгів Маркова — у процесі побудови сценаріїв розвитку соціально-економічних систем, як для окремих, так і для об'єднаних громад. Перевагою такого підходу є те, що за відсутності повної інформації про стан і динаміку системи його використання дозволяє визначити перспективну галузеву

структуру економіки, врахувати вигоди від кооперації та спеціалізації виробництва у громадах та районах. Це створює основу для розробки стратегій і планів розвитку локальних соціально-економічних систем із забезпеченням узгодження цілей та виробничої структури в контексті стратегії сталого розвитку.

Системний аналіз складних соціально-економічних систем передбачає цілісне вивчення взаємодії елементів і підсистем із урахуванням динаміки зовнішнього середовища та внутрішніх зв'язків. У контексті локальних соціально-економічних систем основними об'єктами дослідження є: галузева структура економіки та її динаміка, соціальна інфраструктура, фінансовий ринок, ринок праці, зовнішньоекономічні зв'язки та інституційне середовище.

Зміни між станами системи описуються ймовірностями переходів — тобто, ймовірністю того, що система перейде з одного рівня розвитку в інший. Модель базується на ланцюгах Маркова першого порядку, де:

- майбутній стан залежить тільки від поточного;
- усі ймовірності переходів фіксовані у матриці переходів.

Позначимо, що  $S$  - множина можливих станів системи:

$$[S = \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\}]$$

Можливі стани системи представлені в табл. 4.3.

Кожний елемент матриці ( $P_{ij}$ ) означає ймовірність того, що система перейде зі стану  $S_i$  у стан  $S_j$  за один часовий крок.

Еволюцію системи у часі описує вектор стану  $x_t = [p_1, p_2, p_3, p_4, p_5]$ , який описує ймовірності перебування системи в кожному стані у момент часу  $t$ . Тоді:

$$x_{t+1} = x_t P$$

Повторюючи цей процес, отримуємо зміну стану у часі:

$$x_{t+1} = x_0 P^t$$

Якщо процес триває довго, система прагне до стаціонарного стану — розподілу ймовірностей, який більше не змінюється:

$$\pi = \pi P$$

де  $\pi$  — це власний вектор матриці ( $P^T$ ), що відповідає власному значенню 1.

Таблиця 4.3 - Опис станів системи, визначених для цілей дослідження

Позначення	Назва	Опис
$S_1$	сталого розвитку	система функціонує стабільно, має високий рівень сталості, збалансованість економічних, соціальних і екологічних компонентів
$S_2$	стабільний	система відносно стабільна, але без активного розвитку; потенційна вразливість до зовнішніх шоків
$S_3$	ризик (під загрозою)	система перебуває у стані ризику (економічна стагнація, соціальна напруга, екологічні проблеми)
$S_4$	спад	погіршення показників, деградація інфраструктури, зниження соціальної якості життя
$S_5$	відновлення	система відновлюється після кризового стану завдяки політичним, економічним або соціальним заходам

Тобто, у довгостроковій перспективі система приблизно 31% часу система перебуватиме у сталому стані, 27% — стабільна, а майже 17% — під ризиком.

Це свідчить про помірну, але несталу рівновагу, яка залежить від політики та зовнішніх факторів. Щоб дослідити динаміку соціально-економічної системи, модель виконує багаторазові випадкові симуляції (тисячі траєкторій), де кожна траєкторія відображає можливий сценарій її розвитку.

Еволюція станів демонструє, як у часі змінюється частина системи, що перебуває у кожному конкретному стані.

Запропонований підхід застосовується для побудови сценаріїв розвитку регіонів, окремих громад та їх об'єднань, аналізу ефективності державної регіональної політики, а також для дослідження ризиків дестабілізації соціально-економічних систем.

При формуванні сценаріїв розвитку локальних соціально-економічних систем рекомендується використовувати не лише традиційні сценарії (реалістичний, оптимістичний та песимістичний), а й варіанти, які точніше відображають перспективний розвиток системи, спираючись на чіткі припущення щодо зовнішнього середовища, внутрішньої структури та темпів розвитку. Для кожного сценарію попередньо досліджуються умови функціонування системи, а за допомогою SWOT та PEST-аналізів визначаються детальні характеристики сценаріїв, їхні ключові допущення, потенційні (бажані) траєкторії та секторальні ефекти.

Наприклад, для громад із переважною сільськогосподарською галуззю ключовими індикаторами є показники ефективності агровиробництва. Для таких громад аграрний бізнес формує основу економіки та соціального забезпечення, а також є важливим екологічним чинником. Основними факторами розвитку громади, включно з наповненням місцевого бюджету, будуть прибуток від агробізнесу, спеціалізація виробництва та екологічне навантаження. У межах даного дослідження «спеціалізація» розглядається як розподіл ресурсів за видами активів, ринками, продуктами та послугами.

Для обчислення індикаторів розвитку аграрного сектору пропонується наступний підхід.

$$P_{ro} = \sum_{i=1}^n (A_i \cdot Y_i \cdot P_i - A_i \cdot C_i)$$

де  $A_i$ — зібрана площа  $i$ , га,  $Y_i$ — урожайність культури  $i$ , т/га,  $P_i$ — ціна  $i$ , грн/т,  $C_i$ — виробничі витрати на гектар вирощуваної культури  $i$ , грн/га,  $n$  -

кількість культур.

Диверсифікація виробництва – в даному дослідженні увагу зосереджено на розподілі ресурсів між активами, ринками, продуктами чи послугами.

$$Dv = 1 - \sum_{i=1}^n \left( \frac{A_i}{\sum_{j=1}^n A_j} \right)^2.$$

Чим вища диверсифікація (близько 1), тим більша стійкість системи, а низька диверсифікація (близько 0), означає, що виробництво має більш високий ризик збитковості.

Екологічне навантаження в даному дослідженні розглядається як сукупний вплив на екосистеми від вирощування різних сільськогосподарських культур:

$$EL = \sum_{i=1}^n A_i \cdot im_i,$$

де  $im_i$ — коефіцієнт впливу культури на ґрунт та екологію.

Алгоритм формування елемента матриці переходів реалізований за наступні кроки.

Спочатку, формується матриця переходів. Нехай, поточний стан системи  $S_t = s$ , наступний стан  $S_{t+1} = s'$ . Тоді елемент матриці переходів  $P[s, s']$  можна записати як функцію індикаторів:

$$P[s, s'] = \frac{f_{s \rightarrow s'}(\text{Pro}, Dv, EL)}{\sum_k f_{s \rightarrow k}(\text{Pro}, Dv, EL)}.$$

Тобто, спочатку обчислюємо оцінки ймовірності  $f_{s \rightarrow s'}$ , а потім нормалізуємо їх, щоб сума у рядку матриці переходів дорівнювала 1.

Використовуючи статистичні дані сільськогосподарських підприємств [145], можна розрахувати елементи матриці переходів

Таблиця 4.4 - Середні значення показників, що характеризують сільськогосподарське виробництво громад району

Культура	Площа, га	Урожайність, т/га	Ціна, тис.грн/т
Пшениця озима	658,1	4,83	5,06
Соняшник	18,7	2,53	13,89
Овочі	47	19,4	24,17

Розглянемо раціональний сценарій розвитку та розрахуємо елементи матриці переходів з використанням даних, наведених в табл. 4.4.

Розрахунок функцій  $f_{S \rightarrow S'}$  для кожного стану системи відбувається наступним чином.

Перехід між станами  $S_1 \rightarrow \{S_1, S_2\}$ :

$$f_{S_1 \rightarrow S_1} = b_1 + b_2 \cdot \mathbf{1}_{\{Pro > P_{th}\}} + b_3 \cdot \mathbf{1}_{\{Dv > D_{th}\}} - b_4 \cdot \mathbf{1}_{\{EL > E_{th}\}},$$

$$f_{S_1 \rightarrow S_2} = 1 - f_{S_1 \rightarrow S_1},$$

де  $P_{th}, D_{th}, E_{th}$  — порогові значення прибутку, спеціалізації та екологічного навантаження,  $\mathbf{1}_{\{\cdot\}}$  — індикаторна функція, яка дорівнює 1, якщо умова виконується, і 0 — якщо ні.

Коефіцієнти  $b_1, b_2, b_3, b_4$  оцінюються експертним шляхом – в даному випадку фахівцями-аграріями.

Перехід між станами  $S_2 \rightarrow \{S_1, S_2, S_3\}$

$$f_{S_2 \rightarrow S_1} = d_1 \cdot \mathbf{1}_{\{Pro > P_{th}\}},$$

$$f_{S_2 \rightarrow S_2} = d_2,$$

$$f_{S_2 \rightarrow S_3} = d_3 \cdot \mathbf{1}_{\{Pro < P_{th} \text{ or } EL > E_{th}\}}.$$

Коефіцієнти  $d_1, d_2, d_3$  оцінюються експертним шляхом.

Перехід між станами  $S_3 \rightarrow \{S_2, S_3, S_4, S_5\}$

$$f_{S_3 \rightarrow S_2} = e_1 \cdot \mathbf{1}_{\{Pro > P_{th}\}},$$

$$f_{S_3 \rightarrow S_3} = e_2,$$

$$f_{S_3 \rightarrow S_4} = e_3 \cdot \mathbf{1}_{\{\text{Pro} < P_{th}\}},$$

$$f_{S_2 \rightarrow S_5} = e_4 \cdot \mathbf{1}_{\{\text{Pro} > P_{th} \text{ and } Dv > D_{th}\}}.$$

Коефіцієнти  $e_1, e_2, e_3, e_4$  оцінюються експертним шляхом.

Перехід між станами  $S_4 \rightarrow \{S_3, S_4, S_5\}$

$$f_{S_4 \rightarrow S_3} = h_1 \cdot \mathbf{1}_{\{\text{Pro} > P_{th}\}},$$

$$f_{S_4 \rightarrow S_4} = h_2,$$

$$f_{S_4 \rightarrow S_5} = h_3 \cdot \mathbf{1}_{\{\text{Pro} > P_{th} \text{ and } Dv > D_{th}\}}.$$

Коефіцієнти  $h_1, h_2, h_3$  оцінюються експертним шляхом.

Перехід між станами  $S_5 \rightarrow \{S_1, S_2, S_5\}$

$$f_{S_5 \rightarrow S_1} = g_1 \cdot \mathbf{1}_{\{\text{Pro} > P_{th} \text{ and } EL < E_{th}\}},$$

$$f_{S_5 \rightarrow S_2} = g_2 \cdot \mathbf{1}_{\{\text{Pro} > P_{th}\}},$$

$$f_{S_5 \rightarrow S_5} = g_3.$$

Коефіцієнти  $g_1, g_2, g_3$  оцінюються експертним шляхом.

Для ранжування та визначення вагових коефіцієнтів використовуються методи аналізу ієрархій та зваженого балового оцінювання. За допомогою методу аналізу ієрархій експерти проводять парні порівняння кожного з факторів, отримуючи матрицю порівнянь, яка дозволяє обчислити відносні ваги -  $w_i$ . Формально ефективність прийняття рішень може бути оцінена за формулою:

$$E = \sum_{i=1}^n w_i f_i(X_i)$$

де  $f_i(X_i)$  – функція впливу  $i$ -го фактору, яка може бути як лінійною, так і нелінійною, залежно від природи зв'язку.

Після обчислення  $f_{s \rightarrow s'}$  для всіх можливих  $s'$  виконується нормалізація рядків.

$$P[s, s'] = \frac{f_{s \rightarrow s'}}{\sum_k f_{s \rightarrow k}}.$$

Таким чином, забезпечено правильну ймовірнісну інтерпретацію ситуації.

Як показали розрахунки, змінюючи дані про структуру та обсяги сільськогосподарського виробництва, можна визначити безпосередній вплив спеціалізації сільського господарства громади (району) на ймовірності переходів через індикатори, а матриця переходів автоматично змінюється, якщо змінюються площі, урожайність або інші показники.

В результаті, отримано матрицю переходів (фінальний етап):

$$\begin{bmatrix} 0,872 & 0,128 & 0 & 0 & 0 \\ 0,108 & 0,659 & 0,233 & 0 & 0 \\ 0 & 0,259 & 0,671 & 0,005 & 0,059 \\ 0 & 0 & 0,315 & 0,638 & 0,047 \\ 0,115 & 0,503 & 0 & 0 & 0,382 \end{bmatrix}$$

Результати розрахунку показників ймовірності розвитку станів, таких як розвитку, сталого функціонування, ризику, спаду та відновлення.

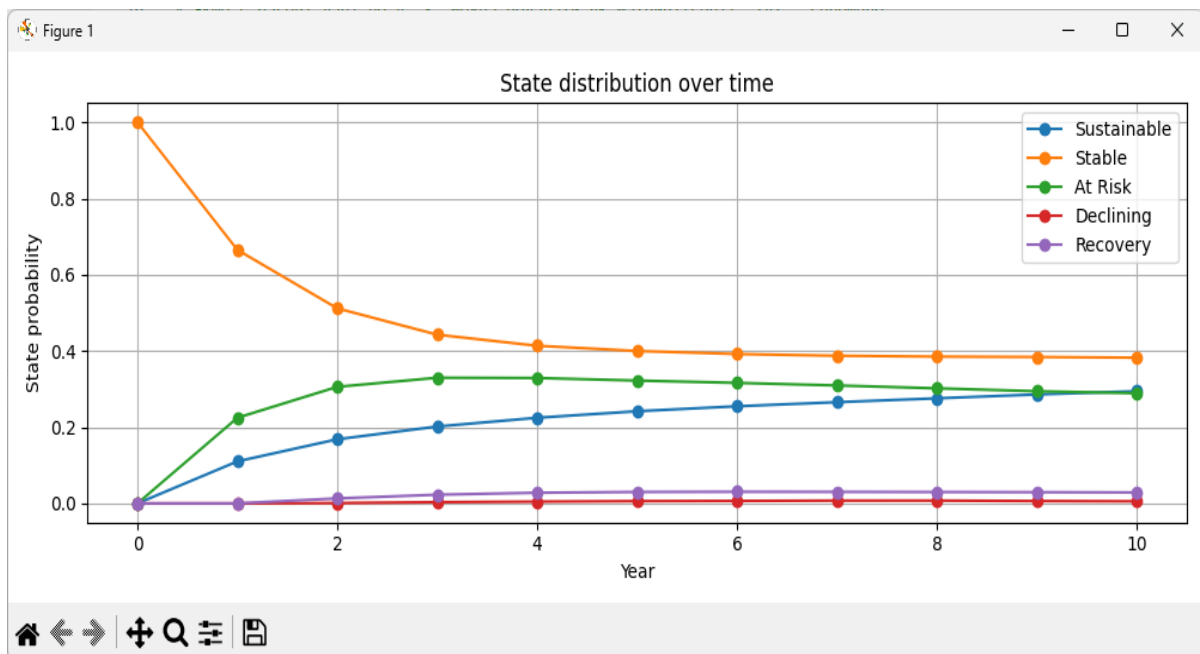


Рисунок 4.9 - Ймовірності переходів за 10 кроків за обраним сценарієм

Аналіз свідчить, що починаючи з четвертого кроку передбачається стабільний розвиток системи (рис. 4.9), тоді як досягнення найвищого рівня диверсифікації

виробництва та зростання прибутковості агробізнесу очікується з сьомого кроку (рис. 4.10).

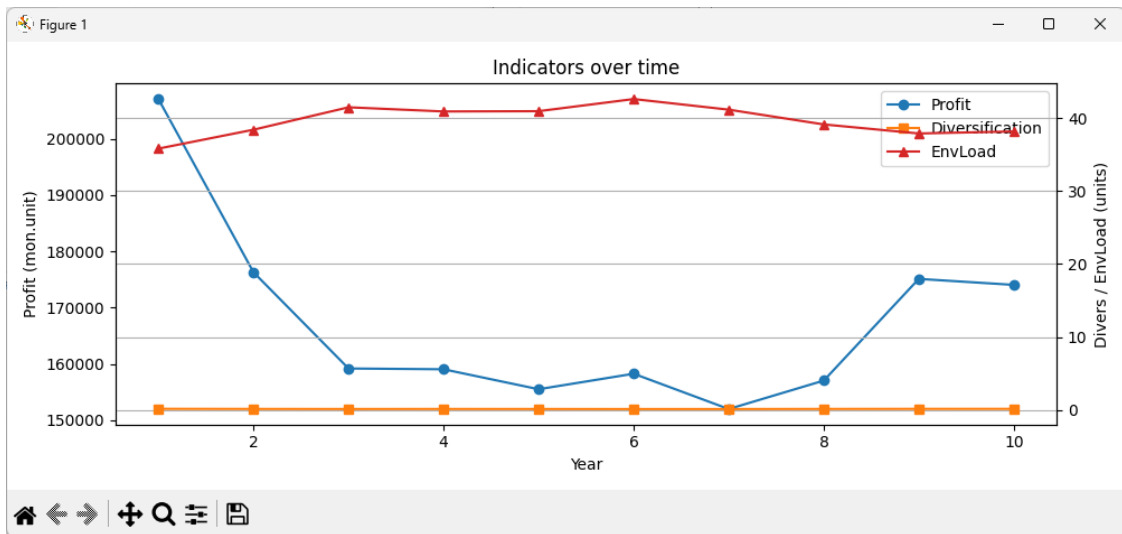


Рисунок 4.10 - Графік зміни основних індикаторів

Для інших варіантів розвитку системи — оптимістичного, песимістичного або будь-якого іншого сценарію — формули для розрахунку елементів матриці слід адаптувати відповідно до обраного сценарію. Це передбачає використання інших порогових значень індикаторів, які відповідають конкретному сценарію. Ймовірності переходів визначаються за допомогою експертних оцінок або шляхом регресійного аналізу для знаходження відповідних функцій.

### 4.3 Моделювання зв'язків між підсистемами ЛСЕС для формування галузевої та територіальної структури ЛСЕС

Задачі формування галузевої та територіальної структури ЛСЕС, узгодження обміну ресурсами, використання інфраструктури, тощо, можна представити у вигляді марківських моделей систем масового обслуговування (СМО) (марківського процесу) з дискретним часом:  $n = 0, 1, \dots$  [134].

Зауважимо, що для оптимізації процесу обслуговування така СМО має бути керованою. А саме, СМО, як об'єкт дослідження в цілому і окремих її

частин, що визначають певний марковський процес, містить наступні складові: вхідний потік вимог; власне структуру СМО; алгоритм обслуговування вимог з певними витратами часу на обслуговування включно з часом перебування вимоги у системі; дисципліною обслуговування. Кожна складова залежить від одного або більше параметрів. Якщо хоча б один параметр навіть однієї складової піддається бажаній зміні, таку систему і будемо надалі звати керованою [135]. Критеріїв якості керування може бути багато, але ж не всі з них розв'язувані навіть чисельно. Також треба з'ясувати, чи доступні для управління певні впливи, а потім формулювати критерій. Слід відмітити, що задачі керування та синтезу СМО різні, і з огляду на те, що більшість фізичних об'єктів перебудовувати вкрай небажано, то актуальною є задача власне оптимального керування наявною СМО, що відбиває певний фізичний об'єкт. Тому, саме такий підхід було реалізовано у розроблюваній інформаційній технології.

Локальну соціально-економічну систему розглядатимемо з точки зору системи масового обслуговування, коли між елементами системи здійснюється обмін ресурсами: виробничими, трудовими, інвестиційними, спільно використовується соціальна та транспортна інфраструктури

Розглянемо керовану одноканальну СМО з пуассоновим вхідним потоком з  $\lambda > 0$  і сталим часом обслуговування  $c > 0$ . Довжина черги  $k$  обмежена  $K > 0$ . Керуванням вважається прийняття-неприйняття на обслуговування чергової вимоги у момент її постановці у чергу. Неприйнята вимога втрачається, прийнята вимога стає в чергу і починає обслуговуватись щойно звільняється прилад, що обслуговує. Прийнята на обслуговування вимога дає дохід  $d > 0$  і спричиняє збитки, пропорційні часу  $T = k\Delta t$  перебування її у черзі, що виражаються добутком коефіцієнту втрат  $r > 0$  на час перебування її у черзі –  $T \cdot r$ . Зрозуміло, що будь-яка вимога, яка очікує в черзі, має тим меншу прибутковість, чим далі вона від входу.

Вираз:

$$K < \text{truncate} \left( \frac{d}{r \cdot c} \right)$$

дає необхідне обмеження на довжину черги, що забезпечує дохідність останньої у черзі вимоги.

Сукупний дохід розглянутої СМО від обслуговування накопиченої черги складатиме  $d(k) = k \cdot d - \frac{c \cdot r(1+k)k}{2}$ ,  $k < K$ . Максимальний дохід від черги при

$$k = K \text{ у разі натурального } d / (r \cdot c) \text{ складатиме } d(K) = \frac{d(d - r \cdot c)}{2 \cdot r \cdot c}.$$

У випадку детермінованого надходження вимог чергу не утворюють або утворюють не більше, ніж  $k=1$ . У разі, якщо вимоги надходять у нашу СМО частіше, ніж одна вимога за час обслуговування  $c$ , то їм відмовлятимуть. Одну вимогу ставлять у чергу на обслуговування з настанням умови  $c - t \leq \Delta t_{input}$  – коли час, що залишився на обслуговування вимоги, яка як раз обслуговується, стає менше інтервалу часу  $\Delta t_{input}$ , з яким у СМО приходить нова вимога. Оскільки вимоги у СМО надходять з випадковим інтервалом часу за розподілом Пуассона з інтенсивністю  $\lambda > 0$ , то статична стратегія повної відмови від черги може спричинити простій СМО без роботи, який зменшить дохід від експлуатації СМО порівняно з більшим завантаженням СМО за рахунок утворення черги, хоча і з відповідною сплатою штрафу. Необхідно знайти *стратегію*  $R$  прийняття вимог на обслуговування, яка максимізує очікуваний середній дохід за одиницю часу за умови нескінченної тривалості функціонування СМО. Стратегія утворюється на підставі закону надходження вимог і вимірюваних інтервалів часу між вимогами.

Покладемо, що рішення приймаються відразу у момент надходження вимоги у СМО. Стан СМО фіксується у момент надходження до неї  $n$ -ї вимоги (тобто, в момент часу  $n$ ). Станом СМО назвемо пару  $(k, t)$ , де  $k$  – число вимог, що знаходяться у СМО,  $t$  – час, що пройшов з початку обслуговування вимоги, яка займає прилад у даний час.

Позначимо  $a_0$  – рішення не приймати вимогу, що щойно надійшла, на обслуговування,  $a_1$  – брати. Тоді СМО є керованим марковським процесом з

дискретним часом. А досліджувану локальну соціально-економічну систему розглядатимемо як систему масового обслуговування.

Нехай,  $X$  і  $A$  у загальному випадку є деякими повними сепарабельними метричними просторами, що складаються з елементів  $x$  і  $a$ , відповідно. У дискретному випадку  $X$  і  $A$  є зліченими множинами фазового простору станів (ФПС) СМО і керування СМО, що складаються з елементів  $x_n$  і  $a_n$ ,  $n=0, 1, 2, \dots$  відповідно.  $\mathbf{B}$  і  $\mathbf{A}$  –  $\sigma$ -алгебри борелевських підмножин  $X$  і  $A$  відповідно.

$F$  – відображення, що зіставляє кожному  $x \in X$  деяку непусту замкнену множину  $A_x \subseteq A$  так, що множина  $\Delta = \{(x, a) : x \in X, a \in A_x\}$  вимірна за Борелем у добутку  $X \times A$ .

Розглянемо дискретну керовану СМО. Слід зазначити, що необхідною умовою придатності моделі дискретній СМО для практичного застосування є скінченність множин  $X$  і  $A$ , хоча елементи цих множин та їх кількість потребують визначення. Надалі називатимемо такі СМО «практичним випадком».

Нехай у момент часу  $n$  СМО знаходиться у стані  $x_n \in X$  і у момент настання цього стану обирається керування  $a_n \in A$ . Основне припущення стосовно ймовірнісної еволюції керованої дискретної СМО полягатиме у наступному:

$$P\{x_{n+1} \in B \mid x_0, a_0, x_1, a_1, \dots, x_n = x, a_n = a\} = P(B \mid x, a),$$

де  $B \in \mathbf{B}$  – довільна борелева множина,  $P(B \mid x, a)$  – при фіксованих  $x, a$  ( $(x, a) \in \Delta$ ) ймовірнісна міра  $(X, \mathbf{B})$ , а при фіксованій  $B$  – вимірна за Борелем функція на  $\Delta$ .

Допустимою стратегією  $R$  для керованої дискретної СМО є послідовність  $(\pi_0, \pi_1, \dots, \pi_n, \dots)$ , де  $\pi_n(\square x_0, a_0, \dots, a_n, x_n)$  – ймовірнісна міра на  $(A, \mathbf{A})$  зосереджена на  $A_{x_n}$  і вимірним чином залежна від  $h_n = (x_0, a_0, \dots, a_n, x_n)$  – історії

керуваної системи до моменту  $n$ ,  $h_n \in \underbrace{\Delta \times \Delta \times \dots \times \Delta}_n \times X$ .  $\pi_n(\square x_0, a_0, \dots, a_n, x_n)$  задає рандомізоване правило вибору керування  $a_n \in A$  на підставі  $h_n$ . Стратегія  $R$  буде марковською, якщо  $\pi_n(\square x_0, a_0, \dots, a_n, x_n) = \pi_n(\square x_n)$ ,  $n=0, 1, 2, \dots$ . Марківська стратегія  $R$  є стаціонарною, якщо  $\pi_n(\square x_n) = \pi(\square x_n)$ ,  $n=0, 1, 2, \dots$ . Марківська стратегія  $R$  є стаціонарною нерандомізованою, якщо міра  $\pi_n(\square x)$  вироджена для будь-якого  $x \in X$ .

Стаціонарна нерандомізована стратегія  $R$  ототожнюється з борелевською функцією  $R(x)$ , що задає  $X \rightarrow A$  так, що для будь-якого  $\forall x \in X : R(x) \in A_x$ .

Позначимо  $\mathfrak{R}$  – клас усіх допустимих стратегій,  $\mathfrak{R}_0$  – клас стаціонарних нерандомізованих (детермінованих) стратегій.

В загальному випадку неможливо стверджувати існування хоча б однієї допустимої стратегії.

Умови існування стратегії, що належить  $\mathfrak{R}_0$ , менш суворі. Отже, щоб клас  $\mathfrak{R}_0$  був не порожнім, необхідно існування вимірності відображення  $F : x \rightarrow A_x$ ,  $x \in X$ , такого, що  $\forall x \in X \exists F(x) \subseteq A$ ,  $F(x) \neq \emptyset$  і  $\{x : F(x) \cap E \neq \emptyset\} \in \mathbf{B}$ , де  $E$  – відповідно відкрита, замкнена або борелева множина в  $A$ .

В подальшому припускаємо, що відображення  $F : x \rightarrow A_x$ ,  $x \in X$  є вимірним. У випадку  $A_x \equiv A$  відображення  $F$  є вимірним і клас  $\mathfrak{R}_0$  співпадає з множиною всіх борелевських функцій, які відображають  $X$  в  $A$ .

Визначення стратегії  $R$  означає визначення випадкового процесу який, взагалі кажучи, не є марковським, не дивлячись на представлення (1), оскільки вибір рішення у будь-який момент часу  $x \in X$  може залежати від усієї історії  $h_n$ . Назвемо такий процес керування стратегією  $R$  випадковим процесом. Якщо стратегія марковська (стаціонарна), то керуваний процес є марковським (однорідним марковським).

Якщо, ввести поняття доходу  $d$ , пов'язаного з керуванням процесом, то можна сформулювати критерій оптимальності стратегії керування. Наприклад,

якщо у стані  $x \in X$  прийнято керування  $a \in A_x$ , то очікуваний дохід за один крок дорівнюватиме  $r(x, a)$ . Вважатимемо, що функція  $r(x, a)$  вимірювана за Борелем і обмежена на  $\Delta$ :

$$|r(x, a)| < L < \infty, (x, a) \in \Delta$$

Надалі набір  $\{X, A, \{A_x\}, P, r\}$  визначатиме керовану марковську модель з дискретним часом.

Розглянемо два наступним критерії якості керування:

1.  $\psi_\beta(x, R) = M_x^R \sum_{n=0}^{\infty} \beta^n r(x_n, a_n), 0 < \beta < 1,$
2.  $\varphi(x, R) = \liminf_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n+1} M_x^R \sum_{k=0}^n r(x_k, a_k).$

де  $M_x^R$  – умовне математичне сподівання, яке відповідає процесу, керованому стратегією  $R$  за умови  $x_0 = x$ .

Стратегія  $R^*$  оптимальна відносно критерію 1, якщо  $\psi_\beta(x, R^*) = \sup_{R \in \mathfrak{R}_0} \psi_\beta(x, R), x \in X$ .

Надалі критерій 1 зватимемо  $\psi$ -критерієм, а оптимальну стратегію для нього –  $\psi$ -оптимальною стратегією  $R_\psi^*$ .

Стратегія  $R^*$  оптимальна відносно критерію 2, якщо  $\varphi(x, R^*) = \sup_{R \in \mathfrak{R}_0} \varphi(x, R), x \in X$

Надалі критерій 2 зватимемо  $\varphi$ -критерієм, а оптимальну стратегію для нього –  $\varphi$ -оптимальною стратегією  $R_\varphi^*$ .

Достатні умови існування стаціонарних нерандомізованих  $\varphi$ -оптимальних стратегій  $R_\varphi^*$  даються теоремою [136].

Нехай існують постійна  $g$  і обмежена борелева функція  $v(x)$  на  $X$  такі, що

$$g + v(x) = \sup_{a \in A_x} \left\{ r(x, a) + \int_X v(y) P(dy | x, a) \right\}, x \in X.$$

Тоді

$$\sup_{R \in \mathfrak{R}_0} \varphi(x, R) \leq g, x \in X.$$

Якщо при цьому

$$g + v(x) = \max_{a \in A_x} \left\{ r(x, a) + \int_X v(y) P(dy | x, a) \right\}, x \in X,$$

і для деякої стратегії  $R^* \in \mathfrak{R}_0$

$$g + v(x) = r(x, R^*(x)) + \int_X v(y) P(dy | x, R^*(x)), x \in X,$$

тоді стратегія  $R^*$  –  $\varphi$ -оптимальна і

$$\varphi(x, R^*) \equiv g.$$

Для визначення конструктивного методу пошуку  $\varphi$ -оптимальної стратегії в класі  $\mathfrak{R}_0$  необхідно ввести наступні припущення:

*Припущення 1.* Існує невід'ємна міра  $\mu$  на  $(X, \mathbf{B})$ , така, що:

- 1)  $\mu(B) \leq P(B | x, a), (x, a) \in \Delta, B \in \mathbf{B}$ ,
- 2)  $\mu(X) > 0$ ,

яке виконається, зокрема, якщо існує такий стан  $x^* \in X$ , що має місце

$$P(\{x^*\} | x, a) \geq \alpha > 0, (x, a) \in \Delta.$$

Тобто, у якості  $\mu$  можна взяти міру, зосереджену у  $\{x^*\}$  з масою  $\alpha$ .

*Припущення 2.* Існує послідовність  $\{\beta_n\} \uparrow 1$ , деяка фіксована точка  $z \in X$  і число  $N < \infty$  такі, що функція  $|v_{\beta_n}(x)| = |\psi_{\beta_n}(x) - \psi_{\beta_n}(z)| < N, n = 1, 2, \dots$

Достатні умови існування в класі  $\mathfrak{R}_0$   $\varphi$ -оптимальної стратегії можна отримати з  $\psi$ -критерію у випадку  $A_x \equiv A$ , де  $A$  – скінченна або компактна множина.

Нехай  $A$  – скінчена множина і виконується *Припущення 1*. Тоді для будь якого  $0 < \beta < 1$  в класі  $\mathfrak{R}_0$  існує  $\varphi$ -оптимальна стратегія  $R_\beta$  і максимальний дохід  $\psi_\beta(x, R_\beta)$  буде єдиним розв'язком рівняння [137]

$$\psi_\beta(x) \max_{a \in A} \left\{ r(x, a) + \beta \int_X \psi_\beta(y) P(dy | x, a) \right\} \quad (4.1)$$

Нехай  $A$  – компактна множина, функція  $r(x, a)$  напівнеперервна зверху на  $X \times A$  і перехідна ймовірність  $P(\cdot | x, a)$  слабко неперервна по  $x, a$  і виконується *Припущення 1*. Тоді для будь якого  $0 < \beta < 1$  в класі  $\mathfrak{R}_0$  існує  $\psi$ -оптимальна стратегія  $R_\beta$  і максимальний дохід  $\psi_\beta(x, R_\beta)$  буде єдиним розв'язком рівняння (8) [17].

Нехай  $X$  – компакт,  $A$  – скінчена множина, виконується *Припущення 2*, функція  $r(x, a)$  неперервна по  $x, \forall a \in A$ ,  $\theta(X | x, x', a) \rightarrow 0, \forall a \in A$ , де  $\theta(\cdot | x, x', a) = P(\cdot | x, a) - P(\cdot | x', a)$ . Тоді в класі  $\mathfrak{R}_0$  існує  $\varphi$ -оптимальна стратегія.

Для скінченого ФПС існує наступний результат [138].

Нехай  $A$  – злічена множина,  $X$  – компактна множина, виконується *Припущення 2*, функція  $r(x, a)$  неперервна по  $a, \forall x \in X$ ,  $\sum_{y \in X} |P(\{y\} | x, a) - P(\{y\} | x, a')| \rightarrow 0, a' \rightarrow a, x \in X$ . Тоді в класі  $\mathfrak{R}_0$  існує  $\varphi$ -оптимальна стратегія.

Деякі послаблення достатніх умов існування оптимальних стаціонарних стратегій для керованих марковських процесів можна знайти в [139].

У даному прикладі розглядається керована одноканальна система масового обслуговування (СМО) з пуассоновим вхідним потоком з  $\lambda > 0$  і сталим часом обслуговування  $t_{\text{srv}} > 0$ . Довжина черги обмежена  $l_q > 0$ . Керуванням вважається прийняття-неприйняття на обслуговування чергової вимоги у момент її постановці у чергу. Неприйнята вимога втрачається, прийнята вимога стає в чергу і починає обслуговуватись щойно звільняється об'єкт (прилад), що

обслуговує. Прийнята на обслуговування вимога дає дохід  $\text{inc} > 0$  і несе збитки, пропорційні часу перебування вимоги у черзі, що виражаються коефіцієнтом  $w_q > 0$ . Необхідно знайти стратегію прийняття вимог на обслуговування, яка максимізує очікуваний середній дохід за одиницю часу за умови нескінченної тривалості функціонування СМО.

$$X = \{(0, 0)\} \cup \{1, 2, \dots, K\} \times [0, c]; \quad (4.2)$$

$$A = \{a_0, a_1\}; \quad (4.3)$$

$$\begin{aligned} A(k, t) &= A, \text{ if } (k, t) \in X, k \leq K; \\ A(k, t) &= \{a_0\}, \text{ if } k \geq K + 1; \end{aligned} \quad (4.4)$$

$$P(\{k\} \times [t, \tau] | (k, t), a_0) = 1 - e^{-\lambda(\tau-t)}, (k, t) \in X, k > 0, t < \tau \leq c;$$

$$\begin{aligned} P(\{k-i\} \times [p, \tau] | (k, t), a_0) &= e^{-\lambda(ic-t)} [1 - e^{-\lambda\tau}], \\ (k, t) \in X, k > 0, i = 1, 2, \dots, k-1, t < \tau \leq c \end{aligned};$$

$$P(\{0, 0\} | (k, t), a_0) = e^{-\lambda(kc-t)}, (k, t) \in X; \quad (4.5)$$

$$P(B | (k, t), a_1) = P(B | (k+1, t), a_0), (k, t) \in X, k \leq K; \quad (4.6)$$

$$\begin{aligned} r((k, t), a_0) &= 0, \text{ if } i = 0, (k, t) \in X \\ r((k, t), a_0) &= d - r(kc - t), \text{ if } i = 1, (k, t) \in X, k \leq K \end{aligned}$$

З формул (4.4), (4.5) випливає, що  $P(\{0, 0\} | (k, t), a) \geq e^{-\lambda(K+1)c} = a > 0$ ,  $(k, t) \in X$ ,  $a \in A_{(k,t)}$  і ймовірність переходу задовольняє припущенню існування невід'ємної міри  $\mu$  з масою  $a$  на  $(X, \mathbf{B})$  такої, що  $\mu(X) > 0$  і  $\mu(B) \leq P(B | x, a)$ ,  $(x, a) \in \Delta$ ,  $B \in \mathbf{B}$ . Тоді існує  $\varphi$ -оптимальна стратегія  $R_\varphi^* \in \mathfrak{R}_0$ . Рівняння  $\varphi$ -оптимальності можна розв'язати методом послідовних наближень.

Запропонований підхід до проектування структури ЛСЕС може бути використаний у складі відповідних систем підтримки прийняття рішень для планування та прогнозування регіонального та місцевого розвитку, що дозволить ефективніше використовувати наявний місцевий виробничий та ресурсний потенціал за рахунок кооперації та інтеграції виробництва, спільного використання соціальної, транспортної, інформаційно-телекомунікаційної інфраструктури. Наприклад, це можуть бути задачі спільного використання

складських приміщень, пунктів зберігання та сушіння зерна, медичних закладів, тощо. Досягнення переваг забезпечуватиметься за рахунок оброблення заявок у практично замкненому господарському (або соціальному) комплексі локальної соціально-економічної системи, як-то збір урожаю, логістика перевезень різними видами транспорту, обмін виробничими ресурсами у процесі виготовлення продукції.

Для побудови моделі використано [140, 141]. Графічно імітаційна модель СМО представлена на рис. 4.11.

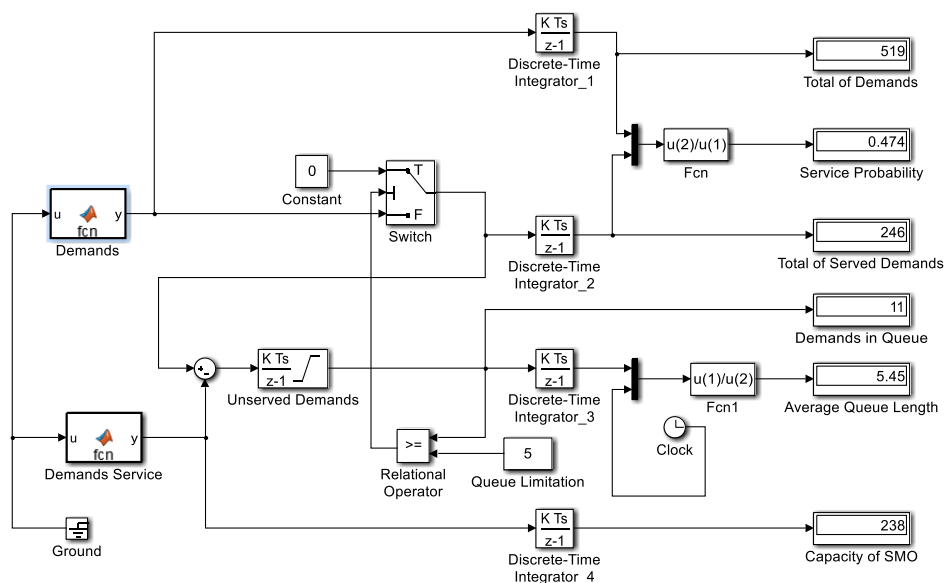


Рисунок 4.11 - S-модель СМО з дискретним кроком без оптимальної стратегії

Оскільки існування і єдиність розв'язку рівняння (4.1) доведено, то його пошук можна здійснити за допомогою ітераційного методу Ховарда [142], реалізувавши його сучасними програмними методами [143], а саме, в заданому діапазоні шукаємо обмеження на чергу на кожному кроці моделювання, яке, відповідно, дає максимум на нескінченному проміжку часу, і на кожному кроці передається у модель (рис.4.12).

Оскільки нескінченне моделювання неможливо, крім того, практичний випадок також обмежений у часі, то приймаємо моделювання у тривалому але обмеженому часі як нескінченне.

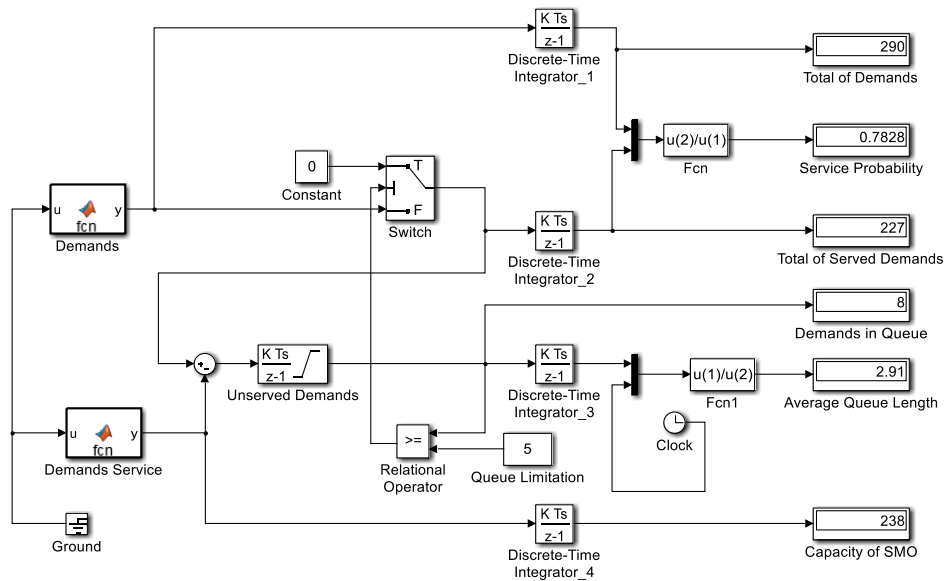


Рисунок 4.12 - S-модель СМО з дискретним кроком з оптимальною стратегією

Отже, у випадку застосування оптимальної стратегії у абсолютній кількості було обслужено майже та ж кількість вимог, що і для неоптимальної стратегії. Але для збільшення прибутковості, СМО має зменшувати довжину черги.

Особливістю даного підходу є те, що у процесі побудови моделей, дослідження здійснюється у декілька етапів, імітуючи поведінку системи, виявляючи нові проблеми розвитку та зовнішні і внутрішні фактори, що спричиняють їх, покращуючи таким чином отримувані результати.

#### 4.4 Моделі СМО у інформаційній технології моделювання реалізації соціальної складової сталого розвитку

Виходячи з того, що більшість територіальних громад мають сформовану соціальну інфраструктуру структуру, об'єкти соціальної сфери, транспортне сполучення, тощо, в роботі розглядається задача оптимального керування наявною СМО. Перевагами застосування моделей систем масового обслуговування є те, що їх використання дозволяє врахувати специфіку взаємодії об'єктів, оцінити якість керування, попередньо з'ясувавши, чи доступні певні

впливи для досліджуваної системи. Розроблені моделі, методи, алгоритми призначені для використання у інформаційній технології підтримки прийняття рішень у системі державного та публічного управління. Її впровадження підвищить якість та оперативність управлінських рішень за рахунок оптимізації аналітичних процесів.

Наприклад, для задачі оптимізації роботи муніципального центру надання адміністративних послуг (ЦНАП) як елемента ЛСЕС, запропоновано використання моделей СМО. Для ЛСЕС,, громади, Центри надання адміністративних послуг (ЦНАП) є важливими інфраструктурними вузлами, від ефективності роботи якого, залежить рівень задоволення населення наданням адміністративних послуг, якість управління на місцевому та регіональному рівнях.

Одним з найбільш важливих критеріїв якості обслуговування є час який витрачається на перебування у ЦНАП. Перевантаження ЦНАП призводить до ускладнення досягнення цілей сталого розвитку – забезпечення якості надання соціальних та адміністративних послуг.

В загальному вигляді, формалізована постановка задачі обслуговування населення у ЦНАП у контексті формування ЛСЕС має наступний вигляд:

- ЦНАП – система масового обслуговування (СМО);
- звернення громадян – це вхідний потік вимог;
- працівники – це обслуговуючі одиниці вхідний потік вимог;
- час обслуговування – адміністративна процедура;
- черга – навантаження на систему.

Стан системи описується як  $s = (n, t)$ , де  $n$  – кількість заявок в системі,  $t$  – час обслуговування поточної заявки.

Керування системи  $a \in \{0,1\}$ , де  $a = 1$  означає прийняти заявку,  $a = 0$  означає відмовити.

Цільова функція, тобто критерій оптимальності, описується як:

$$\max_{\pi} E \left[ \sum_{t=0}^{\infty} r(s_t, a_t) \right]$$

де  $r(s, a) = inc - w_q \cdot t_{queue}$ ;  $inc$  – ефективність (довіра, дохід, податки);  $w_q$  – соціальні втрати (незадоволення населення, корупційні ризики);  $t_{srv}$  – середній час надання послуги;  $l_q$  – допустиме навантаження системи;  $\lambda$  – інтенсивність звернення громадян.

Наведена цільова функція намагається:

- максимізувати ефективність обслуговування;
- мінімізувати соціальні втрати від черг.

Чисельний експеримент, проведений в рамках дисертаційного дослідження включає такі параметри моделювання, для всіх сценаріїв:

- інтенсивність потоку  $\lambda=6$ ;
- час обслуговування  $t_{srv} = 0,15$ ;
- максимальна черга  $l_q = 10$
- дохід за кожен заявку  $inc = 10$  умовних одиниць;
- штраф за очікування  $w_q = 1,5$  одиниць / годину (од./год.);
- горизонт моделювання 10 000 кроків.

В таблиці 4.5 наведені результати моделювання, для трьох стратегій.

Таблиця 4.5 - Результати моделювання різних стратегій.

Показник	Ліберальна стратегія	Жорстке обмеження	Оптимальна стратегія
Середня довжина черги	8,7	2,1	4,6
Ймовірність відмови	0	0,32	0,12
Середній час очікування, год	1,25	0,28	0,62
Обслуговано заявок за годину	5,85	4,05	5,10
Втрати від очікування	10,9	1,7	4,3
Чистий дохід, од/год	47,6	38,8	46,7

Ліберальна стратегія – полягає в тому, щоб приймати усі заявки, як наслідок система стає перевантаженою, підвищується дохід, але значні соціальні втрати, і загалом нестійкий режим для ЛСЕС.

Жорстке обмеження – полягає в тому, що довжина черги менша або дорівнює трьом. В результаті отримують низьке навантаження, значні втрати через відмови, в цілому система стає соціально комфортною, але економічно неефективною.

Оптимальна стратегія – полягає в тому, що довжина черги менша або дорівнює п'яти, якщо більше п'яти, то відхиляти. В результаті система досягає балансу між перевантаженням і відмовами, досягається майже максимальний дохід, і при цьому значно менші соціальні втрати.

Для визначення оптимальної стратегії розвитку ЛСЕС, її представлено у вигляді керованої марковської системи масового обслуговування, використано ітераційний метод покращення політики (метод Ховарда).

Суть методу полягає у послідовному уточненні стратегії на основі оцінки функції виграшу до досягнення збіжності, що дозволяє отримати стаціонарну нерандомізовану оптимальну політику, яка максимізує середній дохід системи у довгостроковому періоді.

З результатів моделювання різних стратегій, представлених в таблиці 4.5, можна зробити наступні висновки:

1) Оптимальна стратегія дає майже максимальний дохід, який лише на 2% менше, ніж у ліберальній стратегії але значно зменшені соціальні втрати.

2) Перевантаження системи критично впливає на ЛСЕС, тому що довгі черги призводять до падіння якості управління, і при цьому виникають потенційні корупційні ризики.

3) Відмови небажані з причин – зниження економічної ефективності та обмеження доступу до послуг.

На рис. 4.13 представлена 3D поверхня, яка показує залежність між доходом, довжиною черги та інтенсивності потоку  $\lambda$

3D-поверхня: дохід-черга-інтенсивність

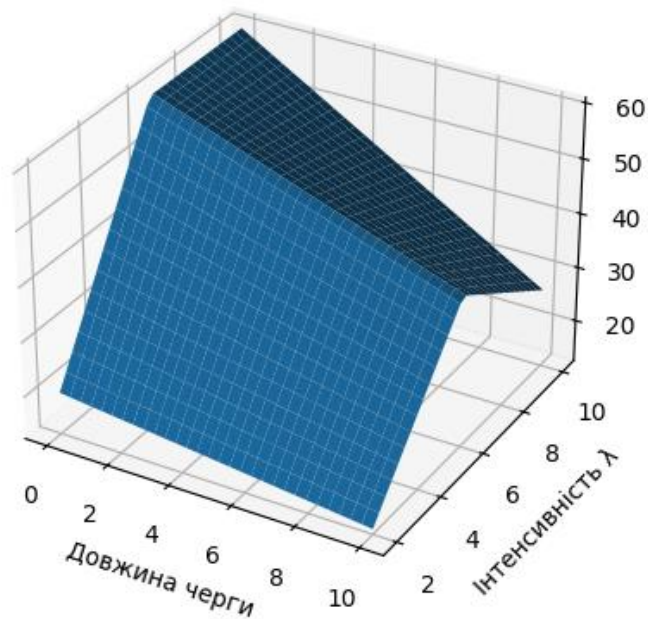


Рисунок 4.13 - 3D поверхня, яка показує залежність між доходом, довжиною черги та інтенсивності потоку  $\lambda$

Як можна побачити з рис. 4.13, при зростанні показника  $\lambda$  (інтенсивність потоку) до рівня обслуговування система генерує більший дохід, але надмірне зростання  $\lambda$  не дає пропорційного приросту доходу.

Зі збільшенням довжини черги дохід монотонно зменшується, по причині зростання штрафів (соціальних втрат). Максимальний дохід досягається при помірній інтенсивності потоку, коли  $\lambda \approx \mu$  та контрольованій довжині черги. Все це узгоджується з висновками про оптимальну політику, при якій потік включає  $\leq 5$  заявок.

#### 4.5 Застосування мереж Байєса для моделювання складу ЛСЕС

Математичні моделі посідають особливе місце серед аналітичного інструментарію розробленої інформаційної технології. В умовах невизначеності, коли потрібно передбачити майбутню ситуацію не лише на основі ретроспективних даних, а виходячи із зміни, що мають відбуватись, зокрема,

структурних зрушень (зміни галузевої структури, складу територіальної громади, формування ЛСЕС), переваги мають ймовірно-статистичні моделі. Запропоновану методику застосовано для побудови сценарію розвитку ЛСЕС на базі територіальних громад, провідною галуззю економіки якої є сільське господарство та міської громади. Ключовими критеріями є реалізація цілей сталого розвитку ЛСЕС, одним з критеріїв, за якими можна оцінити їх досягнення є показники бюджетної забезпеченості. Дослідження виконано на даних територіальних громад Черкаської області [144]. Позначення назв громад – умовне.

В ході дослідження побудовані моделі у формі мережі Байєса, що описують бюджети міської, сільських та об'єднаних територіальних громад, що межують між собою, маю спільну транспортну інфраструктуру, спільно використовують заклади освіти, охорони здоров'я, тощо

Вхідні змінні:

- X1- виробництво продукції промисловості, тис грн.
- X2 - виробництво продукції сільського господарства, тис грн.
- X3 - податки з доходів фізичних осіб, тис грн.
- X4 - місцеві податки та збори, тис грн.
- X5 - інші доходи місцевого бюджету, тис грн.
- X6 – вироблено будівельної продукції, тис грн.
- X7 – надання транспортних послуг, тис грн.
- X8 - видатки на соціальні заходи, тисячі гривень
- X9 - видатки на утримання закладів охорони здоров'я, тис грн.
- X10 - видатки на освіту, тис грн.
- X11 - видатки на комунальне господарство, тис грн.
- X12 - видатки на екологію, тис грн.
- X13 - видатки на управління, тис грн.
- X14 – доходи від інших галузей, тис грн.
- X15 – трансферти між бюджетами різних рівнів, тис грн.

BR – (budget revenue) – доходи місцевого бюджету, інтегральний показник, тис грн..

Y - Цільова змінна – частка місцевого бюджету, що припадає на одну особу (бюджетна забезпеченість), тис грн на одну особу

Інтегральний показник доходів місцевого бюджету BR найбільш чутливий до податкових надходжень та міжбюджетних трансфертів, що підтверджує домінуючу роль фіскальної політики у формуванні фінансової спроможності громади.

$$BR = \sum_{k \in \{1,2,3,4,5,6,7,14,15\}} w_k \cdot X_k$$

де  $w_k$  – вагові коефіцієнти, які обчислюються через умовні очікування

$$w_k \approx \frac{\partial E[BR]}{\partial X_k}$$

або

$$w_k = \sum_{br} br \cdot P(BR = br | X_k)$$

Якщо потрібно збільшити значення інтегрального показника BR, то в першу чергу треба збільшувати X4 (місцеві податки) та X3 (ПДФО), а в другу чергу збільшувати X5 (інші доходи місцевого бюджету) та X14 (доходи від інших галузей).

Формула Байєса для побудови ймовірнісного висновку (апостеріорний розподіл), на основі побудованої топології мережі Байєса, що враховує різноманітні сценарії описується наступними рівняннями.

$$P(Y|S = s) = \sum_X P(Y|X, s) \cdot P(X|s)$$

де  $X = \{X_1, \dots, X_{15}, BR\}$  – вхідні змінні процесу,  $S$  – сценарії, що моделюються.

Формула факторизації спільного розподілу, побудованої мережі Байєса, записується як:

$$\begin{aligned}
 P &= P(S) \cdot P(X_1|S) \cdot P(X_2|S) \cdot P(X_6|S) \cdot P(X_7|S) \cdot P(X_{14}|S) \\
 &\cdot P(X_3|X_1, X_2, X_6, X_7, X_{14}) \cdot P(X_4|X_1, X_2, X_6, X_7) \cdot P(X_5|X_6, X_7, X_{14}) \\
 &\cdot P(X_{15}|S) \cdot P(BR|X_3, X_4, X_5, X_{15}) \cdot \prod_{i=8}^{13} P(X_i|BR) \\
 &\cdot P(Y|X_8, X_9, X_{10}, X_{11}, X_{12}, X_{13})
 \end{aligned}$$

Для побудови моделей, соціально-економічні показники були впорядковані у тематичні групи:

1. Первинні фактори економічної активності, так звана економічна база (джерела формування доходів): X1 – промисловість, X2 – сільське господарство, X6 – будівництво, X7 – транспорт, X14 – доходи від інших галузей

2. Доходи бюджету, що формуються під впливом економічної бази: X3 – ПДФО, X4 – місцеві податки, X5 – інші доходи, X15 – трансферти між бюджетами різних рівнів.

3. Видатки бюджету: X8 – соціальні заходи, X9 – охорона здоров'я, X10 – освіта, X11 – комунальне господарство, X12 – екологія, X13 – управління.

4. Цільова змінна: Y – бюджетна забезпеченість (тис грн / особу)

За результатами моделювання соціально-економічних показників міста Y, отримано топологію мережі Байєса, представлену на рис. 4.14 (побудована в програмі Genie 2.0).

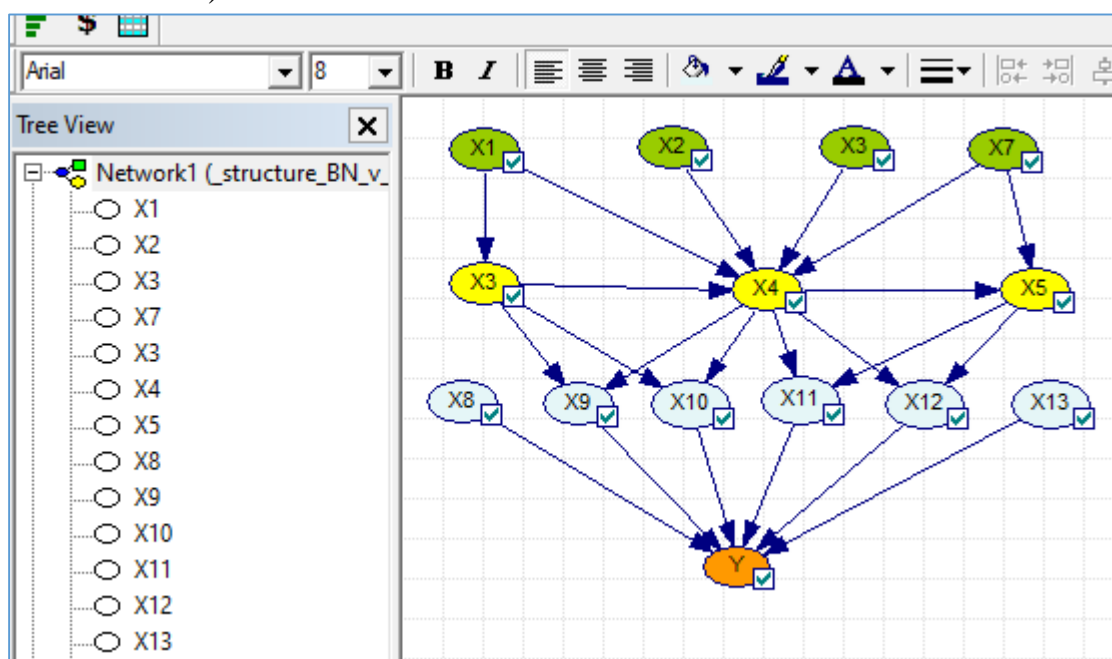


Рисунок 4.14 – Топологія мережі Байєса для міської територіальної громади

Для сільської територіальної громади, розташованої безпосередньо біля міста, побудовані топології мереж Байєса, представлені на рис. 4.15.

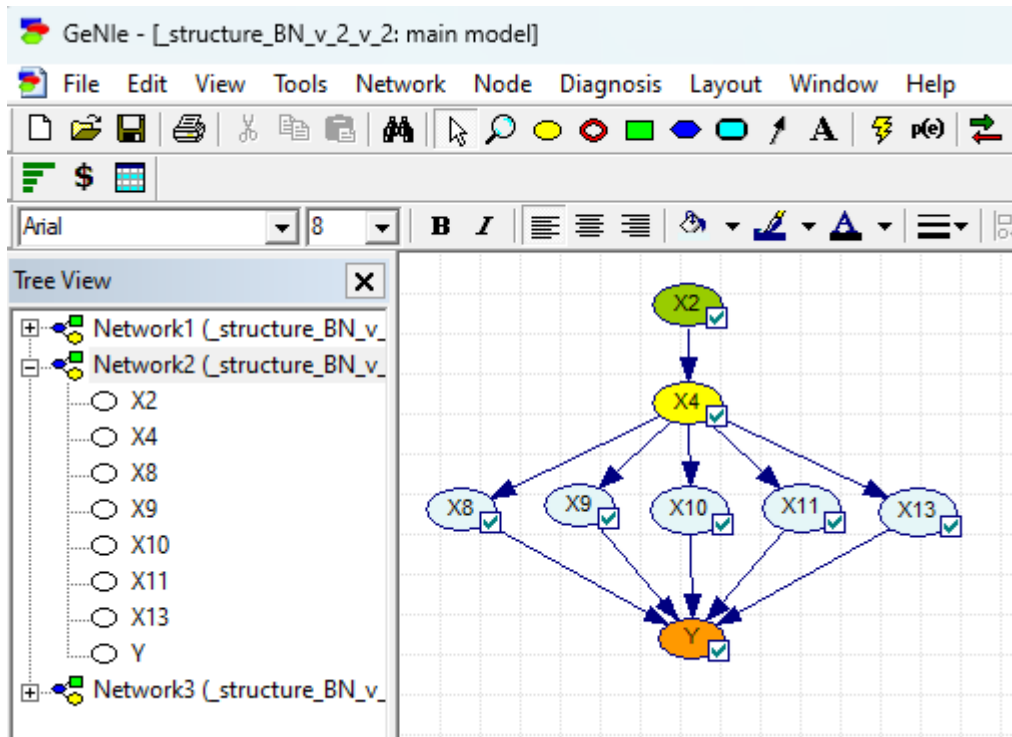


Рисунок 4.15 - Топологія мережі Байєса для сільської територіальної громади Р., побудована в програмі GeNIe 2.0.

Дана територіальна громада вирізняється високим рівнем соціально-економічного розвитку та традиційно високим рівнем наповнюваності місцевого бюджету громади.

Також у дослідженні розглянуто варіант, коли у складі ЛСЕС об'єднуються спроможні та неспроможні громади.

Концепція моделі – спеціально вводиться в мережу Байєса додаткова змінна:  $S$  – сценарій об'єднання, яка приймає наступні значення:

- 1)  $S = 1$  – об'єднання громади  $U$  та громади села  $П.$ .
- 2)  $S = 2$  – об'єднання громади  $U$  та громади  $Р.$

Логіка побудови наведеної структури мережі Байєса полягає в тому, що економічна база ЛСЕС залежить від сценарію:

- об'єднання з громадою  $П.$  забезпечує зростання частки сільського господарства у галузевій структурі ЛСЕС, не посилює фінансову складову місцевого розвитку.

- об'єднання з громадою Р., збільшує частку сільського господарства у галузевій структурі ЛСЕС, посилює фінансову складову місцевого розвитку.

Варіант об'єднання міської територіальної громади та сільських територіальних громад представлений на рис. 4.16.

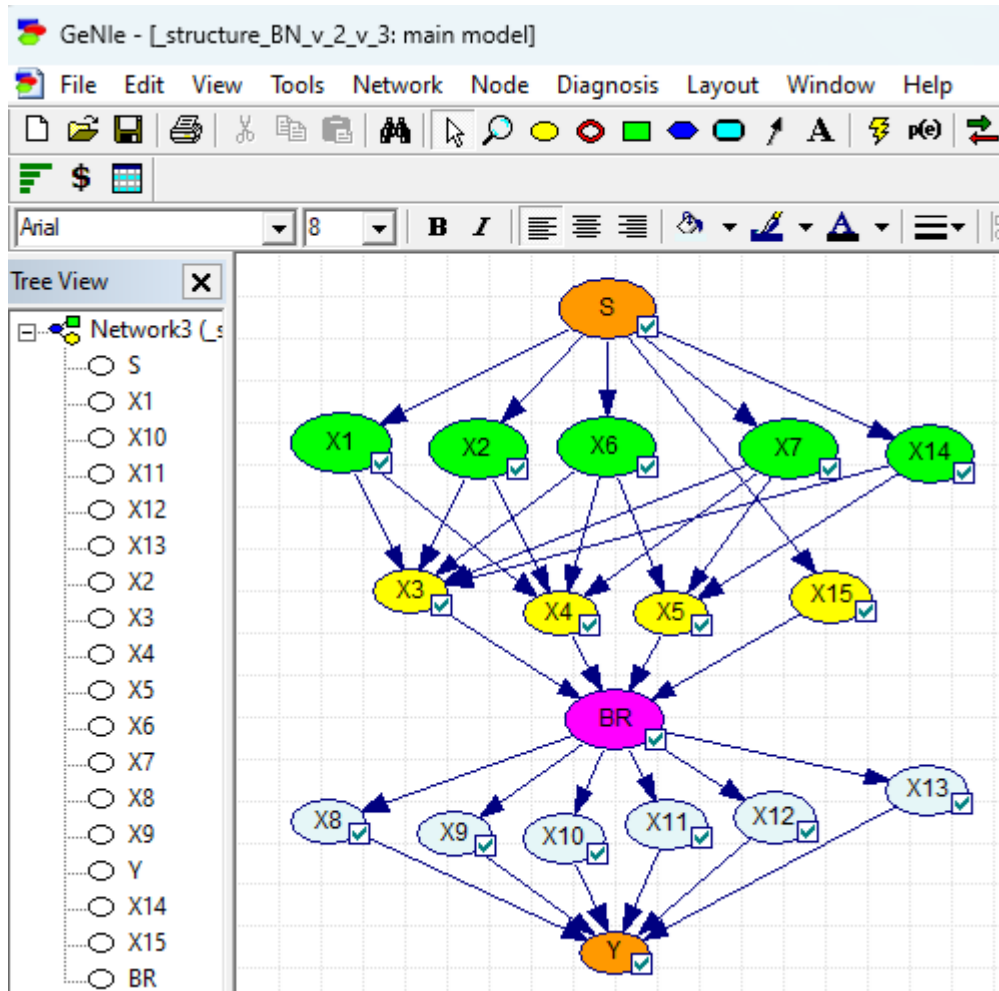


Рисунок 4.16 - Топологія мережі Байєса, із урахуванням різних сценаріїв об'єднання, побудована в програмі GeNIe 2.0

Побудована топологія мережі Байєса дозволяє:

- 1) використовувати змінну сценарію S як керуючого фактору
- 2) моделювати ефект синергії громад
- 3) робити інтеграцію економічних і бюджетних процесів в одну модель

Усі наведені фактори X1-X13 було переведено до дискретних значень, трьох рівнів, а саме:

L – Low – низький рівень;

M – Medium – середній рівень;

H – High – високий рівень.

Таблиця 4.6 - Таблиця значень умовних ймовірностей для змінної X1 – промисловість.

<b>S</b>	<b>P(L)</b>	<b>P(M)</b>	<b>P(H)</b>
S1	0.3	0.5	0.2
S2	0.1	0.3	0.6

Таблиця 4.7 – Таблиця значень умовних ймовірностей для змінної X2 – сільське господарство

<b>S</b>	<b>P(L)</b>	<b>P(M)</b>	<b>P(H)</b>
S1	0.1	0.3	0.6
S2	0.2	0.5	0.3

Таблиця 4.8 – Таблиця значень умовних ймовірностей для змінної X6 – будівництво

<b>S</b>	<b>P(L)</b>	<b>P(M)</b>	<b>P(H)</b>
S1	0.3	0.5	0.2
S2	0.2	0.4	0.4

Таблиця 4.9 – Таблиця значень умовних ймовірностей для змінної X7 – транспорт

<b>S</b>	<b>P(L)</b>	<b>P(M)</b>	<b>P(H)</b>
S1	0.4	0.4	0.2
S2	0.2	0.5	0.3

Таблиця 4.10 – Таблиця значень умовних ймовірностей для змінної X3 – ПДФО.

<b>X1</b>	<b>X2</b>	<b>P(L)</b>	<b>P(M)</b>	<b>P(H)</b>
L	L	0.7	0.2	0.1
L	H	0.3	0.5	0.2
H	L	0.3	0.5	0.2
H	H	0.1	0.4	0.5

Таблиця 4.11 – Таблиця значень умовних ймовірностей для змінної X4 – місцеві податки.

<b>X1</b>	<b>X6</b>	<b>P(L)</b>	<b>P(M)</b>	<b>P(H)</b>
L	L	0.6	0.3	0.1
M	M	0.2	0.5	0.3
H	H	0.1	0.3	0.6

Таблиця 4.12 – Таблиця значень умовних ймовірностей для змінної X5 – інші доходи.

<b>X6</b>	<b>X7</b>	<b>P(L)</b>	<b>P(M)</b>	<b>P(H)</b>
L	L	0.7	0.2	0.1
M	M	0.2	0.5	0.3
H	H	0.1	0.3	0.6

На рис. 4.17 вище наведено теплову карту ступеня важливості вхідних змінних X1-X15, BR на цільову змінну Y.

Наведені результати можна інтерпретувати наступним чином:

Фактори, що здійснюють позитивний вплив (збільшують Y, тому що доходи бюджету є ключовим драйвером), фактично ядро інтегрального показника BR:

- X4 – місцеві податки та збори;
- X3 – ПДФО;

- X5 – інші доходи;
- X15 – міжбюджетні трансферти;
- X14 – доходи від інших галузей.

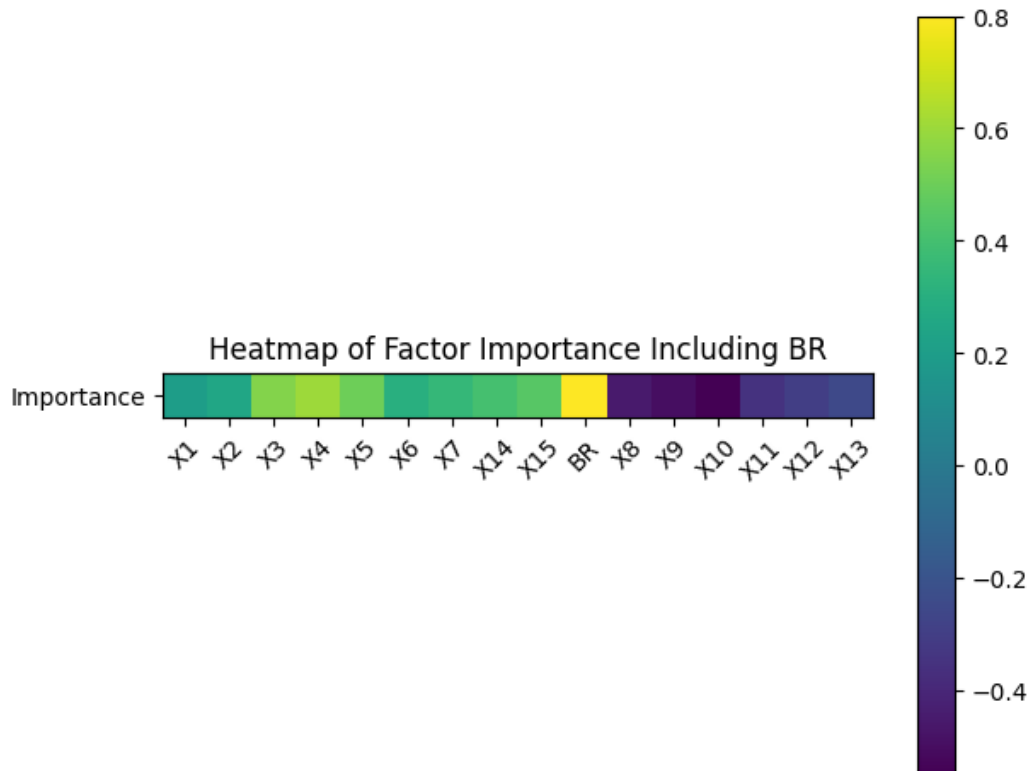


Рисунок 4.17 - Теплова карта ступеня важливості вхідних змінних X1-X15, BR на цільову змінну Y

Фактори, що здійснюють помірний позитивний вплив (збільшують Y):

- X2 – виробництво продукції сільського господарства;
- X7 – транспорт;
- X6 – виробництво продукції будівництва;
- X1 – виробництво продукції промисловості.

Фактори, що здійснюють негативний вплив (зменшують Y, тому, що це найбільш витратні статті бюджету)

- X10 – освіта;
- X9 – охорона здоров'я;
- X8 – соціальні витрати.

Фактори, що здійснюють слабкий негативний вплив

- X11 – комунальне господарство;
- X12 – екологія;
- X13 – управління.

В табл. 4.13 представлені результати моделювання за обома сценаріями об'єднання

Таблиця 4.13 – Сценарії об'єднання та значення станів вхідних змінних аналізу

Змінна	Сценарії	
	S=1	S=2
X1	Medium	High
X2	High	Medium
X3	Medium	High
X4	Medium	High
X5	Medium	High
Видатки X8–X13	Low	Medium

Побудована модель мережі Байєса для різних сценаріїв показує, що:

- результати утворення ЛСЕС залежать від балансу доходів та витрат;
- за деяких вхідних умов різні сценарії можуть давати еквівалентні результати;
- при зміні параметрів змінюється і оптимальний вибір.

Отже, слід відзначити, що використання пропонованого підходу у інформаційних технологіях, що використовуються в роботі органів державного управління, місцевого самоврядування, а можливо й громадських організацій, створить умови для формування ефективних, спроможних громад та їх

об'єднань, дозволить їм якнайповніше використовувати власний потенціал, підвищити ефективність урядування.

#### 4.6 Моделювання екологічної складової сталого розвитку ЛСЕС

На кожному етапі моніторингу за станом атмосфери і довкілля необхідна інформація про концентрацію забруднювачів. Інформацію можна отримувати в результаті прямих спостережень і вимірювань – дані з датчиків та геодані. До факторів управління відносяться вибір заходів для зменшення концентрації забруднюючих елементів та придбання засобів зменшення викидів, а критеріями переваги при виборі рішень є економічні показники.

Основу інформаційної технології моніторингу та прогнозування стану забруднення атмосфери становлять математичні моделі у вигляді марковського керованого процесу на скінченному часовому проміжку. В якості прикладу екологічного процесу розглянуто забруднення повітря шкідливими викидами.

Процес забруднення розглядається як неперервний процес розвитку - розповсюдження забруднювача в повітрі (зміна концентрації забруднювачів на певній місцевості).

Означимо дискретні класи станів:  $X_t$ ,  $t = 0, \dots, n$ , а  $X_t$  – клас стану атмосфери на момент часу  $t$ . Перехід з одного класу станів в інший здійснюється за допомогою керувань:  $A_t$ ,  $t = 1, \dots, n$ , де  $A_t$  – клас керувань у момент  $t$ .

Керування з класу  $A_t$  здійснює перехід зі станів класу  $X_{t-1}$  в стани класу  $X_t$ . Стани класу  $X_n$  називаються фінальними чи кінцевими станами.

Такий процес можна вважати марковським, оскільки перехід з одного класу станів в інший клас не залежить від передісторії переходів, а залежить лише від того класу станів, у якому знаходиться процес у момент переходу.

Модель розповсюдження забруднення представлено наступним чином::

$X_0$  – початковий стан,  $X_0 = \{x_{01}, x_{02}, \dots, x_{0m}\}$ : початкова концентрація забруднювачів і т.д.

$X_1$  – стан атмосфери на 1-му етапі,  $X_1 = \{x_{11}, x_{12}, x_{13} \dots x_{1m}\}$ : концентрація забруднювачів (на рівні допустимих значень, перевищує-норму, незадовільна);

$X_2$  – стан атмосфери на 2-му етапі,  $X_2 = \{x_{21}, x_{22} \dots x_{2m}\}$ : концентрація забруднювачів;

Аналогічно,  $X_3$  – стан атмосфери на 3-му етапі,  $X_3 = \{x_{31}, x_{32}, x_{33} \dots x_{3m}\}$ ,  $X_4$  – стан атмосфери на 4-му етапі,  $X_4 = \{x_{41}, x_{42}, x_{43} \dots x_{4m}\}$ , і т.д.  $X_n$  – стан атмосфери чи навколишнього середовища, що потребує оперативного втручання,  $X_n = \{x_{n1}, x_{n2} \dots x_{nm}\}$ : вибір методів та заходів оперативного втручання.

Елемент множини керувань для переходу з одного стану в інший – окрема технологічна операція із набором технічних засобів для її здійснення.

Множина керувань має вид:

$A_1$  – заходи по зменшенню концентрації на першому кроці,  $A_1 = \{a_{11}, a_{12}, a_{13} \dots a_{1k}\}$  (здійснення переходу зі станів класу  $X_0$  в стани класу  $X_1$ ).

$A_2$  – заходи по зменшенню концентрації на другому кроці,  $A_2 = \{a_{21}, a_{22} \dots a_{2k}\}$ .

$A_3$  – заходи по зменшенню концентрації на третьому кроці,  $A_3 = \{a_{31}, a_{32}, a_{33} \dots a_{3k}\}$ .

$A_4$  – заходи по зменшенню концентрації на четвертому кроці,  $A_4 = \{a_{41}, a_{42}, a_{43} \dots a_{4k}\}$ :

Заходи по зменшенню концентрації забруднювачів – встановлення захисних споруд, засобів моніторингу, модернізація обладнання, тощо.

$A_n$  – заходи по зменшенню концентрації на фінальному кроці,  $A_n = \{a_{n1}, a_{n2} \dots a_{nk}\}$ : - методи і засоби оперативного втручання, і т.д.

Кінцевий стан характеризується функцією  $r$  – фінальна плата (ресурси, які необхідні для оперативного втручання).

Перехід з одного класу станів в інший оцінюється функцією  $q$  – поточна плата (ресурси, що витрачено на виконання технологічних операцій), як правило,

є від'ємною. Послідовність станів і керувань, що переводять зі стану в стан, є шлях –  $l = x_0 a_1 x_1 \dots a_n x_n$ .

Результатом моделювання є пошук оптимального шляху, тобто, сума поточних витрат і фінальних повинна бути максимальною.

Якщо процес детермінований, тобто переходу із стану в стан здійснюється не випадково, то вирішити задачу можна, якщо перебрати всі можливі варіанти. Але, в загальному випадку, перехід випадковий, тобто на множині станів  $X_t$  у момент часу  $t$  заданий деякий розподіл ймовірностей, тому вибір здійснюється з його врахуванням. При цьому, також, задається деякий початковий розподіл  $\mu$ . Якщо процес заданий на кінцевому інтервалі, то цю задачу можна вирішувати методами динамічного програмування.

Головною проблемою є завдання розподілу ймовірностей: їх можна задавати експертним шляхом, а можна і обчислювати методами планування експериментів, виконувати, наприклад, оцінку параметрів розповсюдження забруднювачів, в тому числі і за космічними знімками, або застосовувати інші проміжні тест-аналізи. На підставі отриманої інформації будуються чи уточнюються розподіли цих параметрів. Динамічне програмування можна використовувати у випадку, коли процес заданий на нескінченному інтервалі - модель розвитку забруднення на кілька років.

Таким чином, побудована модель процесу у вигляді марковського керованого процесу на кінцевому часовому інтервалі. Процес задають наступні елементи:

- $X_t, t = 0, \dots, n$  – множина станів у момент  $t$ ;
- $A_t, t = 1, \dots, n$  – множина керувань у момент  $t$ ;

Відображення  $f$  множини керувань  $A = \bigcup_{t=1}^n A_t$  у множину станів  $X = \bigcup_{t=0}^n X_t$ , таке що  $f(A_{t+1}) = X_t$ ;

Розподіл ймовірностей  $p(\cdot | a)$  на  $X_t$ . Функція  $p(\cdot | a)$  називається перехідною функцією, визначає закон переходу в  $X_t$ ;

- функція  $q$  на множині  $A = \bigcup_{t=1}^n A_t$  керувань – поточна плата;
- функція  $r$  на множині  $X_n$  фінальних станів – фінальна плата;

- початковий розподіл ймовірностей –  $\mu$ .

Об'єкт, що задовольняє вказаним умовам називається моделлю процесу розповсюдження. Модель процесу будемо позначати  $Z_\mu$ . Основне завдання – знайти спосіб керування, при якому максимальним є середнє значення (математичне сподівання) оцінки:

$$I(l) = \sum_{t=1}^n q(a_t) + r(x_n)$$

шляху  $l = x_0 a_1 x_1 \dots a_n x_n$ , або знаходження такого шляху при якому  $J(l) = \max_{a_j \in A_j, x_n \in X_n} F(q(a_j), r(x_n))$ , де  $F$  – деякий функціонал (цільова функція).

Використовуючи космічні знімки високої роздільної здатності, можна забезпечити підвищення якості рішень щодо дотримання термінів і якості технологічних операцій. Однак, ефективними є й простіші математичні моделі, що описують потоки частинок, що рухаються, забруднюючи атмосферу.

Нехай, у дискретні моменти часу  $t = 1, 2, \dots$  у пункті  $\omega_i$  концентрація речовини, що забруднює атмосферу, дорівнює  $u_i(t)$ . Тоді, за одиницю часу певна частка забруднювача з пункту  $\omega_i$  переміститься до пункту  $\omega_j$ . Величина  $p_{ij}(t)$ , яка в загальному випадку залежить від погоди, регіону, де відбувається процес, і від багатьох інших факторів, набуватиме різних значень для різних часових періодів. У цьому випадку, відповідна математична модель настільки ускладнюється, що практично реалізувати її дуже складно.

Тому, значення  $p_{ij}(t)$  вважатимемо фіксованими й незалежними від часу  $t$ :  $p_{ij}(t) = p_{ij} = const$ . Окрім того, має виконуватися умова  $\sum_{i=1}^N p_{ij} \leq 1$ , яка означає, що в кожному пункті  $\omega_i$  забруднювач атмосфери може бути розсіяний у навколишньому середовищі або перенесений до пункту  $\omega_j$ .

Якщо частинка речовини вийде за межі досліджуваного регіону, назад туди вона вже не повернеться,  $\omega_1$  — певний пункт, потрапивши в який частинка назад до регіону не повертається.

Тоді для досліджуваного регіону із  $N$  пунктами однокрокова матриця ймовірностей переходу набирає такого вигляду:

$$\omega_1 \quad \omega_2 \quad \omega_3 \quad \dots \quad \omega_N$$

$$\pi = \begin{matrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \\ \dots \\ \omega_N \end{matrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & \dots & p_{2N} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & \dots & p_{3N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ p_{N1} & p_{N2} & p_{N3} & \dots & p_{NN} \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Отже, матриця  $\pi$  описує поглинаючий ланцюг Маркова з  $N$  станами (пунктами), де стан  $\omega_1$  буде поглинаючим: частинки забруднювача атмосфери, потрапивши до нього, назад у систему не повертаються, а решта станів можуть бути джерелами забруднення від інших джерел.

Якщо, наприклад, стан  $\omega_i$  є джерелом забруднення, то за певний період часу (через певну кількість кроків) звідти викидається в атмосферу  $f_i \geq 0$  одиниць забруднювача, а якщо у стані  $\omega_i$  джерела забруднення немає, то  $f_i = 0$ .

Потрібно вибрати такі значення  $f_i$ , тобто знайти такий вектор

$$\vec{f} = (f_1, f_2, f_3, \dots, f_N),$$

щоб через певний час усі компоненти вектора:

$$\vec{u} = (u_1(t), u_2(t), u_3(t), \dots, u_N(t))$$

не перевищували допустимих значень компонентів вектора

$$\vec{q} = (q_1, q_2, q_3, \dots, q_N),$$

тобто  $u_i(t) \leq q_i$ .

Початкові значення забруднення у розглядуваних станах задамо вектором

$$\vec{m} = (m_1, m_2, m_3, \dots, m_N).$$

Екологічна ситуація досліджуваного регіону в момент часу  $t$  описується векторно-матричним рівнянням

$$\vec{u}(t) = \vec{m}Q^n + \sum_{t=0}^n \vec{f}Q^k. (2)$$

З того, що матриця  $Q$  відповідає поглинаючому ланцюгу Маркова, випливає

$$\lim_{t \rightarrow \infty} Q^t = 0,$$

причому

$$\sum_{k=0}^n \vec{f}Q^k = \vec{f} \sum_{k=0}^n Q^k \rightarrow \vec{f}N.$$

Але оскільки  $\vec{m}Q^n \rightarrow 0$ , а  $\vec{f} \sum_{k=0}^n Q^k \rightarrow \vec{f}N$ , то з достатньою для практики точністю за великих значень  $t$  з урахуванням співвідношення

$$\vec{u}(t) = \vec{f}N \quad (3)$$

отже, допустимі значення рівнів забрудненості прийнятні за умови

$$\vec{f}N \leq \vec{q}. \quad (4)$$

Розглядаючи ЛСЕС, розташовану в межах Черкаської області, в рамках просторової постановки задачі, розглянемо 4 агреговані зони:

S1: промислово-транспортний центр;

S2: аграрно-промисловий вузол;

S3: Сільська зона

S4: “вихід за межі регіону” (поглинаючий стан).

На основі даних, представлених у дослідженні [145] середній рівень  $\text{NO}_2$   $\sim 0.25 - 0.30 \cdot 10^{-4} \text{ mol/m}^2$

Значення показника забруднення  $\text{NO}_2$ , для Черкаської області [146], отримане на основі супутникових знімків, становить: промислово-транспортний центр – 0,32; аграрно-промисловий вузол – 0,27; сільські райони – 0,22.

$$X(0) = \begin{pmatrix} 0,32 \\ 0,27 \\ 0,22 \\ 0 \end{pmatrix} \cdot 10^{-4}$$

Переведемо ці супутникові значення до земних концентрацій  $\text{мкг}/\text{м}^3$ , на основі спрощеної формули:

$$C_{\text{ground}} \approx \frac{NO_2^{\text{column}}}{H} \cdot k$$

де

$H \approx 1000$  м – висота тропосфери;

$k \approx 1,9 \cdot 10^6$  – коефіцієнт перерахунку.

Отримаємо, що для

- промислово-транспортний центр –  $C_1 \approx 60,8 \text{ мкг}/\text{м}^3$ ;
- аграрно-промисловий вузол –  $C_2 \approx 51,3 \text{ мкг}/\text{м}^3$ ;
- Сільська зона –  $C_3 \approx 41,8 \text{ мкг}/\text{м}^3$ .

Вектор концентрацій викидів має вигляд:

$$X(0) = \begin{pmatrix} 61 \\ 51 \\ 42 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Отже, у промислово-транспортному центрі спостерігаються найбільше забруднення, у аграрно-промисловому вузла – середній рівень, а у сільській зоні – фоновий рівень.

Матриця переносу забруднення, з урахуванням переважаючих вітрів, транспортних потоків та рельєфу, має наступний вид:

$$Q = \begin{pmatrix} 0,5 & 0,3 & 0,1 & 0,1 \\ 0,2 & 0,5 & 0,2 & 0,1 \\ 0,1 & 0,2 & 0,5 & 0,2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Модель динаміки описується рівнянням:

$$X(t + 1) = Q \cdot X(t)$$

Числові обчислення на першому кроці.

- Промислово-транспортний центр:  $0.5 \cdot 61 + 0.3 \cdot 51 + 0.1 \cdot 42 = 30.5 + 15.3 + 4.2 = 50$
- аграрно-промисловий вузол:  $12.2 + 25.5 + 8.4 = 46.1$
- сільська зона:  $6.1 + 10.2 + 21 = 37.3$

Вихід:  $6.1 + 5.1 + 8.4 = 19.6$

$$X(1) = \begin{pmatrix} 50 \\ 46,1 \\ 37,3 \\ 19,6 \end{pmatrix}$$

Числові обчислення на другому кроці.

$$X(2) = \begin{pmatrix} 41,2 \\ 42,5 \\ 36,5 \\ 34,8 \end{pmatrix}$$

Аналіз динаміки забруднюючих речовин наведений у таблиці 4..14

Таблиця 4.14 Аналіз зміни концентрації забруднюючої речовини

Момент часу,	Досліджувані ЛСЕС			
	промислово-транспортний центр	аграрно-промисловий вузол	сільська зона	вихід за межі
t=0	61	51	42	0
t=1	50	46,1	37,3	19,6
t=2	41,2	42,5	36,5	34,8
t=3	34,6	39,6	35,4	47

Загальна тенденція демонструє зменшення концентрації в промислово-транспортному центрі з  $61 \text{ мкг/м}^3$  до  $34.6 \text{ мкг/м}^3$ , загалом на  $-43\%$ , а у аграрно-промисловому вузлі з  $51 \text{ мкг/м}^3$  до  $39.6 \text{ мкг/м}^3$  – на  $22\%$ .

Отриманий результат цілком відповідає реальним спостереженням зі супутника Sentinel-5P. Концентрація  $\text{NO}_2$  швидко зменшується після зниження викидів особливо у великих містах. На рис 4.18 наведено графічне представлення результатів моделювання.

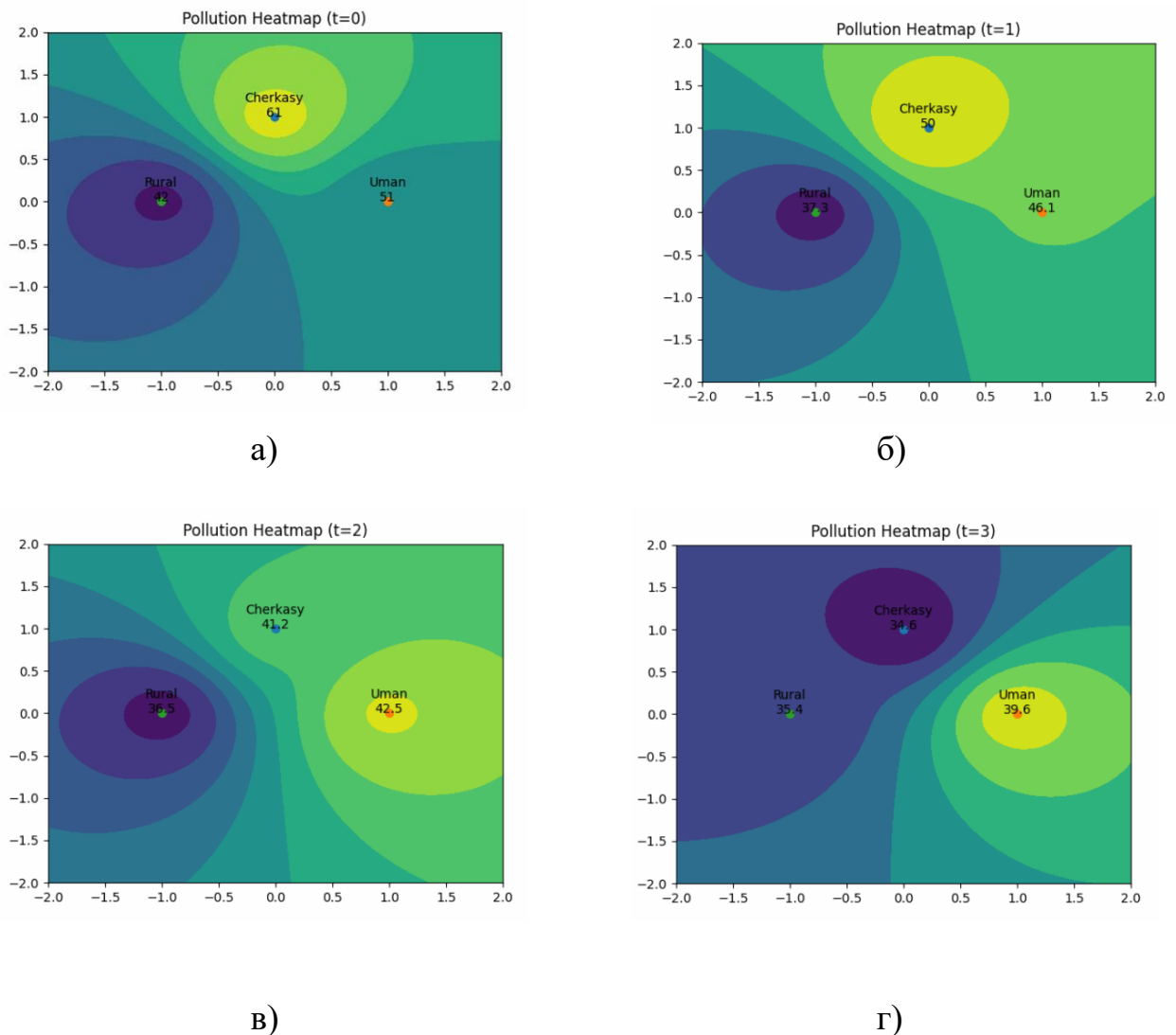


Рисунок 4.18 – Стани системи у моменти часу а)  $t=0$ , б)  $t=1$ , в)  $t=2$ , г)  $t=3$

Поле концентрації формується як результат суперпозиції впливів кількох джерел забруднення. Домінуючий вплив промислового центру зумовлює асиметрію просторового розподілу, тоді як менш інтенсивні джерела створюють

локальні варіації. Водночас використання гладкої інтерполяції призводить до появи нефізичних локальних мінімумів, що потребує застосування більш стійких методів апроксимації.

Просторове перенення призводить до вторинного забруднення для сільської зони, де спостерігається поступове зменшення з 42, до 37.3, невзовзі до 36.5, та у кінці до 35.4. Відмітимо, що немає різкого зростання але є підтримка рівня за рахунок переносу – це типовий ефект, який добре видно у супутникових картах, коли забруднення “розмазується” по території.

Накопичення у поглинаючому стані завдяки турбулентність та вітровий переносу призводить до розсіювання забруднування та виносу за межі області, поступове збільшення від 0 до 19.6, після цього до 34.8, і в кінці до 47.

Темпи швидкості очищення, для промислово-транспортного центру, мають експоненційний характер:

$$\lambda \approx \frac{61 - 34,6}{3} \approx 8,8 \text{ мкг} / \text{м}^3 / \text{крок}$$

Період напівочищення становить 3-4 кроки (рис. 4.19).

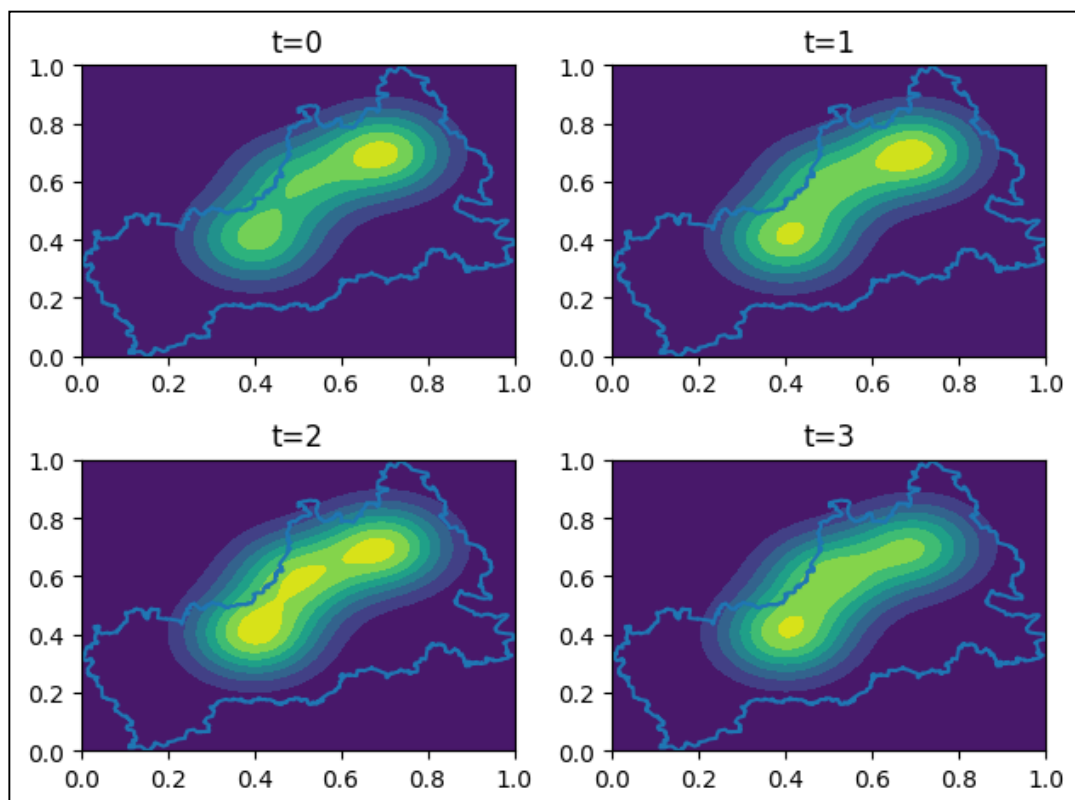


Рисунок 4.19 Динаміка зміни забруднення

На рис. 4.19 наведено динаміку зміни забруднення, а саме:

- $t = 0$  (початковий стан) – чітко виражені 3 осередки: промислово-транспортний центр – максимум, аграрно-промисловий вузол – середній рівень, сільська зона – фон;
- $t = 1$  – починається розтікання забруднення, зменшення піку в промислово-транспортному центрі, формується “шлейф”;
- $t = 2$  – вирівнювання поля, різниця між зонами зменшується, сільська зона “підтягується” через перенос;
- $t = 3$  – загальне затухання, поле стає більш однорідним, максимум вже не різко виражений.

На рис. 4.19 спостерігаються:

- ефект дифузії – згладжування просторових градієнтів;
- адвекція (перенос) – забруднення переходить у сільські райони
- дисипація – загальне зменшення концентрації.

На рис. 4.19 застосована кольорова шкала, яка відображає просторовий розподіл концентрації забруднюючої речовини, де перехід від темно-фіолетових до світло-жовтих відтінків відповідає зростанню значення функції концентрації  $C(x, y, t)$ . Максимальні значення локалізуються в областях джерел емісії, тоді як мінімальні – у периферійних зонах.

Темно-фіолетовий / фіолетовий колір позначає найнижчі значення концентрації, практично “чисті” зони, відповідає фоновому рівню або областям поза впливом джерел. Синьо-фіолетовий – низький рівень забруднення, початковий вплив переносу (дифузії), периферійні області. Зелений – середній рівень концентрації, зони активного розповсюдження забруднення, формування “шлейфу”. Жовтий – підвищена концентрація, області, близькі до джерел, зони накопичення. Світло-жовтий / жовто-білий – максимальні значення.

Центри емісії зображені на карті – промислово-транспортний центр (основний пік) та аграрно-промисловий вузол (другорядний пік). Реалізована модель описується рівнянням:

$$C(x, y, t) = \sum_{i=1}^N x_i(t) \exp\left(-\frac{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}{\sigma^2}\right)$$

де  $x_i(t)$  – значення з марківської моделі, що описана вище;  $(x_i, y_i)$  – координати джерел;  $\sigma$  – параметр розсіювання.

Код програми, на мові програмування Python, який дозволяє будувати рисунок 4.19 наведений у Додатку Б. Код програми – читає полігон області, нормалізує координати, створює регулярну сітку, моделює поле концентрації, будує 4 карти (t=0-3).

Отже, як показало проведене дослідження, використання супутникових даних у поєднанні з марковською моделлю дозволяє адекватно відтворювати динаміку атмосферного забруднення, враховувати просторовий перенос домішок, оцінювати швидкість очищення регіону.

Отримані результати порівняні з реальними супутниковими спостереженнями, що підтвердило придатність запропонованої інформаційної технології для задач екологічного моніторингу.

#### **Висновки до розділу 4**

1. Представлено приклади реалізації запропонованої інформаційної технології моделювання сталого розвитку ЛСЕС. А саме, розглянуто задачі:

- моделювання розвитку ЛСЕС, виходячи з того, що досліджувані процеси є нелінійними, характеризуються нестационарністю, враховано що соціально-економічні системи розвиваються в умовах невизначеності;
- формування галузевої структури ЛСЕС, використовуючи ланцюги Маркова, що дозволило розробити обґрунтовані сценарії сталого розвитку територіальної громади за різної виробничої спеціалізації, диверсифікації виробництва та екологічного навантаження, дані про фактори виробництва та екологічні чинники можуть бути змінені, що вплине на ймовірності переходів через індикатори, і, матриця переходів автоматично змінюватиметься, що дозволить унаочнити процес моделювання складових ЛСЕС;

- оптимального керування наявною СМО за врахування специфіки міжгалузевої взаємодії на локальному та регіональному рівнях, оцінювання якості управління, попередньо з'ясувавши, чи доступні для досліджуваної системи певні впливи, для чого у розробленій інформаційній технології застосовані марковські моделі та моделі систем масового обслуговування;
- аналізу та моделювання спроможності територіальних громад для розв'язання якої в рамках розробленої інформаційної технології запропоновано використання ймовірнісно-статистичних моделей у формі мереж Байєса, що дозволило автоматизувати процес дослідження причинно-наслідкових зв'язків змінних, що впливають на наповнення бюджету громади чи ЛСЕС, утвореної з декількох громад;
- аналізу та моделювання екологічної складової сталого розвитку на прикладі задачі моделювання забруднення різних територій  $\text{NO}_2$  - шкідливою речовиною, забрудненість якою стала зростати внаслідок бойових дій, порівняння отриманих результатів моделювання та даних супутникових знімків показало їх співпадіння.

2. Запропоновані моделі, методи, алгоритми, що становлять основу інформаційної технології моделювання сталого розвитку ЛСЕС, призначені для розв'язання широкого кола задач в управлінні регіональним розвитком, зокрема, можуть бути застосовані у системах підтримки прийняття рішень органів місцевого самоврядування та державного управління для обґрунтування програм та планів розвитку інвестиційної діяльності громад, районів та областей, при формуванні виробничих кластерів, об'єднаних громад, дозволять ефективніше використовувати наявні ресурси територіальних громад та їх об'єднань.

3. Встановлено, що розроблена інформаційна технологія може використовуватись окремо або в складі існуючих інформаційно-аналітичних систем, систем підтримки прийняття рішень органів державного управління та місцевого самоврядування, .

## ВИСНОВКИ

У дисертаційному дослідженні розв'язана наукова задача з розроблення моделей, методів, алгоритмів, які склали основу інформаційної технології моделювання сталого розвитку локальних соціально-економічних систем.

При цьому, на основі отриманих результатів зроблено наступні висновки.

1. Досліджено особливості локальних соціально-економічних систем в контексті досягнення цілей сталого розвитку та інтеграції до європейського співтовариства.

2. Виконано системний аналіз сучасних підходів до аналізу та моделювання сталого розвитку соціально-економічних систем в умовах структурно-динамічних зрушень, нестаціонарності та невизначеності, що дозволило сформулювати систему вимог до розроблюваної інформаційної технології, визначити обмеження та шляхи використання в управлінні розвитком ЛСЕС, громад та регіонів.

3. Розроблено єдину формалізовану методологію побудови математичних моделей для аналізу та прогнозування розвитку ЛСЕС в умовах невизначеності, для досягнення цілей сталого розвитку, за використання переважно наявних власних ресурсів..

4. Розроблено інформаційну технологію збору, оброблення, підготовлення до аналізу та зберігання різнотипних даних, отриманих з різних джерел, призначену для використання у процесі моделювання складу, взаємодії складових та динаміки ЛСЕС у системі підтримки прийняття управлінських рішень в управлінні регіональним та місцевим розвитком..

5. Удосконалено методи моделювання соціально-еколого-економічних процесів різної природи на основі поєднання математичних моделей різних типів, зокрема, регресійних та ймовірно-статистичних, що дозволило зменшити похибку прогнозування на 5–10 %.

6. Розроблено методикку визначення кращої структури ЛСЕС та моделювання динаміки процесів їх розвитку в умовах невизначеності за допомогою ймовірно-статистичних підходів, яка забезпечує коректне

прогнозування вказаних процесів для цілей підтримки прийняття управлінських рішень.

7. Виконано апробацію розробленої інформаційної технології моделювання сталого розвитку ЛСЕС, доведено їх здатність адекватно описувати динамічні, структурні зрушення, причинно-наслідкові зв'язки між чинниками, що впливають на їх розвиток та забезпечувати високу точність прогнозів.

8. Проведено оцінювання побудованих моделей, сформовано висновки щодо можливості їх використання для оцінювання та прогнозування сталого розвитку ЛСЕС та проектування їх структури для оптимального використання наявних ресурсів.

9. Створено та реалізовано інформаційну технологію моделювання сталого розвитку ЛСЕС, придатну для використання у інформаційно-аналітичних системах та системах підтримки прийняття рішень в управлінні місцевим та регіональним розвитком.

Отже, отримано нову інформаційну технологію моделювання розвитку ЛСЕС, яка забезпечує повний цикл оброблення даних: від збору та підготовки даних до їх використання для побудови моделей, що описують динаміку досліджуваних процесів та дозволяють спроектувати оптимальний територіальний склад ЛСЕС та її галузеву структуру та представлення результатів. Апробацію розробленої інформаційної технології виконано на матеріалах територіальних громад однієї з областей. .

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Пашко А., Дякон Д. Застосування ланцюгів Маркова для розроблення сценаріїв розвитку локальних соціально-економічних систем. *Електронне фахове наукове видання «Кібербезпека: освіта, наука, техніка»*, 2025. Том. 3. №31, С.559–569. <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2025.31.1039>
2. Шолохов О. В., Дякон Д. В. Застосування марковської моделі у інформаційній технології формування локальної соціально-економічної системи. *Екологічна безпека та природокористування*, 2025. Вип. 4. № 56. С. 186-200. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.4.186-200>
3. Bidiuk P., Prosyankina-Zharova T., Diakon V., Diakon D. The improvement of the intelligent decision support system for forecasting non-linear non-stationary processes. *Technology Audit and Production Reserves*, 2023. Vol. 4. № 2(72). P. 37–46. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.286516>
4. Дякон Д. В., Просянкіна-Жарова Т. І. Проблеми застосування інформаційних технологій у міжвідомчій співпраці в сфері реагування на різні загрози й надзвичайні ситуації. Інформаційно-комунікаційні технології та сталий розвиток // Колективна монографія за матеріалами XXI Міжнародної науково-практичної конференції (Київ, 14-16 листопада 2022 р.) / За заг. ред. С.О. Довгого. – К.: ТОВ «Видавництво «Юстон», 2022. С. 107-110. [https://itgip.org/wp-content/uploads/2022/12/2022-12-06\\_UDK\\_book\\_Monografia\\_48x210.pdf](https://itgip.org/wp-content/uploads/2022/12/2022-12-06_UDK_book_Monografia_48x210.pdf)
5. Терентьев О. М., Просянкіна-Жарова Т.І., Дякон Д. В. Застосування засобів опрацювання неструктурованих даних у задачах прогнозного моделювання Сучасні інформаційні технології управління екологічною безпекою, природокористуванням, заходами в надзвичайних ситуаціях: виклики 2021 року // Колективна монографія за матеріалами XX Міжнародної науково-практичної конференції (Київ, 04-08 жовтня 2021 р.) / За заг. ред. С.О. Довгого. – К.: ТОВ «Видавництво «Юстон», 2021. С. 161-168. [https://itgip.org/wp-content/uploads/2021/10/1\\_zbirka\\_2021.pdf](https://itgip.org/wp-content/uploads/2021/10/1_zbirka_2021.pdf)

6. Державна стратегія регіонального розвитку на 2021-2027 роки, затверджена постановою Кабінету Міністрів України від 5 серпня 2020 р. № 695 (в редакції постанови Кабінету Міністрів України від 13 серпня 2024 р. № 940). URL: [https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/940-2024-p?find=1&text=ПОЛЮСИ#w1\\_1](https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/940-2024-p?find=1&text=ПОЛЮСИ#w1_1)
7. United Nations Department of Economic and Social Affairs. Compendium of innovative practices in public governance and administration for sustainable development. UN-iLibrary. <https://doi.org/10.18356/4bbb6eba-en>
8. Про Цілі сталого розвитку України на період до 2030 року. Указ Президента України від 30.09.2019 р. № 722/2019. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/722/2019#Text>
9. Офіційний сайт Міністерства цифрової трансформації України, URL: <https://thedigital.gov.ua/news/technologies/tsifrovizatsiya-regioniv-i-gromad-pershii-vimiryuvannya-2025-roku>
10. *Цифрова екосистема для підзвітнього управління відновленням DREAM* <https://dream.gov.ua/ua>.
11. Моніторингові звіти Програми SIGMA. Public Administration in Ukraine. [https://www.sigmaweb.org/content/dam/sigma/en/publications/reports/2024/02/public-administration-in-ukraine\\_27a46a58/078d08d4-en.pdf](https://www.sigmaweb.org/content/dam/sigma/en/publications/reports/2024/02/public-administration-in-ukraine_27a46a58/078d08d4-en.pdf)
12. Лелеченко А. П. Теоретичні засади регіональної політики сталого розвитку. *Державне управління: удосконалення та розвиток*. 2015. №10. С. 1-6 URL: [http://www.dy.nayka.com.ua/pdf/10\\_2015/17.pdf](http://www.dy.nayka.com.ua/pdf/10_2015/17.pdf)
13. Лендшел М. О. Правові можливості для формування допоміжних рівнів та органів самоорганізації у країнах Європи: досвід для України. Аналітична записка. URL: <https://niss.gov.ua/doslidzhennya/gromadyanske-suspilstvo/pravovi-mozhливosti-dlya-formuvannya-dopomizhnikh-rivniv-ta>
14. Конгрес місцевих та регіональних влад при Президентіві України. URL: <https://www.congress.gov.ua>
15. Данилишин Б. Основа управлінської взаємодії для просторового розвитку територіальних громад у контексті повоєнного відновлення України.

- Modeling the development of the economic systems, 2024. №4, С. 290–295.  
<https://doi.org/10.31891/mdes/2024-14-38>
16. Державна регіональна політика: ключові угоди, концепції та Закони. URL:  
[https://decentralization.ua/news/18412?fbclid=IwY2xjawEjBfxleHRuA2FlbQIxMAABHwBQuR7xGY6iksxBUyxQJz-r9xqruFy1T\\_ук6-YsTr5wK6p5Ttyq6o7gkg\\_aem\\_T\\_Rg2cm-zZTXat3tLF3KUQ](https://decentralization.ua/news/18412?fbclid=IwY2xjawEjBfxleHRuA2FlbQIxMAABHwBQuR7xGY6iksxBUyxQJz-r9xqruFy1T_ук6-YsTr5wK6p5Ttyq6o7gkg_aem_T_Rg2cm-zZTXat3tLF3KUQ)
17. Про Національну програму інформатизації. Закон України від 01.12.2022 № 2807-IX. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2807-20#Тех>
18. Триснюк В. М., Триснюк Т. В., Курило А. В, Голован Ю. М., Пашенко Є. Ю. Системний аналіз інформаційно-аналітичного забезпечення органів адміністративного управління. *Сучасні інформаційні системи*. 2022. Т. 6, № 2 С. 37-41. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2022.2.07>
19. Офіційний сайт Офісу Ради Європи в Україні. URL:  
<https://www.coe.int/uk/web/kyiv/strengthening-multilevel-governance-and-local-democracy-to-support-ukraine-s-recovery>
20. The Role of the Regions in EU Governance/ Ed. Panara C., De Beckerhttps A. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2011, 346 p/ [://doi.org/10.1007/978-3-642-11903-3](https://doi.org/10.1007/978-3-642-11903-3)
21. Резнікова О. О., Войтовський К. Є. Лепіхов А. В. Організація системи забезпечення національної стійкості на регіональному і місцевому рівнях. Київ : НІСД, 2021. с.140 . URL: [https://niss.gov.ua/sites/default/files/2021-09/analytrep\\_08\\_2021.pdf](https://niss.gov.ua/sites/default/files/2021-09/analytrep_08_2021.pdf)
22. Васильченко Г., Парасюк І., Єременко Н. Планування розвитку територіальних громад. Навчальний посібник для посадових осіб місцевого самоврядування Асоціація міст України К., ТОВ «ПІДПРИЄМСТВО «ВІ ЕН ЕЙ», 2015. 256 с.. URL: <https://www.auc.org.ua/sites/default/files/library/1plangrweb.pdf>
23. Бідюк, П. І., & Загірська, І. О. Методика побудови сценарного аналізу із використанням байєсівських методів. *Електротехнічні та комп'ютерні*

- систему*, 2019. (8(84), 137-142. Retrieved from URL <https://eltecs.op.edu.ua/index.php/journal/article/view/1259>
24. Peignot J., Peneranda A., Amabile S., Marcel G. The Use of Information Systems on the Decision-making and Performance Management of Local Government. *International Business Research*; 2013. Vol. 6, No 2. P. 92-100. <https://doi.org/10.5539/ibr.v6n2p92>.
25. De Almeida P. G. R., Fernandes L M., de Oliveira Ribas M., Gomes Pessoa D., Aquino M. G., Denner C. Trajectories and challenges for data governance implementation in the public sector: a systematic review. *Encontro da ANPAD*. 2022. P. 1-28. URL: <https://anpad.com.br/uploads/articles/120/approved/e92e1b476bb5262d793fd40931e0ed53.pdf>
26. Xanthopoulou P., Antoniadis I., Avlogiaris G. Unveiling the drivers of digital governance adoption in public administration. Problems and perspectives in management. 2023. №21(4). 454-467. [http://dx.doi.org/10.21511/ppm.21\(4\).2023.35](http://dx.doi.org/10.21511/ppm.21(4).2023.35)
27. Trofymchuk O., Tymoshchuk O., Kuznietsova N., Huskova V., Bidiuk P., Polozhaenko S. Intellectual Decision Support System for Modeling and Forecasting Nonlinear Nonstationary Financial Processes and Risks Estimation *International Conference on System Analysis & Intelligent Computing (SAIC)*. Proceedings of the IEEE 3rd International Conference on System Analysis & Intelligent Computing (Kyiv, Oct. 4-7 2022). Kyiv: Institute for Applied System Analysis, National Technical University of Ukraine “KPI”, С. 1-5. <https://doi.org/10.1109/SAIC57818.2022>
28. Dewulf A., Biesbroek R. Nine lives of uncertainty in decision-making: strategies for dealing with uncertainty in environmental governance. *Policy and Society*. 2018. Vol. 37. Issue 4, P. 441–458. <https://doi.org/10.1080/14494035.2018.1504484>
29. Бідюк П. І., Коршевніук Л. О., Терентьев О. М. Підтримка розв’язання слабкоструктурованих задач в органах державної влади. *Системний анализ и информационные технологии (САИТ-2012)*: матеріали 14 міжнар.

- наук.-техн. конф. (Київ, 24 квіт. 2012 р.). Київ : ННК “ІПСА” НТУУ “КПІ”. 2012. С. 169–170.
30. Нескородєва Т. В., Арабаджи Є. В. Моделювання регулювання безробіття: державний та регіональний аспекти. *Економіка і організація управління*. 2017. №3(27). С. 60-71.
31. Корнієвський С. Синергетичне поєднання різних вимірів інтегрованості у формуванні політики регіонального розвитку в Україні. *Аспекти публічного управління*. 2021. Том 9. № 1. С. 81-90.  
<https://doi.org/10.15421/152108>
32. Досвід децентралізації у країнах Європи : зб. док. Пер. з іноз. мов / Заг. ред. В. Б. Гройсмана. – К. : Інститут законодавства Верховної Ради України, 2015. 766 с URL: <http://romny-bibl.edukit.sumy.ua/Files/downloadcenter/decentralization.pdf>
33. Довженко В.А, Русак О. П., Золотницька Ю.В. Інформаційно-аналітичне забезпечення прогнозування і планування соціально-економічного розвитку територій. *Інвестиції: практика та досвід*. 2021. № 6. С. 79- 84.  
<https://doi.org/10.32702/2306-6814.2021.6.79>
34. Бобровська О. Ю., Бондаренко Д. М. Економічна система регіонів як квазіоб'єкт публічного і галузевого управління. *Інвестиції: практика та досвід*. 2021. № 15. С. 77–85. <https://doi.org/10.32702/2306-6814.2021.15.77>
35. Згуровський М. З., Панкратова Н. Д. Основи системного аналізу. Київ: Видавнича група ВНУ, 2007. 544 с. URL: [https://eprints.cdu.edu.ua/4183/1/zgurovskii\\_mz\\_panu.pdf](https://eprints.cdu.edu.ua/4183/1/zgurovskii_mz_panu.pdf)
36. Шевченко О. В., Кузьминчук Н. В. Методичні підходи до типізації територій в Україні для відновлення та управління регіональною економікою. *Проблеми економіки*. 2022. № 3 (53), С. 105-111.  
<https://doi.org/10.32983/2222-0712-2022-3-104-111>
37. Клочан В., Петрів І. Цифровізація публічного управління в територіальних громадах: інструменти, виклики та перспективи трансформації. Актуальні

проблеми економіки. 2024. №11, Т. 2 (281/2) С. 160-169. DOI: 10.32752/1993-6788-2024-2-281-160-169

38. Про затвердження Статистичної класифікації територіальних одиниць України (NUTS-UA). Наказ Державної служби статистики України від 18 липня 2024 року № 189. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0189832-24#Text>
39. Офіційний сайт Міністерства фінансів України. Моніторинг проєктів міжнародної технічної допомоги. URL: [https://mof.gov.ua/uk/monitoring\\_of\\_international\\_technical\\_assistance\\_projects-422](https://mof.gov.ua/uk/monitoring_of_international_technical_assistance_projects-422)
40. Організація об'єднаних націй. Цілі сталого розвитку. URL: - <https://ukraine.un.org/uk/sdgs>
41. Sustainable Development. United Nations. URL: <https://sdgs.un.org/goals>
42. Представництво України при Європейському Союзі. Європейський зелений курс (European Green Deal). URL: <https://ukraine-eu.mfa.gov.ua/posolstvo/galuzeve-spivrobitnictvo/klimat-yevropejska-zelena-ugoda>
43. Environmental Performance Index (EPI). URL: <https://epi.yale.edu>
44. EU Regional Competitiveness. URL: [https://ec.europa.eu/regional\\_policy/information-sources/maps/regional-competitiveness\\_en](https://ec.europa.eu/regional_policy/information-sources/maps/regional-competitiveness_en)
45. Тарасюк, О. В. Теоретичні засади формування концепції сталого розвитку та її практична реалізація на сучасному етапі розвитку суспільства. *Економіка, управління та адміністрування*, (2025). №1(111), С. 51–63. [https://doi.org/10.26642/ema-2025-1\(111\)-51-63](https://doi.org/10.26642/ema-2025-1(111)-51-63)
46. Elkington J. Triple Bottom Line (TBL). URL: <https://www.johnelkington.com/archive/TBL-elkington-chapter.pdf>
47. Rabbi, M. F. A Dynamic Systems Approach to Integrated Sustainability: Synthesizing Theory and Modeling Through the Synergistic Resilience

Framework. *Sustainability* 2025, Vol.17, Issue 11. 4878.  
<https://doi.org/10.3390/su17114878>

48. Терентьев О. М. Модели, методы та інформаційні технології прогнозування нелінійних нестационарних процесів в умовах невизначеності дис. ... д-ра тех. наук: 05.13.06/ Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України. 2021. 469 с.
49. Метод аналізу ієрархій (MAI). URL:\https://dss.knsa.chdtu.edu.ua/ahp-help
50. Методичні рекомендації у сфері місцевого економічного розвитку «Порядок розроблення стратегії розвитку територіальної громади». URL: [https://auc.org.ua/sites/default/files/library/metodyka\\_mer\\_new.pdf](https://auc.org.ua/sites/default/files/library/metodyka_mer_new.pdf)
51. Ivanenko V.I., Kuts O.V., Pasichnichenko, I.O. Parameterization of the Lottery Model of Nonparametric Decision-Making Situation. *Cybernetic and System Anaysys* 2014. № 50. P. 234–238. <https://doi.org/10.1007/s10559-014-9610-z>
52. Deissenberg C., van Der Hoog S., Dawid H. EURACE: A Massively Parallel Agent-Based Model of the European Economy, *Applied Mathematics and Computation*. 2008. Vol. 204, Issue 2, P. 541-552. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2008.05.116>
53. Возна Н. Я. Теоретичні засади методу оцінювання ентропії структуризованих поліфункціональних даних. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. Серія: Комп'ютерні системи та мережі : збірник наукових праць. 2016. №857. С.17-28. URL: <https://ena.lpnu.ua/handle/ntb/39218>
54. United Nations Department of Economic and Social Affairs. Compendium of innovative practices in public governance and administration for sustainable development. UN-iLibrary. <https://doi.org/10.18356/4bbb6eba-en>
55. Цифрова екосистема для підзвітнього управління відновленням DREAM <https://dream.gov.ua/ua>.
56. Jia T., Wang C., Tian Z., Wang B., Tian F. Design of Digital and Intelligent Financial Decision Support System Based on Artificial Intelligence.

- Computational Intelligence and Neuroscience, 2022, ID 962937, P. 1–7.  
<https://doi.org/10.1155/2022/1962937>
57. Wang, J., Yu, C., Zhang, J. Constructing the regional intelligent economic decision support system based on fuzzy C-mean clustering algorithm. *Soft Computing*, 2019. Vol. 24 (11), 7989–7997. <https://doi.org/10.1007/s00500-019-04091-3>
58. Кунанець Н. Е, Федорка П. П., Кут В. І. Формування рекомендаційної системи для «Розумного регіону» з метою обрання інформаційних технологій та їх реалізацій при створенні застосунків. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології*, 2023. №9. С. 33-40. <https://doi.org/10.20998/2079-0023.2023.01.05>
59. Коломієць Є. В., Каракай М. С., Касьянюк С. В., Структура та зміст інформаційно-аналітичної системи державного управління. *Державне управління. Удосконалення та розвиток*. 2020. №1. [http://www.dy.nayka.com.ua/pdf/1\\_2020/37.pdf](http://www.dy.nayka.com.ua/pdf/1_2020/37.pdf)
60. Jung D., Tran Tuan, V., Quoc Tran D., Park M., Park S. Conceptual Framework of an Intelligent Decision Support System for Smart City Disaster Management. *Applied Sciences*, 2020. Vol. 10. Issue 2, 666. <https://doi.org/10.3390/app10020666>
61. Проскура В. Ф. Інтегрований підхід до створення регіональної інформаційної системи ресурсного забезпечення. *Науковий вісник Мукачівського державного університету, Серія Економіка*, 2016. Вип. 2(6), С. 143-147. URL: <https://economics-msu.com.ua/web/uploads/pdf/Scientific%20Bulletin%20of%20MSU.%20Series>
62. Power D. J. What is a DSS? *The On-Line Executive Journal for Data-Intensive Decision Support*. 1997. Vol. 1., №3. P. 46–54. URL: <https://dssresources.com/subscriber/password/papers/whatisadss.pdf>

- 63.Бідюк П. І., Демківський Є. О. Проектування систем підтримки прийняття рішень : навч. посіб. Київ : КНУТД, 2005. 156 с.
- 64.Гожий О. П. Підхід до оцінювання невизначеностей в задачах прогнозування. *Електротехнічні та комп'ютерні системи*. 2015. № 19(95). С. 243–247. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/etks\\_2015\\_19\\_54](http://nbuv.gov.ua/UJRN/etks_2015_19_54)
- 65.Gembarski P. C., Plappert S., Lachmayer R. Making design decisions under uncertainties: probabilistic reasoning and robust product design, *Journal of Intelligent Information Systems*. 2021. Vol. 57, P. 563–581, <https://doi.org/10.1007/s10844-021-00665-6>.
- 66.Sichko T., Neskorodieva T., Rymar P., Methods and models of decision-making in uncertain conditions. *Computer systems and information technologies*, 2020. Vol. 3, P. 47-51. <https://doi.org/10.31891/CSIT-2021-5-6>
- 67.Moffat, I. U., Akpan, E. A. Selection of Heteroscedastic Models: A Time Series Forecasting Approach. *Applied Mathematics*, 2019. 10 (5), 333–348. <https://doi.org/10.4236/am.2019.105024>
- 68.Gibbs B.P. Advanced Kalman Filtering, Least Squares and Modeling. Hoboken: John Wiley & Sons, 2011. 632 p.
- 69.A guide on regression error metrics (MSE, RMSE, MAE, MAPE, sMAPE, MPE) with Python code <https://sefidian.com/2022/08/18/a-guide-on-regression-error-metrics-with-python-code/>
70. Рогоза В., Іщенко А. Метод прогнозу короткотривалих часових рядів з використанням функцій чутливості. *Інфокомунікаційні та комп'ютерні технології*. 2021. Том 2. №02. С. 182-194. <https://doi.org/10.36994/2788-5518-2021-02-02-13>
71. Samin H., Bencomo N., Sawyer P. Decision-making under uncertainty: be aware of your priorities. *Software and Systems Modeling* .2022. Vol. 21. P. 2213–2242. <https://doi.org/10.1007/s10270-021-00956-0>
- 72.Микіч Х. І., Буров Є. В. Дослідження причин виникнення невизначеностей у системах із ситуаційною обізнаністю та аналіз методів їх опрацювання.

- Східно-Європейський журнал передових технологій. 2016. № 1/4 (79). С. 19-27. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.60828>
73. Gozhyj A.P., Kalinina I.A., Bidyuk P. I. Systematic use of nonlinear data filtering methods in forecasting tasks. *Applied Aspects of Information Technology*. 2023; Vol.6. No.4: P/ 345–361. <https://doi.org/10.15276/aait.06.2023.23>
74. Методи машинного навчання у задачах системного аналізу і прийняття рішень : монографія / В. Є. Стрілець, С. І. Шматков, М. Л. Угрюмов та ін. Харків : Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, 2020. 160 с. URL: [https://old.karazin.ua/images/redactor/news/2020-12-28/Shmatkov\\_.pdf](https://old.karazin.ua/images/redactor/news/2020-12-28/Shmatkov_.pdf)
75. Machine Learning. URL: <https://developers.google.com/machine-learning/crash-course/linear-regression/loss?hl=uk>
76. Гуськова В. Г., Бідюк П. І., Гасанов А. С. Ймовірно-статистичні методи моделювання і прогнозування. Київ : Вид-во НПУ імені М. П. Драгоманова, 2022. 429 с. URL: <http://enpuir.npu.edu.ua/handle/123456789/41164>
77. Delbianco, F., Fioriti, A., Tohmé, F. Markov chains, eigenvalues and the stability of economic growth processes. *Empirical Economics*, 2023. 64, P.1347–1373. doi:10.1007/s00181-022-02276-8
78. Грімнак О. В., Катренко А. В. Система підтримання прийняття рішень для багатокрокових процесів з використанням ланцюгів Маркова. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка» «Інформаційні системи та мережі»*. 2008. 631 (3). С. 148-155. Retrieved from URL <https://science.lpnu.ua/uk/sisn/vsi-vypusky/vypusk-631-2008/systema-pidtrymannya-pryunyattya-rishen-dlya-bagatokrokovykh> (in Ukrainian)
79. Jia T., Wang C., Tian Z., Wang B., Tian F. Design of Digital and Intelligent Financial Decision Support System Based on Artificial Intelligence. *Computational Intelligence and Neuroscience*. 2022, ID 962937, P. 1–7. <https://doi.org/10.1155/2022/1962937>

- 80.Варенко В. М., Братусь І. В., Дорошенко В. С., Смольников Ю. Б., Юрченко В. О. Системний аналіз інформаційних процесів: Навч. посіб.– К.: Університет «Україна», 2013. 203 с. URL: [https://duikt.edu.ua/uploads/1\\_18\\_98931046.pdf](https://duikt.edu.ua/uploads/1_18_98931046.pdf)
- 81.Glass K. Real-time Macroeconomic Data and Uncertainty. DEP (Socioeconomics). Discussion Papers. *Macroeconomics and Finance Series*. 2014. Vol. 6. P. 1–29. URL: <https://www.econstor.eu/bitstream/10419/120854/1/832072516.pdf>
- 82.Trofymchuk O., Bidiuk P., Terentiev O., Klymenko V. The methodology for adaptive modeling and forecasting nonlinear and nonstationary processes. *International Scientific Technical Journal «Problems of control and informatics»*. 2024. Vol. 69 No. 1. С. 63-79. <https://doi.org/10.34229/1028-0979-2024-1-6>
- 83.Бідюк П. І., Половцев О. В. Аналіз та моделювання економічних процесів перехідного періоду. К.: НТУУ КПІ, 1999. 230 р.
- 84.Довгий С. О., Бідюк П. І., Трофимчук О. М., Савенков О. І. Методи прогнозування в системах підтримки прийняття рішень. Київ: Азимут-Україна. 2011. 608 с.
- 85.Hyndman, R.J., Athanasopoulos, G. Forecasting: principles and practice. Melbourne: OTexts. 442 p. <https://otexts.com/fpp3/>.
- 86.Бідюк П. І., Романенко В. Д., Тимощук О.Л. Аналіз часових рядів. Київ : НТУУ «КПІ», 2010.599 с.
- 87.Lewis P., Stevens L. Semi-Multivariate Nonlinear Modeling of Time Series Using Multivariate Adaptive Regression Splines (MARS). *Journal of the American Statistical Association*. 1991 Vol. 86. Issue 416. P. 864–877. URL: <https://doi.org/10.1080/01621459.1991.10475126>
- 88.Звіт про науково-дослідну роботу «Формалізація параметрів та побудова імітаційної моделі для визначення траєкторій впливу поведінкових атракторів на макроекономічну стабільність»/ кер. А. В. Буряк. Суми:

- Сумський державний університет. 2022. 189 с. URL: [https://sumdu.edu.ua/wp-content/uploads/2025/09/2022\\_buryak-min.pdf](https://sumdu.edu.ua/wp-content/uploads/2025/09/2022_buryak-min.pdf):
89. Gustafsson O. Some contributions to heteroscedastic time series analysis and computational aspects of Bayesian VARs. dissertation for the Degree of Doctor of Philosophy in Statistics. Stockholm, 2020. 48 p. URL: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1497177/FULLTEXT01.pdf>
90. Huang L, Zhou X, Shi L, Gong L. Time Series Feature Selection Method Based on Mutual Information. *Applied Sciences*. 2024; Vol.14. Issue 5: P. 1-14. <https://doi.org/10.3390/app14051960>
91. Kwiatkowski-Phillips-Schmidt-Shin (KPSS). URL: <https://www.geeksforgeeks.org/python/kwiatkowski-phillips-schmidt-shin-kpss/>
92. Kębłowski P., Welfe A. The ADF–KPSS test of the joint confirmation hypothesis of unit autoregressive root. *Economics Letters*. 2004. Vol. 85, Issue 2, P. 257-263. <https://doi.org/10.1016/j.econlet.2004.04.013>
93. Chow G. C. Tests of Equality Between Sets of Coefficients in Two Linear Regressions. *The Econometric*. 1960. Vol. 28, No. 3 P. 591-605. <https://doi.org/10.2307/1910133>
94. Baltagi B. H. *Econometrics*. New York: Springer. 412 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-80149-6>
95. Phoong, S.W.; Phoong, S.Y.; Phoong, K.H. Analysis of structural changes in financial datasets using the breakpoint test and the Markov Switching Model. *Symmetry* 2020, Vol. 12. Issue 3. 401. <https://doi.org/10.3390/sym12030401>
96. Bai J., Perron P. Estimating and testing linear models with multiple structural changes. 1998 Vol. 66, No. 1 (Jan., 1998), pp. 47-78. URL: <https://doi.org/10.2307/2998540>
97. Liu J., Wu S., Zidek J. V. On segmented multivariate regression. *Statistica Sinica* 1997. Vol. 7, No. 2. P. 497-525. <https://www.jstor.org/stable/24306090>

98. Baum C., Hurn S., Lindsay K. The BDS test of independence. *The Stata Journal*. 2021 Vol. № 21, N 2. P. 279–294. URL: <https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/1536867X211025796>
99. Christodoulou-Volos, C., Tserkezos, D. Sensitivity of the Ramsey's Regression Specification Error Term Test on the Degree of Nonlinearity of the Functional Form. *Journal of Applied Economic Sciences*, (2023). Vol. XVIII, 1(79): P. 5 – 10. [https://doi.org/10.57017/jaes.v18.1\(79\).01](https://doi.org/10.57017/jaes.v18.1(79).01)
100. Bidyuk P. I., Gamidov G.I., Kazimov T.G., Gasanov A.S. The use of combined approach to modeling and forecasting macroeconomic indicators. International conference on control and optimization with industrial applications (COIA-2020): Proceedings of the 7th International conference (Baku, 26-28 August 2020), Baku : the Institute of Applied Mathematics of Baku State University. 2020. Vol. I. P. 149-151. URL: [https://coia-conf.org/upload/editor/files/COIA2020\\_V1.pdf](https://coia-conf.org/upload/editor/files/COIA2020_V1.pdf)
101. Stepchenko, A., Chizhov, J., Aleksejeva, L., Tolujew, J. Nonlinear, Non-stationary and Seasonal Time Series Forecasting Using Different Methods Coupled with Data Preprocessing. *Procedia Computer Science*, 2017. 104, 578–585. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.01.175>
102. Dahlhaus R. Fitting time series models to nonstationary processes. *The Annals of Statistics*, 1997. 25 (1). <https://doi.org/10.1214/aos/1034276620>
103. Harvey A.C. Forecasting, structural time series models and the Kalman filter. University of Cambridge: Cambridge University Press, 1994. 554 p.
104. KNN. URL: <https://itwiki.dev/data-science/ml-reference/ml-glossary/knn-models>
105. Pratiwi H. , Susanti Y., Sulistijowati H. Sri A Robust Regression by Using Huber Estimator and Tukey Bisquare Estimator for Predicting Availability of Corn in Karanganyar Regency, Indonesia *Indonesian Journal of Applied Statistics* 2018. Vol. I No.1 URL: <https://jurnal.uns.ac.id/ijas/article/view/24090/17210>

106. Любчак В. О., Кубатко О. В., Барченко Н. Л., Калініченко Л. Л., Мартинова Н. С. Моделювання бізнес-циклів у сфері відновлюваної енергетики України: підходи фільтрації та прогнозування. *Науковий вісник Полтавського університету економіки і торгівлі*. 2025. Вип. 3(117). С. 47-53. <https://doi.org/10.37734/2409-6873-2025-3-6>
107. Leonard M., Sloan J., Lee ., Elsheimer B. An Introduction to Similarity Analysis Using SAS. Proceedings of the SAS Global Forum 2007 Conference. SAS Institute Inc., Cary, NC, 2007. 22 p. URL: <https://support.sas.com/rnd/app/ets/papers/similarityanalysis.pdf>
108. Deflating nominal values to real values. URL: <https://www.dallasfed.org/research/basics/nominal#:~:text=The%20technical%20solution,year%20for%20convenience%20and%20reference.>
109. Людський розвиток в Україні. Оцінка та прогноз рівня життя населення: кол.моногр. / за ред. Е.М. Лібанової; НАН України, Ін-т демографії та соціальних досліджень імені М.В. Птухи. Київ, 2019. 270 с.
110. Zhang Z. Missing data imputation: focusing on single imputation. *Annals of Translational Medicine*. 2016. Vol. 4. №1. P. 1–8. <https://doi.org/10.3978/j.issn.2305-5839.2015.12.38>
111. Довгий С. О., Бідюк П. І., Трофимчук О. М., Савенков О. І. Методи прогнозування в системах підтримки прийняття рішень. Київ: Азимут-Україна. 2011. 608 с.
112. Довгий С.О., Бідюк П.І., Трофимчук О.М. Системи підтримки прийняття інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень. Телекомунікаційні та інформаційні технології. 2020. №4(69). С. 131-139. <https://doi.org/10.31673/2412-4338.2020.044031>
113. Соловйов В. М., Стратійчук І. О. *Застосування складних ланцюгів Маркова для прогнозування складних фінансово-економічних систем*. Актуальні проблеми розвитку економічної кібернетики. Міжнародна науково-практична конференція, Київ. Іхсанов, Ш. М., Лопушанська, В. В. Використання ланцюгів Маркова для прогнозування соціально-

- економічних процесів. *Актуальні проблеми економіки*. 2011. №1(115). 258-267: URL <https://dspace.mnau.edu.ua/jspui/handle/123456789/175>.
114. Schweizer VJ, Jamieson-Lane AD, Cai H, Lehner S, Smerlak M Pathways for socioeconomic system transitions expressed as a Markov chain. *PLoS ONE*. 2023. №18(7): e0288928. doi:10.1371/journal.pone.0288928
115. Doroshkevych, K., Maslak, O., Voronovska, V., Salata, I. Use of Markov chains for modeling processes of strategic planning of innovative activity of the enterprise. *WSEAS Transactions on environment and development*. 2020. 16, PP. 440-447/ doi: 10.37394/232015.2020.16.44
116. Згуровський М. З., Бідюк П. І., Терентьев О.М., Просьянкіна-Жарова Т. І. Байєсівські мережі в системах підтримки прийняття рішень: навч. посіб. К: ТОВ «Видавниче підприємство «Едельвейс», 2015. 300 с. ISBN 978-966-2748-73-4. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/19582>
117. Гожий О. П. Підхід до оцінювання невизначеностей в задачах прогнозування. *Електротехнічні та комп'ютерні системи*. 2015. № 19(95). С. 243–247. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/etks\\_2015\\_19\\_54](http://nbuv.gov.ua/UJRN/etks_2015_19_54)
118. Полінкевич О. М., Волинець І. Г. Обґрунтування управлінських рішень та оцінювання ризиків: навч. посіб. Луцьк: ВежаДрук, 2023. 363 с. url: [https://lib.lntu.edu.ua/sites/default/files/2023-12/Посібник%20ОУРОП\\_Полінкевич\\_Волинець\\_онлайн%20з%20обкладиною%20готовий.pdf](https://lib.lntu.edu.ua/sites/default/files/2023-12/Посібник%20ОУРОП_Полінкевич_Волинець_онлайн%20з%20обкладиною%20готовий.pdf)
119. Developing a Dynamic Conditional Correlation in Python. URL: <https://medium.com/@ngaridennis3/developing-a-dynamic-conditional-correlation-dcc-garch-in-python-1b9d3ddd340f>
120. Monte Carlo Simulation. URL: <https://www.sciencedirect.com/topics/economics-econometrics-and-finance/monte-carlo-simulation>
121. Андріяш В. І., Громадська Н. А., Малікіна О. А. Оцінювання державно-управлінських рішень: моделі та критерії . URL: [http://www.dy.nayka.com.ua/pdf/9\\_2021/5.pdf](http://www.dy.nayka.com.ua/pdf/9_2021/5.pdf)

122. Моніторинг регіонального розвитку. URL: <https://mindev.gov.ua/diialnist/polityka-rehionalnoho-rozvytku/monitorynh-rehionalnoho-rozvytku>
123. Бакуліч О.О., Голоденко В.О. Впровадження цілей сталого розвитку у громадах України: шлях до стійкого майбутнього. URL: <https://ukraine-oss.com/wp-content/uploads/2025/06/vprovadzheniya-czilej-stalogo-rozvytku-u-gromadah-ukrayiny.pdf>
124. Воронцов С. Б., Бурбела Т. М. Сучасний стан та проблеми формування підходів до забезпечення сталого розвитку України. URL: <https://niss.gov.ua/sites/default/files/2020-07/suchasnyi-stan-zabezpechennya-stalogo-rosvytku-ukrainy.pdf>
125. Holsapple C. W., Winston A. B. Decision Support Systems. A Knowledge Based Approach. 1996. Minneanapolis/St Paul: West Publishing Company, 850 p.
126. DIKW модель . URL: <https://simpleone.ru/glossary/dikw-model>
127. Сологуб, В., Пашкевич, В. .Метод підвищення ефективності обробки etl/elt процесів на основі метадата параметрів. Herald of khmelnytskyi national university. Technical sciences, 2026. № 361(1), С. 328-337. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-361-47>
128. Що таке інтеграція API і як вона перетворює корпоративний IT. URL: <https://www.sap.com/ukraine/resources/api-integration>
129. Сучасні сервіси data lake і data warehouse. URL: <https://ua.ibagroupit.com/services/data-management-analytics-and-ai/data-lake-and-warehouse-service/>
130. PostgreSQL vs. MySQL: What's the Difference? URL: <https://www.ibm.com/think/topics/postgresql-vs-mysql>
131. SAS Foundation і Metadata Server. URL: [https://documentation.sas.com/doc/en/pgmsascdc/9.4\\_3.5/olapug/p1fp9y0h5tvzmrn1krt0szz59e4k.htm](https://documentation.sas.com/doc/en/pgmsascdc/9.4_3.5/olapug/p1fp9y0h5tvzmrn1krt0szz59e4k.htm)
132. Python. URL: <https://www.python.org>

133. Жерновий, Ю. В. Марковські моделі масового обслуговування: тексти лекцій. Львів: Видавничий центр ЛНУ імені Івана Франка. 2004. 154 с.
134. Андреев М.В. Оптимізація стохастичних моделей. Спецкурс. Керовані марковські та напівмарковські моделі з повною і неповною інформацією. Навч. посіб. К.: Вид-во Акад. праці і соц. відносин федер. профспілок України, 2012. с.
135. Taylor, H. M. Markovian sequential replacement processes. *The Annals of Mathematical Statistics*, 1966. 36 (6), P. 1677-1694.  
<https://www.jstor.org/stable/2239109>
136. Blackwell, D. Discounted Dynamic Programming *The Annals of Mathematical Statistics*, 1965. 36 (1), P. 226-235.  
<https://www.jstor.org/stable/2238089>
137. Maitra, A. Discounted Dynamic Programming on Compact Metric spaces. *Sankhyā. the Indian Journal of Statistics, Series A*. 1968. 30 (2), P. 211-216.  
<https://www.jstor.org/stable/25049530>
138. Feinberg T. A., Kasyanov P. O. & Zadoianchuk N. V. Average Cost Markov Decision Processes with Weakly Continuous Transition Probabilities. *Journal Mathematics of Operation Research.* 2012. 37 (4), P. 591-607.  
<https://doi.org/10.48550/arXiv.1202.4122>
139. Narayan, U. Bhat. An Introduction to Queueing Theory. Modeling and Analysis in Applications. New York: Springer Birkhäuser Boston. 2015. 339 p.  
<https://doi.org/10.1007/978-0-8176-8421-1>
140. MathWorks. Simulink. <https://mathworks.com/simulink/>
141. Ronald A. Howard.). *Dynamic Programming and Markov Processes*. New York : London: The Technology Press of The Massachusetts Institute of Technology and John Wiley & Sons, Inc. 1960.  
<https://gwern.net/doc/statistics/decision/1960-howard-dynamicprogrammingmarkovprocesses.pdf>

142. LINE Solver. Queueing Theory Algorithms <http://line-solver.sourceforge.net/>
143. Державний веб-портал бюджету для громадян. URL: <https://openbudget.gov.ua>
144. Air Pollution in Ukraine as seen from Space: The Effects of the War. URL: <https://cleanair.org.ua/wp-content/uploads/2023/08/cleanair.org.ua-air-pollution-in-ukraine-from-space-in-2022-air-pollution-from-space.pdf>
145. Державна служба статистики України. URL: <https://www.ukrstat.gov.ua>

## **ДОДАТКИ**

## ДОДАТОК А

Таблиця А.1 – Функціональні підсистеми ЛСЕС

Назва підсистеми	Складові	Функції	Ключові індикатори:
Економічна	суб'єкти господарювання підприємства, фермерські господарства, підприємців, інвесторів, інфраструктуру ринку праці	виробництво, обмін, розподіл і споживання ресурсів. Економічна підсистема є рушієм розвитку всієї системи, оскільки формує фінансові ресурси для соціальної сфери та екологічних програм.	валовий продукт громади, рівень зайнятості, структура доходів і витрат бюджету, обсяг інвестицій.
Соціальна	населення, соціальні інститути, освітні, культурні та медичні організації.	відтворення людського капіталу, формування соціальної згуртованості та якості життя. Соціальна стабільність є необхідною умовою реалізації економічних стратегій громади.	рівень освіти, зайнятості, охорони здоров'я, демографічна структура, соціальна мобільність, індекс людського розвитку (HDI).
Екологічна	природне середовище, ресурси, енергетичну ефективність, поводження з відходами, водні й земельні ресурси.	підтримання екологічної рівноваги, раціональне використання природних ресурсів і мінімізація техногенного впливу.	рівень забруднення повітря і води, відновлювані джерела енергії, площа природоохоронних територій, викиди CO <sub>2</sub> , частка “зелених” інвестицій.
Управління	органи місцевого самоврядування, адміністративні установи, комунальні підприємства	прийняття рішень, стратегічне планування та контроль виконання програм розвитку. Управлінська підсистема є інтегруючим центром, який координує інші елементи системи через регуляторні, правові, фінансові та інформаційні механізми. Важливою тенденцією є цифровізація управління — використання	рівень соціально-економічного розвитку, бюджетна забезпеченість, бюджетна самостійність, наявність громадських бюджетів, рівень цифровізації

Назва підсистеми	Складові	Функції	Ключові індикатори:
		СППР), ГІС, електронного документообігу та відкритих даних Open Data.	
Інфраструктура	транспорт, енергетику, комунікації, ІТ-інфраструктуру, житлово-комунальні мережі.	забезпечує транспортну та цифрову основу функціонування територій: сучасна інфраструктура є ключовим чинником конкурентоспроможності ЛСЕС і основою для “розумних громад” (Smart Communities), що використовують Інтернет речей (IoT), аналітику великих даних та енергетичні цифрові платформи.	показники наявності та стану транспортного сполучення, показники обсягів перевезень всіма видами транспорту, забезпеченість Інтернетом та заслоами звязку

## ДОДАТОК Б

### Код додатку

-- СТВОРЕННЯ СТРУКТУРИ БАЗИ ДАНИХ

-- Таблиця сирих даних (індикатори ЛСЕС)

```
CREATE TABLE IF NOT EXISTS lses_indicators (  
  id SERIAL PRIMARY KEY,  
  region VARCHAR(100),    -- Назва регіону / громади  
  year INT,              -- Рік спостереження  
  economic FLOAT,       -- Економічний показник  
  social FLOAT,         -- Соціальний показник  
  ecological FLOAT,     -- Екологічний показник  
  governance FLOAT,     -- Управлінський показник  
  created_at TIMESTAMP DEFAULT CURRENT_TIMESTAMP  
);
```

-- Таблиця нормалізованих даних

```
CREATE TABLE IF NOT EXISTS lses_indicators_normalized (  
  id SERIAL PRIMARY KEY,  
  region VARCHAR(100),  
  year INT,  
  economic_norm FLOAT,  
  social_norm FLOAT,  
  ecological_norm FLOAT,  
  governance_norm FLOAT  
);
```

ЗАВАНТАЖЕННЯ ДАНИХ –

```
INSERT INTO lses_indicators (region, year, economic, social, ecological, governance)  
VALUES  
( 'Kyiv', 2020, 55, 62, 48, 58),  
( 'Kyiv', 2021, 60, 64, 50, 61),  
( 'Kyiv', 2022, 63, 65, 49, 63),  
( 'Kyiv', 2023, 68, 67, 53, 66),  
( 'Cherkasy', 2020, 50, 60, 52, 57),  
( 'Cherkasy', 2021, 54, 62, 55, 60);
```

-ОЧИЩЕННЯ ДАНИХ

-- Виявлення пропусків

```
SELECT *  
FROM lses_indicators  
WHERE economic IS NULL  
   OR social IS NULL  
   OR ecological IS NULL  
   OR governance IS NULL;
```

```
-- Заповнення пропусків середнім значенням
```

```
UPDATE lses_indicators
SET economic = (SELECT AVG(economic) FROM lses_indicators)
WHERE economic IS NULL;
```

```
-
```

```
-НОРМАЛІЗАЦІЯ ДАНИХ
```

```
-- Мін-макс нормалізація
```

```
INSERT INTO lses_indicators_normalized (
  region, year,
  economic_norm,
  social_norm,
  ecological_norm,
  governance_norm
)
```

```
SELECT
```

```
  region,
  year,
```

```
  -- Нормалізація економічного показника
```

```
(economic - MIN(economic) OVER()) /
NULLIF(MAX(economic) OVER() - MIN(economic) OVER(), 0),
```

```
  -- Нормалізація соціального показника
```

```
(social - MIN(social) OVER()) /
NULLIF(MAX(social) OVER() - MIN(social) OVER(), 0),
```

```
  -- Нормалізація екологічного показника
```

```
(ecological - MIN(ecological) OVER()) /
NULLIF(MAX(ecological) OVER() - MIN(ecological) OVER(), 0),
```

```
  -- Нормалізація управлінського показника
```

```
(governance - MIN(governance) OVER()) /
NULLIF(MAX(governance) OVER() - MIN(governance) OVER(), 0)
```

```
FROM lses_indicators;
```

```
РОЗРАХУНОК ІНТЕГРАЛЬНОГО ІНДЕКСУ (MODELING LAYER)
```

```
-- Створення view для індексу сталого розвитку
```

```
CREATE OR REPLACE VIEW sustainability_index_view AS
```

```
SELECT
```

```
  region,
  year,
```

```
  economic_norm,
```

```
  social_norm,
```

```

ecological_norm,
governance_norm,

-- Інтегральний індекс (зважена сума)
(
  economic_norm * 0.25 +
  social_norm * 0.25 +
  ecological_norm * 0.25 +
  governance_norm * 0.25
) AS sustainability_index

```

```
FROM lses_indicators_normalized;
```

-

#### КЛАСИФІКАЦІЯ РІВНЯ РОЗВИТКУ

```

-- Класифікація ЛСЕС
CREATE OR REPLACE VIEW sustainability_classification AS
SELECT
  region,
  year,
  sustainability_index,

  CASE
    WHEN sustainability_index < 0.33 THEN 'Low'
    WHEN sustainability_index < 0.66 THEN 'Medium'
    ELSE 'High'
  END AS sustainability_level

```

```
FROM sustainability_index_view;
```

#### АНАЛІТИКА ТА АГРЕГАЦІЯ (SPPR / VI)

```

-- Середній індекс по регіону
SELECT
  region,
  AVG(sustainability_index) AS avg_index
FROM sustainability_index_view
GROUP BY region;

```

```

-- Динаміка індексу за роками
SELECT
  year,
  AVG(sustainability_index) AS index_trend
FROM sustainability_index_view
GROUP BY year
ORDER BY year;

```

```
-- Визначення найслабшої підсистеми
SELECT
    region,
    year,
    LEAST(economic_norm, social_norm, ecological_norm, governance_norm) AS
weakest_dimension
FROM lses_indicators_normalized;
```

## СЦЕНАРНИЙ АНАЛІЗ

```
-- Песимістичний сценарій
SELECT
    region,
    year,

    economic_norm * 0.9 AS economic_scenario,
    social_norm * 0.95 AS social_scenario,
    ecological_norm * 0.9 AS ecological_scenario,
    governance_norm * 0.95 AS governance_scenario

FROM lses_indicators_normalized;
```

## DASHBOARD

```
CREATE OR REPLACE VIEW sustainability_dashboard AS
SELECT
    region,
    year,
    sustainability_index,
    sustainability_level
FROM sustainability_classification;
```

## ОПТИМІЗАЦІЯ (PERFORMANCE)

```
-- Індекс для швидкого доступу
CREATE INDEX IF NOT EXISTS idx_region_year
ON lses_indicators(region, year);
```

## Додаток – розрахунок показників сталого розвитку

```
import pandas as pd
import numpy as np
from sklearn.impute import SimpleImputer
from sklearn.preprocessing import MinMaxScaler
from sklearn.cluster import KMeans
from sklearn.linear_model import LinearRegression
import matplotlib.pyplot as plt

# завантаження / формування даних

def load_data():
    """
    Приклад вхідних даних ЛСЕС.
    У реальній системі тут може бути:
    - API Держстату
    - CSV / Excel
    - база даних PostgreSQL
    """
    data = {
        "year": [2020, 2021, 2022, 2023, 2024],
        "economic": [55, 60, np.nan, 68, 72],
        "social": [62, 64, 65, np.nan, 70],
        "ecological": [48, 50, 49, 53, 56],
        "governance": [58, 61, 63, 66, 69]
    }
    return pd.DataFrame(data)

# очищення, імпутація, нормалізація

def preprocess_data(df: pd.DataFrame):
    df_processed = df.copy()

    feature_cols = ["economic", "social", "ecological", "governance"]

    # 2.1. Імпутація пропусків
    imputer = SimpleImputer(strategy="mean")
    df_processed[feature_cols] = imputer.fit_transform(df_processed[feature_cols])

    # 2.2. Нормалізація
    scaler = MinMaxScaler()
    df_processed[[f"{col}_norm" for col in feature_cols]] =
    scaler.fit_transform(df_processed[feature_cols])

    return df_processed

# інтегральний індекс сталого розвитку

def calculate_sustainability_index(df: pd.DataFrame, weights=None):
```

```

"""
Інтегральний індекс сталого розвитку.
За замовчуванням використовуються рівні ваги.
"""
if weights is None:
    weights = {
        "economic_norm": 0.25,
        "social_norm": 0.25,
        "ecological_norm": 0.25,
        "governance_norm": 0.25
    }

df = df.copy()
df["sustainability_index"] = (
    df["economic_norm"] * weights["economic_norm"] +
    df["social_norm"] * weights["social_norm"] +
    df["ecological_norm"] * weights["ecological_norm"] +
    df["governance_norm"] * weights["governance_norm"]
)
return df

```

#кластеризація

```

def cluster_lses(df: pd.DataFrame, n_clusters=3):
    """
    Групування об'єктів ЛСЕС за рівнем розвитку.
    """
    df = df.copy()
    cluster_features = df[[
        "economic_norm",
        "social_norm",
        "ecological_norm",
        "governance_norm"
    ]]

    model = KMeans(n_clusters=n_clusters, random_state=42, n_init=10)
    df["cluster"] = model.fit_predict(cluster_features)
    return df, model

```

# просте прогнозування індексу

```

def forecast_index(df: pd.DataFrame, forecast_years=3):
    """
    Linear Regression.
    можна замінити на ARIMA / SARIMA / LSTM / BSTS.
    """
    model = LinearRegression()

    X = df[["year"]]
    y = df["sustainability_index"]

```

```

model.fit(X, y)

last_year = df["year"].max()
future_years = np.array(range(last_year + 1, last_year + 1 + forecast_years)).reshape(-1, 1)
forecast_values = model.predict(future_years)

forecast_df = pd.DataFrame({
    "year": future_years.flatten(),
    "forecast_index": forecast_values
})

return forecast_df, model

# генерація рекомендацій

def generate_recommendation(index_value: float) -> str:
    """
    Просте rule-based формування рекомендацій.
    """
    if index_value < 0.4:
        return "Критичний рівень: необхідні термінові управлінські втручання у всіх підсистемах."
    elif index_value < 0.6:
        return "Низький рівень: доцільно посилити економічну та соціальну підтримку."
    elif index_value < 0.8:
        return "Середній рівень: рекомендовано покращити екологічні та управлінські механізми."
    else:
        return "Високий рівень: система розвивається стабільно, доцільно підтримувати поточну політику."

def add_recommendations(df: pd.DataFrame):
    df = df.copy()
    df["recommendation"] = df["sustainability_index"].apply(generate_recommendation)
    return df

# візуалізація

def plot_results(df: pd.DataFrame, forecast_df: pd.DataFrame):
    plt.figure(figsize=(10, 6))
    plt.plot(df["year"], df["sustainability_index"], marker="o", label="Фактичний індекс")
    plt.plot(forecast_df["year"], forecast_df["forecast_index"], marker="x", linestyle="--",
label="Прогноз")
    plt.title("Динаміка інтегрального індексу сталого розвитку ЛСЕС")
    plt.xlabel("Рік")
    plt.ylabel("Індекс")
    plt.grid(True)
    plt.legend()
    plt.show()

```

```
# повний сценарій

def main():
    print("=== 1. Завантаження даних ===")
    df = load_data()
    print(df, "\n")

    print("=== 2. Попередня обробка ===")
    df = preprocess_data(df)
    print(df, "\n")

    print("=== 3. Розрахунок інтегрального індексу ===")
    df = calculate_sustainability_index(df)
    print(df[["year", "sustainability_index"]], "\n")

    print("=== 4. Кластеризація ===")
    df, cluster_model = cluster_lses(df, n_clusters=3)
    print(df[["year", "sustainability_index", "cluster"]], "\n")

    print("=== 5. Формування рекомендацій ===")
    df = add_recommendations(df)
    print(df[["year", "sustainability_index", "recommendation"]], "\n")

    print("=== 6. Прогнозування ===")
    forecast_df, forecast_model = forecast_index(df, forecast_years=3)
    print(forecast_df, "\n")

    print("=== 7. Візуалізація ===")
    plot_results(df, forecast_df)

if __name__ == "__main__":
    main()
```

## Код програми для аналізу та моделювання забруднення

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# Зчитування координат
def load_polygon(file_path):
    coords = []
    with open(file_path, 'r') as f:
        for line in f:
            parts = line.strip().split(',')
            if len(parts) == 3:
                _, x, y = parts
                coords.append((float(x), float(y)))
    coords = np.array(coords)

# нормалізація (0-1)
x = coords[:,1]
y = coords[:,0]

x_norm = (x - x.min()) / (x.max() - x.min())
y_norm = (y - y.min()) / (y.max() - y.min())

return x_norm, y_norm

# Гаусове ядро
def gaussian(x, y, x0, y0, sigma=0.1):
    return np.exp(-((x-x0)**2 + (y-y0)**2) / (2 * sigma**2))

# Побудова поля
def build_field(grid_x, grid_y, sources_pos, values, sigma=0.1):
    C = np.zeros_like(grid_x)
```

```
for (sx, sy), val in zip(sources_pos, values):  
    C += val * gaussian(grid_x, grid_y, sx, sy, sigma)  
  
return C
```

```
# Основна функція
```

```
def plot_dynamics(txt_path):
```

```
    # --- геометрія області ---
```

```
    x_poly, y_poly = load_polygon(txt_path)
```

```
    # --- сітка ---
```

```
    grid_x, grid_y = np.meshgrid(  
        np.linspace(0, 1, 200),  
        np.linspace(0, 1, 200)  
    )
```

```
    # --- координати джерел ---
```

```
    sources_pos = [  
        (0.7, 0.7), # Ч  
        (0.4, 0.4), # У  
        (0.5, 0.6) # сільська зона  
    ]
```

```
    # --- значення з моделі ---
```

```
    values_t = [  
        [61, 51, 42],    # t=0  
        [50, 46.1, 37.3], # t=1  
        [41.2, 42.5, 36.5], # t=2  
        [34.6, 39.6, 35.4] # t=3  
    ]
```

```
    # --- побудова ---
```

```
fig, axes = plt.subplots(2, 2, figsize=(10, 8))

for t, ax in enumerate(axes.flatten()):
    C = build_field(grid_x, grid_y, sources_pos, values_t[t])

    contour = ax.contourf(grid_x, grid_y, C, levels=20)
    ax.plot(x_poly, y_poly, color='black', linewidth=1)

    ax.set_title(f"t = {t}")
    ax.set_xticks([])
    ax.set_yticks([])

# --- colorbar ---
fig.colorbar(contour, ax=axes.ravel().tolist(), shrink=0.8)

plt.tight_layout()
plt.show()

# Запуск
if __name__ == "__main__":
    plot_dynamics("Cherkasy_regione(1).txt")
```

Документи, що підтверджують впровадження результатів дисертації

**АКТ**  
**про впровадження результатів дисертаційного дослідження**  
**Дякона Дмитра Валерійовича**  
**на тему «Інформаційна технологія моделювання сталого**  
**розвитку локальних соціально-економічних систем»**

Результати дисертаційного дослідження, використані у роботі виконавчого комітету Уманської міської ради, зокрема, відділу економічного розвитку, інфраструктури та житлово-комунального господарства, у процесі розроблення пропозицій щодо цифровізації роботи відділу, а також у процесі підтримки прийняття рішень при розробленні Прогнозу бюджету Уманської міської територіальної громади на 2026-2028 роки та підготовці пропозицій щодо розвитку підприємництва Умані (моделі та методи аналізу та прогнозування розвитку соціально-еколого-економічних систем в умовах невизначеності).

Даний документ не є підставою для проведення будь-яких розрахунків та передачі майнових чи авторських прав, виникнення фінансових та інших зобов'язань.

Секретар виконавчого комітету  
Уманської міської ради



Наталія СИРОТЮК

**Акт**  
**про впровадження результатів дисертаційного дослідження**  
**Дякона Дмитра Валерійовича**  
**на тему «Інформаційна технологія моделювання сталого розвитку**  
**локальних соціально-економічних систем» у освітній процес**

Результати дисертаційного дослідження на тему «Інформаційна технологія моделювання сталого розвитку локальних соціально-економічних систем» використані у освітньому процесі кафедри інформаційних технологій Уманського національного університету при викладанні дисципліни «Об'єктно-орієнтовне програмування і моделювання» для студентів другого (магістерського) освітнього рівня спеціальності F3 Комп'ютерні науки (освітньо-професійна програма «Комп'ютерні науки»).

Декан факультету економіки і підприємництва

Юрій ЦИМБАЛЮК

Завідувач кафедри

Роман ЛШЦУК

Підпис <i>Юрій Цимбалюк</i>
<i>Романа Лещука</i>
<b>ЗАСВІДЧУЮ</b>
Завідувач канцелярії Уманського національного університету
<i>Доктор Дмитро Іваниця</i>
<i>26.03.2026</i> р.

