

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

АРТЕМУК ОЛЬГА – СОЛОМІЯ ІВАНІВНА

УДК 006.91:005.336.3](043.5)

ДИСЕРТАЦІЯ
МЕТРОЛОГІЧНІ РИЗИКИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ПРОДУКЦІЇ НА
ЕТАПІ ВИГОТОВЛЕННЯ

152 – «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка»

15 – «Автоматизація та приладобудування»

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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



О-С. І. Артемук

Науковий керівник:
доктор технічних наук, професор
Микийчук Микола Миколайович

Львів 2025

АНОТАЦІЯ

Артемук О-С.І. Метрологічні ризики забезпечення якості продукції на етапі виготовлення – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 152 «Метрологія та інформаційно-вимірвальна техніка» (15 – Автоматизація та приладобудування). – Міністерство освіти та науки України, Національний університет «Львівська політехніка», Львів, 2025.

Дисертація присвячена розробленню та дослідженню методів та моделей оцінювання, прогнозування та мінімізації метрологічних ризиків, що впливають на якість продукції на етапі виготовлення.

Дисертація містить вступ, чотири розділи, висновки, список літературних джерел та додатки.

У *вступі* наведено обґрунтування актуальності теми дослідження, зокрема важливість управління метрологічними ризиками для забезпечення якості продукції на етапі виготовлення. Визначено об'єкт та предмет дослідження, сформульовано мету та завдання роботи, окреслено наукову новизну отриманих результатів та їхнє практичне значення. Також подано огляд сучасного стану проблеми та ключові напрями, які досліджувалися в рамках роботи.

В *першому розділі* представлено ґрунтовний аналіз сучасного стану теорії та практики управління метрологічними ризиками та їх впливу на якість продукції на етапі виготовлення. Визначено, що таке метрологічний ризик, а також джерела його виникнення в умовах виробничих процесів. Особливу увагу приділено процесу управління ризиками, що містить ідентифікацію, оцінювання та моніторинг можливих небезпек. Також проведено аналіз основних міжнародних стандартів, які регулюють управління ризиками, зокрема ISO 9000, ISO 31000, AS4360, COSO ERM, CoCo та IRM, що встановлюють принципи та методи ефективного управління ризиками у різних галузях. Детально описано процес

управління ризиками відповідно до вищезгаданих стандартів, зокрема на етапах планування, реалізації, перевірки та коригування заходів щодо зниження ризиків.

Окрім цього, здійснюється аналіз застосування циклу PDCA (plan, do, check, act) як ефективного інструменту для управління ризиками якості продукції. Обґрунтовано, чому цей підхід є безперервним процесом та вимагає постійної уваги до можливих ризиків протягом усього життєвого циклу продукції. Зазначено основні етапи розробки програми управління ризиками та значення етапу оцінювання ризику для визначення найбільш критичних моментів у процесах виробництва.

Проведено дослідження різних методів оцінювання ризиків, зокрема методи мозкового штурму, Дельфі, попереднього аналізу небезпечних чинників РНА, методу аналізу видів і наслідків відмов FMEA, аналізу небезпечних чинників та критичних точок контролю НАССР та метод "що-якщо" SWIFT. Для кожного з методів розглядаються основні принципи та вимоги до їх застосування в практиці управління ризиками, що дозволяє оптимізувати процеси оцінювання та впровадження ефективних заходів для зменшення ризиків на етапі виготовлення продукції. Проведені в цьому розділі дослідження є основою для подальшого глибокого аналізу та практичних рекомендацій щодо оцінювання та мінімізації метрологічних ризиків забезпечення якості продукції на етапі виготовлення продукції.

У *другому розділі* досліджено фактори впливу на технологічний процес як джерела метрологічних ризиків, здійснено їх класифікацію на внутрішні та зовнішні. До внутрішніх віднесено фактори залежні від діяльності підприємства: система метрологічного забезпечення, технічні фактори та людський фактор. Зовнішні фактори включають соціально-економічні, науково-інноваційні та природньо-екологічні. Внутрішні фактори, що виникають у межах самого підприємства, прямо впливають на результати виробництва та можуть бути оперативно відкориговані. Зовнішні ж фактори вимагають адаптації до умов середовища, не перебувають під прямим контролем підприємства, проте істотно

впливають на якість продукції, зокрема через зміну вимог до метрологічних процесів і технологій.

Досліджено специфіку системи оцінювання метрологічних ризиків якості продукції на етапі виготовлення, що відповідає вимогам міжнародних стандартів (ISO 9001, ISO 31000, ISO 31010). Уточнено, що для ефективного управління ризиками необхідно встановити чіткий розподіл повноважень і відповідальності між учасниками процесу, передбачити регулярне планування та фіксацію заходів, а також дотримуватися принципів системності й документувати результати оцінки та прийняті рішення. Важливе значення мають періодичність перевірок і звітність, оскільки своєчасне виявлення та належне опрацювання метрологічних ризиків сприяють досягненню стабільно високої якості продукції.

Розроблено концепцію управління метрологічними ризиками, що складається з трьох ключових етапів: планування, оцінювання та опрацювання ризиків. На етапі планування визначаються цілі, сфера застосування, учасники процесу та критерії ризику. Під час оцінювання проводиться аналіз, ідентифікація та оцінка ризиків. У роботі наводиться узагальнена блок-схема процесу ідентифікації та аналізу метрологічних ризиків. Додатково використовується граф-модель комплексного метрологічного ризику, що дає змогу візуалізувати рівні взаємодії й взаємозв'язки різних факторів та показників, які формують загальний рівень ризику. На завершальному етапі здійснюється мінімізація ризиків шляхом аналізу пропонованих заходів та їх впливу на виявлені ризики.

В *третьому розділі* розроблено математичну модель для визначення комплексного показника рівня метрологічного ризику. Запропоновано шкали оцінки значущості наслідків, ймовірності виникнення та виявлення ризиків, які слугують основою для визначення їхнього значення. Розроблено матрицю впливу для визначення вагових коефіцієнтів, що враховують взаємовплив ризиків під час визначення групового показника ризику. Також представлено адаптивну модель, яка об'єднує групові показники в єдиний комплексний, та підходи до встановлення допустимого значення цього показника, що дозволяє кількісно

оцінити рівень метрологічного ризику та визначити критичні межі для виробничого процесу.

Окрім цього, проведено дослідження шкал значущості наслідків, ймовірності виникнення та виявлення, що використовуються для визначення одиничних показників метрологічних ризиків. Виявлено кілька недоліків таких шкал, зокрема: 88% діапазону можливих значень залишаються невикористаними (лише 120 зі 1000 значень задіяно), неоднозначність результатів і різна чутливість. У зв'язку з цим запропоновано перехід до нелінійних шкал для визначення S, O та D. Таким чином отримані значення добуток цих показників рівномірніше розташовані у всьому діапазоні можливих значень, а добуток середніх значень розташований ближче до середини діапазону.

Запропоновано оцінювати ефективність заходів для мінімізації ризиків, орієнтуючись на два ключові критерії: відносне зменшення комплексного показника ризику та співвідношення витрат на реалізацію заходів до можливих втрат, яких вдалося уникнути. Це дає змогу обґрунтовано вибирати оптимальні стратегії управління метрологічними ризиками та підвищувати ефективність виробничих процесів.

У *четвертому розділі* представлено метод прогнозування метрологічних ризиків із використанням нейронних мереж для аналізу часових рядів. Досліджено шість моделей, зокрема: Facebook Prophet, Statsmodels SARIMAX, Forecaster Recursive, Forecaster Direct, LGBM Regressor, Linear Regression. Оцінка точності моделей здійснювалася за 4 показниками: середня абсолютна похибка (англ. Mean Absolute Error або MAE), середня відносна похибка (англ. Mean Absolute Percentage Error або MAPE), коренева середньоквадратична похибка (англ. Root Mean Square Error або RMSE) та коефіцієнт кореляції (англ. R square або R²). За результатами дослідження найкращі результати продемонструвала модель Facebook Prophet (MAE = 0.019, RMSE = 0.024, R² = 0.861), що свідчить про її високу точність і здатність враховувати тенденції метрологічних ризиків. Statsmodels SARIMAX показала прийнятну точність (MAE = 0.022, R² = 0.799),

тоді як інші моделі виявилися менш ефективними. Окрім цього проведено дослідження залежності точності моделі від розміру даних для навчання та довжини вікна для прогнозування. Встановлено, що збільшенням історичного періоду для навчання та зменшення горизонту прогнозування похибка зменшується і навпаки: при короткому періоді навчання та довгому періоді прогнозу похибка збільшується.

Для спрощення процесу оцінки метрологічних ризиків розроблено програмне забезпечення у вигляді web застосунку із клієнтською та серверною частинами. Клієнтська частина (frontend) реалізована на React із використанням JSX, що забезпечує модульність, інтерактивність та зручність розробки. Серверна частина (backend) створена на Python із фреймворком FastAPI. Функціонал застосунку включає створення реєстру ризиків, аналіз і оцінку комплексного показника, прогнозування ризиків, оцінку ефективності заходів із мінімізації та автоматичну генерацію звітів.

Результати дисертаційного дослідження було апробовано на виробництві із виготовлення соків. Здійснено ідентифікацію та аналіз чинників, що впливають на технологічний процес. Визначено ключові метрологічні ризики, які можуть змінювати якісні показники сировини та параметри готової продукції. На основі цього аналізу сформовано реєстр ризиків, де описано можливі причини виникнення ризикової події, значущість її наслідків та можливі заходи щодо її мінімізації. За результатами оцінювання встановлено, що комплексний показник метрологічного ризику для даного підприємства становить 0.3357 (або 33.6%) при допустимому значенні 0.5315 (або 53.15%), що дає підстави вважати значення комплексного показника прийнятним.

Ключові слова: якість продукції, метрологічне забезпечення, управління ризиками, контроль якості, комплексний показник ризику, стандарти, математична модель, прогнозування ризиків, машинне навчання, джерела ризику, життєвий цикл продукції, виготовлення продукції.

ABSTRACT

Artemuk O.S.I. Metrological risks of quality assurance of products at the manufacturing stage – Manuscript.

Thesis paper for achievement of the scientific degree Doctor of Philosophy in the specialty 152 “Metrology and Information-Measuring Technics” (15 – Automation and instrumentation). – Lviv Polytechnic National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2025.

The dissertation is devoted to the development and research of methods and models for assessing, forecasting and minimizing metrological risks that affect the quality of products at the manufacturing stage.

The thesis consists of an introduction, four chapters, conclusions, a list of references and appendices.

The ***introduction*** provides a justification for the relevance of the research topic, in particular, the importance of managing metrological risks to ensure product quality at the manufacturing stage. The object and subject of the study are defined, the goals and objectives of the work are formulated, the scientific novelty of the results obtained and their practical significance are outlined. The article also provides an overview of the current state of the problem and the key areas that were studied in the framework of the work.

The ***first chapter*** presents a thorough analysis of the current state of the theory and practice of managing metrological risks and their impact on product quality at the manufacturing stage. The article defines what a metrological risk is, as well as the sources of its occurrence in the context of production processes. Particular attention is paid to the risk management process, which includes identification, assessment and monitoring of possible hazards. The article also provides an analysis of the main international standards governing risk management, in particular ISO 9000, ISO 31000, AS4360, COSO ERM, CoCo and IRM, which establish the principles and methods of effective risk management in various industries. The process of risk management in

accordance with the above standards is described in detail, in particular at the stages of planning, implementation, verification and adjustment of risk mitigation measures.

In addition, the article provides an analysis of the PDCA (plan, do, check, act) cycle as an effective tool for managing product quality risks. It is substantiated why this approach is a continuous process and requires constant attention to possible risks throughout the entire product life cycle. The main stages of developing a risk management programme and the importance of the risk assessment stage for determining the most critical moments in production processes are indicated.

Various methods of risk assessment are studied, including brainstorming, Delphi, preliminary hazard analysis PHA, failure modes and effects analysis FMEA, hazard analysis and critical control points HACCP, and the ‘what-if’ method SWIFT. For each of the methods, the basic principles and requirements for their application in risk management practice are considered. This allows to optimize the processes of assessing and implementing effective measures to reduce risks at the stage of product manufacturing. The research carried out in this section is the foundation for further in-depth analysis and practical recommendations for assessing and minimizing metrological risks to product quality assurance at the manufacturing stage.

In the *second chapter*, the factors influencing the technological process as a source of metrological risks are investigated, and their classification into internal and external is carried out. The internal factors include those that depend on the activities of the enterprise: the metrological support system, technical factors and the human factor. External factors include social and economic, scientific and innovative, natural and environmental factors. Internal factors that arise within the enterprise directly affect production results and can be promptly corrected. External factors require adaptation to environmental conditions, are not under the direct control of the enterprise, but significantly affect the quality of products, in particular due to changes in the requirements for metrological processes and technologies.

The specifics of the system for assessing metrological risks to product quality at the manufacturing stage, which meets the requirements of international standards (ISO

9001, ISO 31000, ISO 31010), are investigated. It is clarified that for effective risk management it is necessary to establish a clear division of authority and responsibility between the participants in the process, to provide for regular planning and recording of activities, as well as to adhere to the principles of consistency and document the results of the assessment and decisions made. The frequency of inspections and reporting is important, as timely identification and proper processing of metrological risks contribute to the achievement of consistently high product quality.

The concept of metrological risk management has been developed, consisting of three key stages: planning, assessment and processing of risks. At the planning stage, the objectives, scope, process participants and risk criteria are determined. During the assessment stage, risks are analyzed, identified and evaluated. The study presents a generalized flowchart of the process of identification and analysis of metrological risks. Additionally, a graph model of complex metrological risk is used to visualize the levels of interaction and interrelationships of various factors and indicators that form the overall level of risk. At the final stage, the risks are minimized by analyzing the proposed measures and their impact on the identified risks.

In the *third chapter*, a mathematical model is developed to determine a complex indicator of the level of metrological risk. Scales for assessing the significance of consequences, probability of occurrence and identification of risks are proposed. They serve as the basis for determining their value. An influence matrix has been developed to determine the weighting factors that consider the interaction of risks when determining a group risk indicator. The article also presents an adaptive model that combines group indicators into a single complex indicator and approaches to establishing the acceptable value of this indicator. It allows to quantify the level of metrological risk and determine the critical limits for the production process.

Besides, the scales of significance of consequences, probability of occurrence and detection used to determine single indicators of metrological risks were studied. Several disadvantages of such scales were identified, in particular: 88% of the range of possible values remains unused (only 120 out of 1000 values are used), ambiguity of results and

different sensitivities. Thus, it is proposed to switch to non-linear scales for determining S, O and D. In this way, the obtained values of the products of these indicators are more evenly distributed over the entire range of possible values, and the product of the average values is located closer to the middle of the range.

It is proposed to evaluate the efficiency of activities to minimize risks, focusing on two key criteria: the relative reduction of the complex risk indicator and the ratio of the costs of implementing activities to possible losses that were avoided. This makes it possible to reasonably choose the optimal strategies for managing metrological risks and increase the efficiency of production processes.

Chapter four presents a method for forecasting metrological risks by utilizing neural networks to analyze time series. Six models were investigated, in particular: Facebook Prophet, Statsmodels SARIMAX, Forecaster Recursive, Forecaster Direct, LGBM Regressor, Linear Regression. The accuracy of the models was assessed by four metrics: Mean Absolute Error (MAE), Mean Absolute Percentage Error (MAPE), Root Mean Square Error (RMSE), and Correlation Coefficient (R square or R²). According to the results of the research, the best results were demonstrated by the Facebook Prophet model (MAE = 0.019, RMSE = 0.024, R² = 0.861). This indicates its high accuracy and ability to detect trends in metrological risks. Statsmodels SARIMAX showed acceptable accuracy (MAE = 0.022, R² = 0.799). Other models were less effective. Moreover, the dependence of model accuracy on the size of the training data and the length of the forecasting window was investigated. It was found that by increasing the historical period for training and decreasing the forecasting horizon, the error decreases and vice versa: with a short training period and a long forecasting period, the error increases.

To simplify the process of assessing metrological risks, software has been developed as a web application with client and server parts. The frontend is implemented in React with JSX, which provides modularity, interactivity and ease of development. The backend is developed in Python with the FastAPI framework. The application's functionality includes creating a risk register, analyzing and evaluating a

complex indicator, forecasting risks, assessing the effectiveness of minimization activities, and automatically generating reports.

The results of the thesis research were tested at a juice production company. The factors influencing the technological process were identified and analyzed. The key metrological risks that can change the quality indicators of raw materials and parameters of finished products were identified. Based on this analysis, a risk register was created, which describes the possible causes of the risk event, the significance of its consequences and possible actions to minimize it. According to the results of the assessment, it was found that the complex indicator of metrological risk for this enterprise is 0.3357 (or 33.6%), while the acceptable value is 0.5315 (or 53.15%). This gives reason to consider the value of the complex indicator acceptable.

Keywords: product quality, metrological support, risk management, quality control, complex risk indicator, standards, mathematical model, risk forecasting, machine learning, risk sources, product life cycle, product manufacturing.

СПИСОК ПРАЦЬ ОПУБЛІКОВАНИХ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ
Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації

1. Артемук О.-С., Микийчук М., "Метод прогнозування метрологічних ризиків якості продукції", *Measuring and computing devices in technological processes*, vol. 4, pp. 179–186, 2024, doi: <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-80-22>.

2. Корчинська О.-С., Микийчук М., "Джерела метрологічних ризиків як фактори впливу на технологічний процес", *«Вісник Черкаського державного технологічного університету»*, vol. 28, no. 1, pp. 61-71, 2023, doi: <https://doi.org/10.24025/2306-4412.1.2023.273708>.

3. Korchynska O.-S., Hut T., "Metrological risks in management system of product quality at the manufacturing stage", *Міжвідомчий науково-технічний збірник «Вимірювальна техніка та метрологія»*, том 83, випуск 1, с. 29-34, 2022, doi: <https://doi.org/10.23939/istcmtm2022.01.029>.

4. Бойко Т., Корчинська О.-С. «Оцінка ризиків процесів життєвого циклу продукції постачальників на основі результатів їх аудиту відповідно до стандарту VDA 6.3». *Міжвідомчий науково-технічний збірник «Вимірювальна техніка та метрологія»*, № 78, с. 93–100. 2017 DOI: <https://doi.org/10.23939/istcmtm2017.78.093>.

Праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

1. Artemuk O.-S., Mykyuchuk M. «Specifics of the metrological risk assessment system». The 6th International scientific and practical conference “Current trends in scientific research development”. Boston, USA, 2025.

2. Artemuk O.-S., Mykyuchuk M. «Determining metrological risks minimization efficiency». The 6th International scientific and practical conference “Scientific research: modern challenges and future prospects”. Munich, Germany, 2025.

3. Артемук О.-С., Микийчук М. «Одиничні показники системи визначення комплексного показника розміру метрологічного ризику», VI МНПК

"Управління якістю в освіті та промисловості: досвід, проблеми та перспективи", Львів, Україна, 2023.

4. Korchynska O-S.I., Mykyuchuk M.M. «Identification of metrological risks sources», II International Scientific and Practical Conference «Current questions of modern science, Tallin, Estonia, (January 12-13, 2023).

5. Корчинська О-С., Микийчук М. «Оцінювання розміру метрологічного ризику на етапі виготовлення продукції», V Міжнародна науково-практична конференція управління якістю в освіті та промисловості: досвід, проблеми та перспективи, Львів, Україна, 2021.

6. Бойко Т., Корчинська О-С. «Ризик-орієнтований підхід в новому стандарті ІАТФ 16949:2016». IV Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих вчених у царині метрології «Technical Using of Measurement-2018». Славське, Україна. 2018.

7. Бойко Т., Корчинська О-С. «Оцінювання ризиків процесів життєвого циклу продукції постачальників за результатами їх аудиту». Восьма міжнародна науково-технічна конференція пам'яті професора Ігоря Кісіля. Івано-Франківськ, Україна. 2017.

8. Бойко Т., Корчинська О.-С. «Вдосконалення експертних шкал в методі FMECA з використанням Fuzzy Logic». Управління якістю в освіті та промисловості: досвід, проблеми та перспективи: тези доповідей III Міжнародної науково-практичної конференції пам'яті професора Петра Столярчука, 11–12 травня 2017 року, Львів.

9. Boyko T., Kochan R., Korghynska O-S. «The risks of supplier processes according to the requirements of the process audit standard». SGEM International Multidisciplinary Scientific GeoConference EXPO Proceedings (Albena, Bulgaria, 2-8 July, 2018). Vol. 18. Issue 5.3. 2018. P. 943–949. <http://dx.doi.org/10.5593/sgem2018/5.3/s28.120>.

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень	16
ВСТУП.....	17
Розділ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ЗАСТОСУВАННЯ ТЕОРІЇ МЕТРОЛОГІЧНИХ РИЗИКІВ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ПРОДУКЦІЇ НА ЕТАПІ ВИГОТОВЛЕННЯ.....	23
1.1. Дослідження теоретичних засад метрологічних ризиків.....	23
1.2. Процес управління метрологічними ризиками якості продукції.....	36
1.3. Аналіз методів оцінювання ризиків	42
1.4. Висновки до розділу 1	53
РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОБЛЕМАТИКИ ОЦІНЮВАННЯ ТА ЗАСТОСУВАННЯ ТЕОРІЇ МЕТРОЛОГІЧНИХ РИЗИКІВ.....	54
2.1. Дослідження факторів впливу на технологічний процес.....	54
2.2. Специфіка системи оцінювання метрологічних ризиків	66
2.3. Розроблення концепції управління метрологічними ризиками	75
2.4. Висновки до розділу 2	90
РОЗДІЛ 3. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ СИСТЕМИ ОЦІНЮВАННЯ МЕТРОЛОГІЧНИХ РИЗИКІВ	92
3.1. Математична модель комплексного показника рівня метрологічного ризику	92
3.2. Вдосконалення шкал для визначення одиничних показників.....	106
3.3. Математична модель визначення ефективності мінімізації метрологічних ризиків	116
3.4. Висновки до розділу 3	120
РОЗДІЛ 4. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	122

4.1. Метод прогнозування метрологічних ризиків	122
4.2. Програмне забезпечення системи оцінювання метрологічних ризиків ...	132
4.3. Апробація результатів дослідження.....	140
4.4. Висновки до розділу 4	145
ВИСНОВКИ.....	148
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ.....	150
ДОДАТКИ.....	161

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

МР – метрологічний ризик

ТП – технологічний процес

МЗВ – метрологічне забезпечення виробництва

МЗ – метрологічне забезпечення

ЗВТ – засіб вимірювальної техніки

СУЯ – система управління якістю

ПЗ – програмне забезпечення

ВСТУП

Актуальність теми. В сучасних умовах жорсткої конкуренції та підвищених вимог до якості продукції ключовим чинником успішності підприємств є забезпечення точності вимірювань та контроль якості на всіх етапах виробництва. Метрологічні ризики, пов'язані з похибками вимірювань, технічними збоями обладнання, людськими помилками чи зовнішніми факторами, безпосередньо впливають на якість продукції, економічну ефективність та репутацію компаній.

Існуючі методи оцінювання та управління метрологічними ризиками часто не враховують специфіку сучасних виробничих процесів, а їхня ефективність обмежується недостатньою інтеграцією в системи управління якістю. Водночас, розвиток математичних моделей, автоматизованих методів прогнозування та програмних рішень створює нові можливості для вдосконалення підходів до управління метрологічними ризиками.

Особливої актуальності це питання набуває для підприємств, де похибки у вимірюваннях можуть призводити до серйозних наслідків, таких як дефекти продукції, економічні збитки чи технологічні аварії. Вирішення цієї проблеми вимагає розроблення інтегрованої концепції оцінювання та мінімізації метрологічних ризиків, яка базуватиметься на сучасних математичних підходах, автоматизації та цифровізації процесів.

Окрім цього, підвищення ефективності управління метрологічними ризиками має стратегічне значення для забезпечення сталого розвитку підприємств у контексті впровадження інноваційних технологій, таких як Інтернет речей (IoT) та Промисловість 4.0. Це дозволить не лише покращити якість продукції, але й підвищити загальну конкурентоспроможність вітчизняних виробників на міжнародних ринках.

Таким чином, дослідження, спрямоване на розробку математичних моделей, методів прогнозування та практичних рішень для оцінювання метрологічних

ризиків на етапі виготовлення продукції, є надзвичайно важливим для забезпечення конкурентоспроможності та сталого розвитку підприємств.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційну роботу виконано здобувачем в Національному університеті «Львівська політехніка» на кафедрі Інформаційно-вимірювальних технологій. Тема роботи відповідає науковому напрямку кафедри – теоретичні та прикладні основи метрології і вимірювань в інформаційних технологіях (інформаційно-вимірювальних, кібер-фізичних, робототехнічних та інших системах); тестування якості продукції і програмного забезпечення.

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційного дослідження є розроблення комплексної моделі оцінювання та управління метрологічними ризиками якості продукції на етапі виготовлення. Для досягнення мети даної роботи потрібно виконати наступні завдання:

1. Проаналізувати сучасний стан теорії метрологічних ризиків і методів їх оцінювання.
2. Дослідити фактори що впливають на виникнення метрологічних ризиків у виробничих процесах та здійснити їх класифікацію.
3. Сформувати вимоги та розробити концепцію управління метрологічними ризиками.
4. Розробити математичну модель оцінювання метрологічних ризиків та визначення ефективності їх мінімізації.
5. Розробити методіку прогнозування метрологічних ризиків та програмне забезпечення для інтеграції оцінювання ризиків у виробничі процеси.
6. Провести апробацію розроблених методів і моделей на практиці.

Об'єктом дослідження є управління метрологічними ризиками якості продукції на етапі її виготовлення.

Предметом дослідження є методи та моделі оцінювання, прогнозування та мінімізації метрологічних ризиків, що впливають на якість продукції.

Методи дослідження. У дисертації використано теоретичні аспекти інформаційно-виміральної техніки та метрології, а також застосовано сукупність методів: критичного та порівняльного аналізу, математичного моделювання, машинного навчання, комп'ютерного моделювання та методів об'єктно-орієнтованого проектування. Методом критичного та порівняльного аналізу проаналізовано сучасний стан теорії метрологічних ризиків і методів їх оцінювання, а також визначено переваги та недоліки кожного з підходів.

Математичне моделювання та методи системного аналізу використано для побудови та дослідження системи оцінювання й мінімізації метрологічних ризиків на етапі виготовлення продукції, зокрема для формалізації закономірностей і залежностей у оцінювання значущості та ймовірності виникнення ризиків. Методи машинного навчання й комп'ютерного моделювання застосовано для розроблення, навчання й перевірки нейронних мереж, призначених для прогнозування рівня метрологічних ризиків. Під час дослідження також використано програмно-аналітичні методи об'єктно-орієнтованого проектування з метою створення програмного забезпечення, що реалізує запропоновані моделі та алгоритми оцінювання метрологічних ризиків.

Наукова новизна отриманих результатів

1. Вперше розроблено математичну модель визначення комплексного показника рівня метрологічного ризику якості продукції, на базі запропонованих шкал оцінок, що забезпечує об'єктивне оцінювання рівня метрологічних ризиків у складних виробничих системах на етапі виготовлення продукції.

2. Запропоновано для оцінювання одиничних показників комплексної моделі використовувати шкали значущості наслідків, ймовірності виявлення та ймовірності виникнення метрологічних ризиків, що дозволяє розширити діапазон та підвищити чутливість оцінок.

3. Удосконалено математичну модель визначення ефективності мінімізації метрологічних ризиків, яка враховує оцінку відносного зменшення рівня комплексного показника метрологічного ризику після впровадження відповідних

коригувальних заходів та відношення витрат до потенційних втрат, що дозволяє визначити найбільш ефективні заходи для зменшення метрологічних ризиків при мінімальних ресурсних витратах.

4. Вперше розроблено метод прогнозування метрологічних ризиків із використанням нейронних мереж для аналізу часових рядів, що забезпечує визначення динаміки ризиків в часі та дозволяє оперативно реагувати на зміни умов виробництва та своєчасно впроваджувати коригувальні заходи.

5. Подальшого розвитку набула методологія ризик-менеджменту метрологічного забезпечення якості продукції, що дозволяє інтегрувати такий підхід до нормативної бази систем управління якістю на виробництві та сприяє ефективнішому контролю якості продукції та зменшує ймовірність виникнення критичних невідповідностей.

Практичне значення одержаних результатів

1. Здійснена класифікація факторів впливу на технологічний процес дозволяє ідентифікувати джерела метрологічних ризиків, систематизувати їх та забезпечує можливість точного визначення пріоритетних напрямів для мінімізації ризиків.

2. Розроблена концепція системи управління метрологічними ризиками, що охоплює етапи планування, оцінювання та опрацювання ризиків, встановлює чітку послідовність дій для комплексного управління ризиками. Її застосування сприяє системному підходу до виявлення, аналізу та розробки заходів з мінімізації ризиків у виробничих процесах.

3. Розроблені алгоритми та програмні компоненти для прогнозування метрологічних ризиків на основі нейронних мереж дають змогу оцінити динаміку ризиків, визначити оптимальні моделі прогнозування залежно від необхідного рівня похибки та отримати залежності похибки моделі від розміру даних для навчання та прогнозування.

4. Розроблене програмне забезпечення із використанням Python, FastAPI та React забезпечує автоматизацію процесів оцінювання метрологічних ризиків. Воно включає функціонал для формування реєстру ризиків, їх оцінювання,

прогнозування, планування заходів мінімізації та автоматичного створення звітів, що значно спрощує впровадження ризик-орієнтованого підходу на підприємствах.

5. Результати дослідження апробовані на виробництві та впроваджені у навчальний процес Національного університету «Львівська політехніка», що підтверджено відповідними актами в додатках А та Б. Це демонструє практичну цінність розробок для оптимізації метрологічного забезпечення у реальних виробничих умовах, а також їх корисність для підготовки фахівців у відповідній галузі.

Особистий внесок здобувача. Основний зміст роботи, всі теоретичні та практичні результати, висновки і дослідження, що представлено до захисту, отримано автором самостійно. Робота містить прикладні положення та висновки, сформульовані здобувачем особисто. Ідеї, висновки, гіпотези чи досягнення інших авторів, використовуються лише для підкріплення результатів та ідей здобувача та мають відповідні посилання. Постановку завдань, обговорення результатів та підготовку публікацій до друку здійснено під керівництвом д.т.н., проф. Микийчука М.М.

Апробація результатів дисертації. Результати дисертаційного дослідження апробовано на міжнародних наукових та науково-практичних конференціях:

- The 6th International scientific and practical conference “Scientific research: modern challenges and future prospects”, Munich, Germany, (January 20-22, 2025).
- The 6th International scientific and practical conference “Current trends in scientific research development”, Boston, USA, (January 16-18, 2025).
- VI МНПК "Управління якістю в освіті та промисловості: досвід, проблеми та перспективи", Львів, Україна, (16-17.11.2023).
- II International Scientific and Practical Conference «Current questions of modern science, Tallin, Estonia, (January 12-13, 2023).

- V Міжнародна науково-практична конференція управління якістю в освіті та промисловості: досвід, проблеми та перспективи, Львів, Україна, (20-21.05.2021).
- IV Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих вчених у царині метрології «Technical Using of Measurement-2018». Славське, Україна. (12-13.02.2018).
- Восьма міжнародна науково-технічна конференція пам'яті професора Ігоря Кісіля. Івано-Франківськ, Україна. (14-16.11.2017).
- SGEM International Multidisciplinary Scientific GeoConference EXPO Proceedings. Albena, Bulgaria. (2-8 July, 2018).
- III Міжнародна науково-практична конференція пам'яті професора Петра Столярчука, Львів, Україна, (11–12 травня 2017).

Також результати доповідалися на семінарах кафедри інформаційно-вимірювальних технологій Національного університету «Львівська політехніка».

Публікації. Основні положення дисертації опубліковано у 13 наукових працях, з яких: 4 статті у наукових фахових виданнях України та 9 наукових публікацій у збірниках матеріалів та тез конференцій, з яких 1 включена до наукометричних баз даних Web of Science, Scopus.

Структура й обсяг дисертації. Робота складається із анотації, змісту, вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел із 98 найменувань та 6 додатків. Загальний обсяг дисертації складає 188 сторінок, з них 148 сторінок основного тексту, що містять 25 таблиць, 39 рисунків та 47 формул. За структурою, мовою та стилем викладення дисертація відповідає вимогам МОН України. Робота написана грамотною українською мовою з використанням сучасної наукової термінології, а стиль викладення матеріалу є послідовним та логічним.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ЗАСТОСУВАННЯ ТЕОРІЇ МЕТРОЛОГІЧНИХ РИЗИКІВ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ПРОДУКЦІЇ НА ЕТАПІ ВИГОТОВЛЕННЯ

1.1. Дослідження теоретичних засад метрологічних ризиків

Особливість сучасного управління якістю полягає в тому, що якщо раніше підприємства приймали компромісні рішення щодо обсягу виробництва, термінів поставок, витрат та якості, то нині пріоритетом стає саме якість продукції. Уся діяльність підприємства спрямована на досягнення цієї мети, а управління всіма його процесами організовується з урахуванням інтересів забезпечення високої якості.

Управління якістю - це концепція, що передбачає комплексний і скоординований підхід до застосування систем та методів управління якістю у всіх аспектах діяльності підприємства: від досліджень та розробок до супровідного обслуговування. Вона передбачає участь керівництва та працівників на всіх рівнях та раціональне використання наявних технічних ресурсів. Ця система об'єднала найкращі практики світового досвіду, спрямовані на створення продукції високої якості (рис.1.1) [1].

Стандарти серії ISO 9000 [2-6], прийняті як національні в більш ніж 190 країнах світу, можуть застосовуватися до будь-яких підприємств, незалежно від їхнього розміру, форми власності чи сфери діяльності. Ця серія стандартів є універсальною і охоплює всі види продукції в промисловому та економічному секторах. Основна ідея ISO 9000 та інших стандартів цієї серії полягає в економічно доцільному застосуванні принципу довіри. Це сприяє ефективному використанню ресурсів як окремого підприємства, так і економіки в цілому [1].

Основним завданням міжнародних стандартів серії ISO 9000 є впровадження єдиного, загальновизнаного у світі підходу до визначення договірних умов

оцінки СУЯ та регулювання відносин між покупцем і постачальником продукції. При цьому пріоритетом залишається чітка орієнтація на вимоги споживача [2,7].



Рисунок 1.1. Структура системи управління якістю

Ризик-менеджмент є ключовим елементом стратегічного управління організацією. Він являє собою процес, який дозволяє систематично аналізувати ризики в різних аспектах діяльності з метою досягнення максимальної ефективності кожного етапу роботи та загальної діяльності підприємства [2, 8].

Основними завданнями ризик-менеджменту є ідентифікація та управління ризиками. Його головна мета полягає у сприянні максимізації вартості організації. Це передбачає виявлення всіх можливих «негативних» і «позитивних» факторів, які впливають на діяльність компанії. Ризик-менеджмент має бути безперервним та динамічним процесом, який оцінює розвиток

підприємства, враховуючи його минуле, поточний стан та перспективи на майбутнє [2, 9].

Згідно з [2, 10-12], ризик-менеджмент вкрай важливий для досягнення результативної СУЯ, як важливого інструменту забезпечення якості продукції на етапі виготовлення. Останнім часом питання метрологічних ризиків набули особливої актуальності. Неточності вимірювань, технічні збої в обладнанні, людські помилки та несприятливі виробничі умови створюють значні загрози для якості продукції та ефективності процесів. Ці ризики можуть мати як короткострокові наслідки, такі як погіршення продуктивності, так і довгострокові - наприклад, репутаційні втрати чи серйозні фінансові збитки.

Оцінка наявних методів зменшення метрологічних ризиків та вибір оптимального рішення в кожному конкретному випадку є ключовим завданням ризик-менеджменту в сфері метрології.

Правильне реагування на такі ризики дозволяє не лише знизити ймовірність виникнення помилок, але й створює значну додану вартість як для підприємства, так і для кінцевого споживача продукції [13-16].

Невизначеність та ризик є невід'ємною частиною діяльності будь-якого сучасного підприємства. Система управління ризиком включає в себе процеси ідентифікації та аналізу ризику, оцінку його допустимості та визначення потенційних можливостей зниження розміру ризику за допомогою вибору, реалізації та контролю відповідних дій. Важливим питанням діяльності підприємства є процес управління метрологічними ризиками, як основними ризиками, які визначають ступінь управління технологічними процесами, рівень контролю якості продукції, а отже, і витрати на її забезпечення [17].

На етапі виготовлення продукції підприємство має передбачати та реалізовувати заходи щодо аналізування ризиків та можливостей. Їх аналіз слугує основою для покращення якості продукції та результативності СУЯ, сприяє отриманню кращих результатів та мінімізує негативні наслідки. Незалежно від того, наскільки добре управляється підприємство, нещасні випадки будуть

відбуватися, ризик ніколи не може бути відсутнім [18, 19]. Діяти як превентивний інструмент - одна з головних цілей СУЯ.

Ризик - це вплив невизначеності на цілі. Будь-яка невизначеність може вплинути на якість продукції як позитивно так і негативно [20]. Позитивний вплив, викликаний ризиком, може забезпечувати можливість, але не кожен такий вплив ризику приведе до можливості.

Згідно з [21], система керування вимірюванням - це сукупність взаємопов'язаних або взаємодійних елементів, необхідних для забезпечення метрологічного підтвердження та постійного контролю процесів вимірювання.

Результативна система керування вимірюванням забезпечує придатність вимірювального обладнання та процесів вимірювання для використання за призначенням й відіграє важливу роль у досягненні цілей щодо якості продукції на етапі виготовлення та в керуванні метрологічними ризиками спричиненими невірогідними результатами вимірювання, які негативно впливають на якість продукції на етапі виготовлення.

Метрологічний ризик - це ризик, пов'язаний із похибками чи невизначеністю у вимірюваннях, які можуть призвести до неправильних висновків, рішень чи дій. Він виникає через неточність вимірювальних приладів, методів, умов навколишнього середовища або людського фактора.

Метрологічна діяльність зустрічається з різноманітними ризиками. Для підвищення результативності та ефективності роботи підприємства керівництву необхідно поглиблювати знання в галузі управління МР, розробивши та впровадивши власну задокументовану методика управління МР. Такий процес є одним з елементів, необхідних для забезпечення метрологічного підтвердження та постійного контролю процесів вимірювання. Впровадження систем управління МР на виробництві сприяє підвищенню ефективності промислових систем вимірювань та зменшенню витрат при забезпеченні якості продукції. Основним завданням оцінювання МР є систематизація можливих

невідповідностей, що можуть виникнути при контролі якості продукції та ранжування МР за рівнем потенційної небезпеки.

Головною метою системи метрологічного забезпечення вимірювань є створення умов для отримання вимірювальної інформації, яка має властивості, необхідні та достатні для розробки певних рішень. Виходячи з цього, основним ризиком системи метрологічного забезпечення вимірювань є отримання інформації про вимірювання, яка не має необхідних властивостей, достатніх для розробки необхідних рішень. Наслідком цього ризику є прийняття неправильного (помилкового) рішення. В принципі, неправильне (помилкове) управлінське рішення може завдати значної шкоди підприємству, тому дуже важливо розробити механізм зменшення такого роду ризиків.

На сьогоднішній день не розроблено єдиної загальноприйнятої методики для оцінювання МР, а більшість компаній працюють за стандартом ISO 31000 [20]. Цей стандарт забезпечує загальну основу для управління ризиками, що дозволяє його вдосконалювати та інтегрувати в систему метрологічного управління організації [22]. Існуючі підходи мають вузькоспеціалізований характер та не враховують усі аспекти МР, які впливають на якість продукції на етапі її виготовлення. Така методика має враховувати специфіку МР та поєднувати переваги існуючих підходів для забезпечення всебічного аналізу, адаптованого до вимог сучасного виробництва.

У сфері управління ризиками розроблено чимало загальновизнаних концепцій та стандартів. Першим із них вважається розроблений 1995 року австралійським органом стандартизації. Згодом подібні нормативи з'явилися в Канаді, Японії, США та Великобританії. Крім того, національні органи зі стандартизації та урядові структури в різних країнах також займалися розробкою подібних документів.

Усі згадані стандарти мають загальні принципи та подібні підходи до управління ризиками. Найбільш відомим та поширеним серед них став австралійський стандарт AS 4360 (2004), однак у 2009 році його замінив

міжнародний стандарт ISO 31000. Також варто зазначити, що в багатьох організаціях знайшла широке застосування модель COSO ERM (enterprise risk management), що має вигляд куба. Британський стандарт BS 31100:2011 «Управління ризиками: Кодекс практики та настанови щодо впровадження BS ISO 31000» був опублікований у 2011 році. Подальші настанови до стандарту ISO були опубліковані в 2013 році як ISO/TR 31004:2013 «Управління ризиками - Наставни щодо впровадження ISO 31000» [13].

Міжнародний стандарт ISO 31000 (2009) «Управління ризиками: Принципи та настанови» був опублікований у другій половині 2009 року. Цей стандарт ISO було оновлено, та нова версія була опублікована на початку 2018 року як ISO 31000 (2018), «Управління ризиками - Наставни». ISO 31000 має міжнародне визнання та є дуже впливовим стандартом управління ризиками. Хоча деякі стандарти є більш визнаними, ніж інші, організаціям слід обрати підхід, який найбільше відповідає їхній конкретній ситуації. У таблиці 1.1 наведено стислий опис найбільш поширених стандартів і систем управління ризиками.

Таблиця 1.1.

Стандарти управління ризиками

Стандарт	Опис	Посилання
Інститут управління ризиками, Institute of Risk Management (IRM)	Стандарт, розроблений спільно компаніями Airmic, Alarm та IRM (2002)	Рисунок 1.2
COSO ERM куб	Структура, розроблена Комітетом спонсорських організацій Комітету Тредвея (2004)	Рисунок 1.3
Стандарт ISO 31000 ДСТУ ISO 31000:2018 Менеджмент ризиків. Принципи та настанови (ISO 31000:2018, IDT)	Опублікований Міжнародною організацією зі стандартизації (2018)	Рисунок 1.4
CoCo (Criteria of Control)	Концептуальні засади, розроблені Канадським інститутом присяжних бухгалтерів (1995)	Рисунок 1.5

Один з найвідоміших і найпоширеніших стандартів управління ризиками був розроблений IRM у 2002 році у співпраці з компаніями Airmic та Alarm. Стандарт

IRM - це підхід високого рівня, орієнтований на фахівців, які не займаються управлінням ризиками, він був перекладений багатьма мовами. Австралійський стандарт і куб COSO ERM призначені для використання в першу чергу фахівцями-практиками з управління ризиками. Процес управління ризиками, що використовується в стандарті IRM, відтворено на рисунку 1.2.

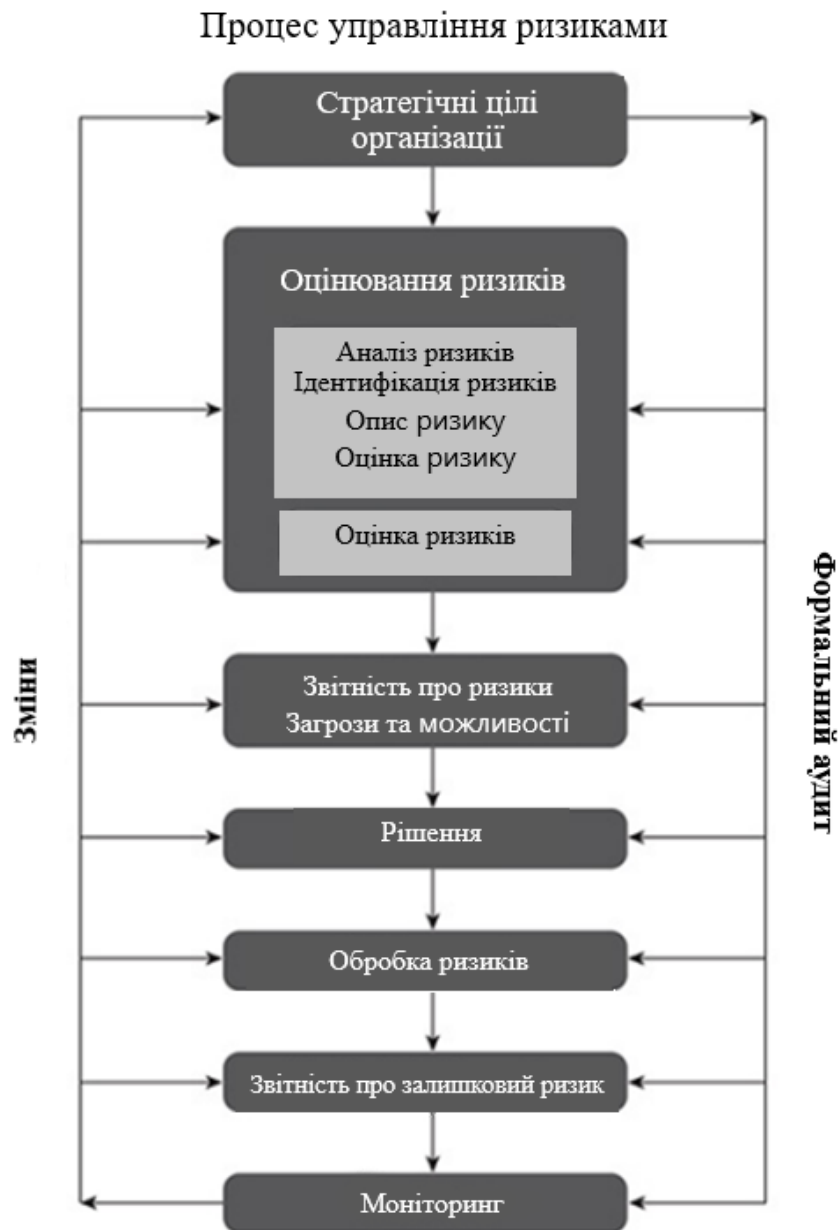


Рисунок 1.2. Процес управління ризиками IRM

Куб внутрішнього контролю COSO (2013) став найбільш широко використовуваною системою внутрішнього контролю в Сполучених Штатах і був прийнятий та/або адаптований багатьма країнами та компаніями по всьому світу. У 2004 році було створено версію куба COSO для управління ризиками підприємства, яка охоплює як управління ризиками, так і внутрішній контроль. Хоча в середині 2017 року COSO опублікувала оновлену концепцію ERM, структура куба COSO ERM (2004) продовжує використовуватися як основа для багатьох ініціатив з ERM [23].

Підхід, прийнятий у кубі COSO ERM, передбачає, що управління ризиками підприємства не є суто послідовним набором заходів, де один компонент впливає лише на наступний. Воно розглядається як багатовекторний, ітеративний процес, в якому майже будь-який компонент може впливати і впливає на всі інші компоненти [24]. У кубі COSO ERM існує прямий зв'язок між цілями, тобто тим, чого прагне досягти організація, і компонентами управління ризиками підприємства, які представляють те, що необхідно для їх досягнення. Цей взаємозв'язок зображено у тривимірній матриці у вигляді куба, і в подальшому він буде відтворений як рис. 1.3 [25, 26].

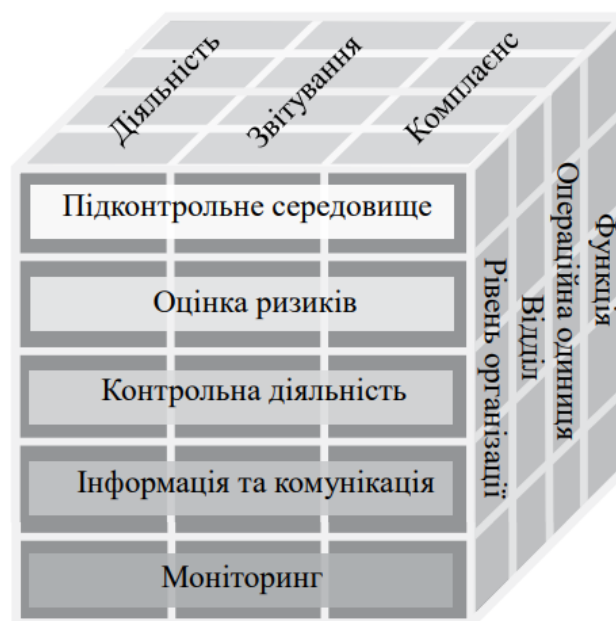


Рисунок 1.3. Структура ERM

Куб COSO ERM є дуже впливовою системою управління ризиками і складається з восьми взаємопов'язаних компонентів. Вони виходять з того, як керівництво керує підприємством, та інтегровані з процесом управління.

Короткий опис компонентів куба COSO ERM:

- Внутрішнє середовище - внутрішнє середовище визначає тон організації і створює основу для того, як розглядається і вирішується питання ризику.
- Постановка цілей - цілі повинні існувати до того, як керівництво зможе визначити потенційні події, що впливають на їх досягнення.
- Ідентифікація подій - внутрішні та зовнішні події, що впливають на досягнення цілей, повинні бути ідентифіковані, розрізняючи ризики та можливості.
- Оцінка ризиків - ризики аналізуються з урахуванням ймовірності та впливу, що є основою для визначення того, як ними слід управляти.
- Реагування на ризики - керівництво обирає способи реагування на ризики: уникнення, прийняття, зменшення або розподіл ризиків.
- Діяльність з контролю - розробляються та впроваджуються політики та процедури, які допомагають забезпечити ефективне реагування на ризики.
- Інформація та комунікація - відповідна інформація виявляється, фіксується та передається, щоб люди могли виконувати свої обов'язки.
- Моніторинг - весь процес управління ризиками на підприємстві контролюється, і за необхідності вносяться зміни.

Згідно з описом моделі куба COSO ERM, керівництво організації, спираючись на визначену місію або бачення, формулює стратегічні орієнтири, вибирає відповідні стратегії, а також встановлює взаємопов'язані цілі, які поширюються на всі рівні підприємства [27].

ISO 31000:2018, ДСТУ ISO 31000:2018 Менеджмент ризиків. Принципи та настанови (ISO 31000:2018, IDT) має той самий формат, що й попередня версія ISO 31000 від 2009 року. Стандарт містить опис принципів, структури й самого

процесу управління ризиками. В основі цих принципів знаходиться ключова мета управління ризиками, сформульована як «створення та захист цінності». Нижче наведено стислий виклад восьми таких принципів:

1. Управління ризиками має бути інтегровано в усі напрями діяльності організації.
2. Слід застосовувати комплексний та структурований підхід.
3. Процеси й структура управління ризиками повинні бути адаптовані до особливостей організації та відповідати масштабам діяльності.
4. Важливим є своєчасне та належне залучення всіх зацікавлених сторін.
5. Управління ризиками включає прогнозування, виявлення, врахування та реагування на зміни.
6. Управління ризиками завжди повинно враховувати обмеження, пов'язані з доступністю інформації.
7. Вплив людських і культурних факторів має бути врахований на всіх етапах управління ризиками.
8. Управління ризиками потребує постійного розвитку й удосконалення на основі набутого досвіду та навчання.

Стандарт також містить інформацію про розробку системи управління ризиками. Система представлена як модель безперервного вдосконалення. Детальна інформація в стандарті описує необхідні характеристики системи управління ризиками, які потрібні для досягнення безперервного вдосконалення.

Схема, що використовується для ілюстрації процесу управління ризиками в ISO 31000, відтворена на рисунку 1.4. На рисунку містяться елементи системи управління ризиками, а також ключові етапи процесу управління ризиками.

Цікавим моментом є те, що процес управління ризиками не показано у вигляді серії заходів або етапів зі з'єднувальними стрілками. У цьому відношенні нове представлення процесу в ISO 31000 подібне до підходу, застосованого в кубі COSO ERM для представлення восьми компонентів ERM. ISO 31000 визнає цю

подібність, наголошуючи, що хоча процес управління ризиками зазвичай зображується як послідовний, на практиці він має ітеративний характер.

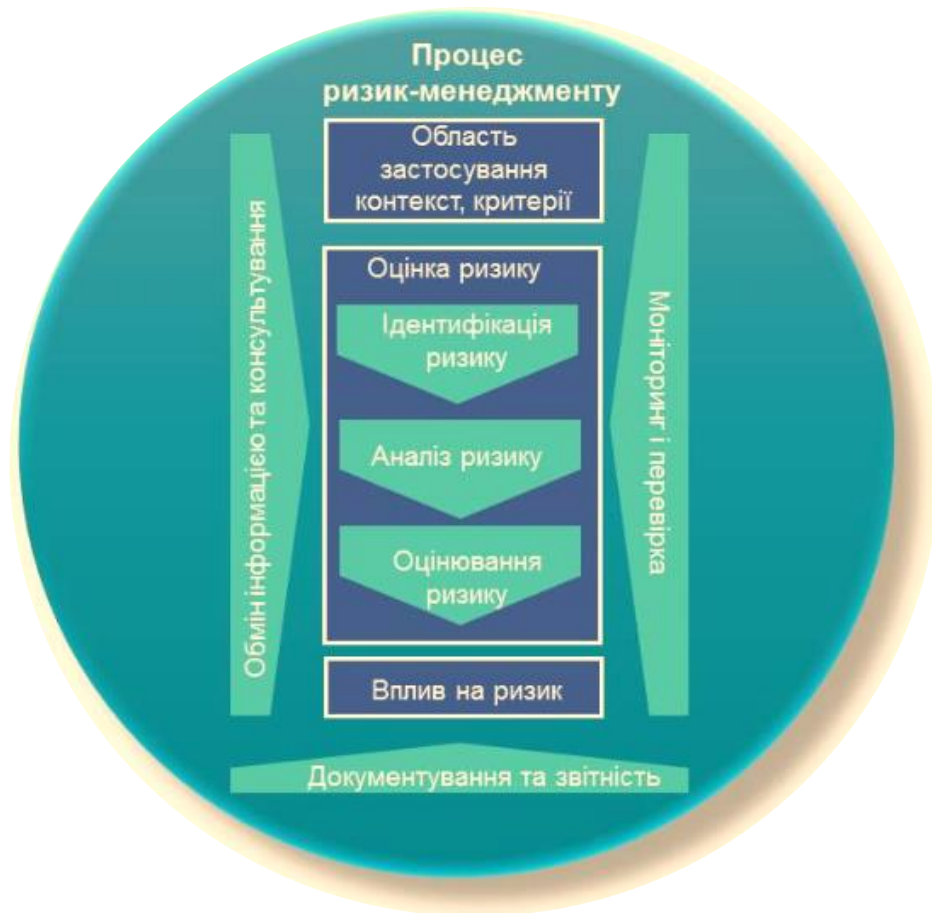


Рисунок 1.4. Процес ризик-менеджменту за ISO 31000 (2018)

На додаток до розробки ISO 31000 і «Керівництва з термінології управління ризиками» Guide 73, була також завершена робота над «Керівництвом з методів оцінки ризиків». ISO/IEC 31010 «Управління ризиками: Методи оцінки ризиків» є дуже вичерпною публікацією, яка відображає сучасні передові практики вибору та використання методів оцінки ризиків [28].

Структура критеріїв контролю, також відома як CoCo, розроблена Канадським інститутом дипломованих бухгалтерів (CICA), є структурованим засобом вимірювання якості контрольного середовища в організації. Концепція CoCo вважає, що якщо контрольне середовище є задовільним, діяльність з

управління ризиками та внутрішнього контролю здійснюватиметься успішно та належним чином.

Структура CoSo представлена на рисунку 1.5. Структура складається з чотирьох компонентів, які представлені у вигляді безперервного циклу. Компоненти базуються на відчутті орієнтації організації, відчутті ідентичності та цінностей, відчутті компетентності та відчутті еволюції.

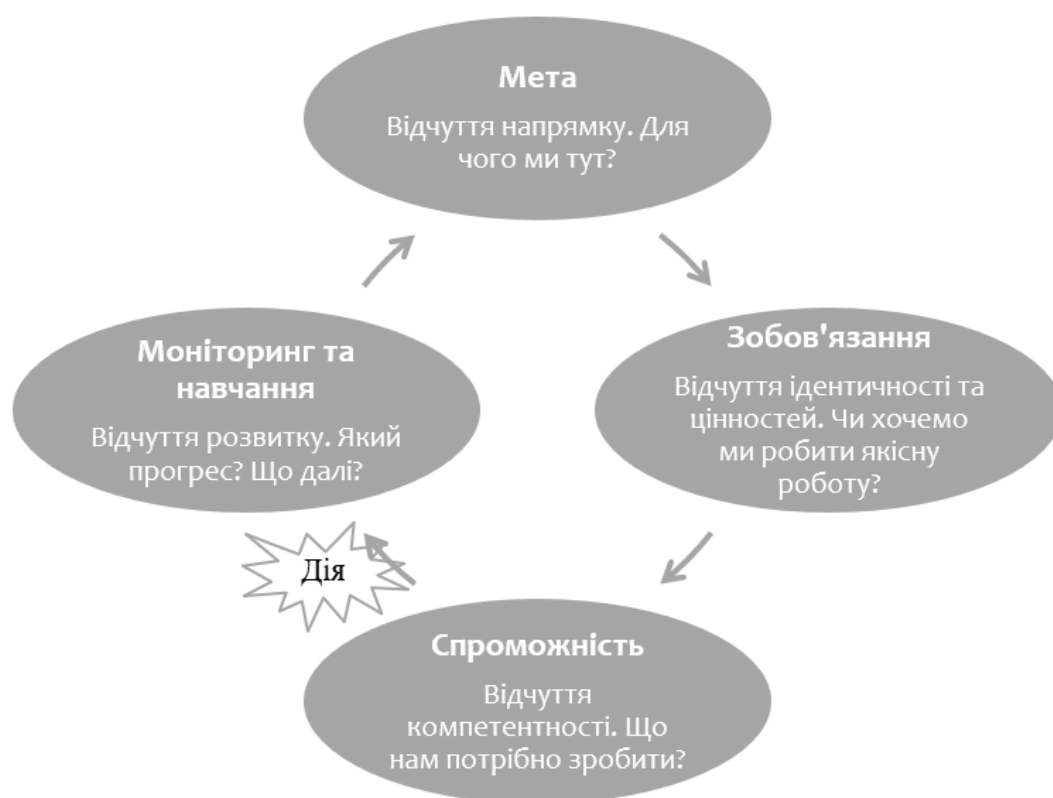


Рисунок 1.5. Структура критеріїв контролю (CoSo)

Організації використовують концепцію CoSo як засіб порівняльного аналізу відповідності компоненту внутрішнього контролю кубу COSO ERM. Отже, цей підхід ґрунтується на системі, яка є поєднанням CoSo та решти семи компонентів куба COSO ERM. Конкретні вимоги до кожного з чотирьох компонентів системи CoSo, які зазначені нижче:

- мета;

- зобов'язання;
- спроможність;
- моніторинг та навчання.

Мета. Необхідно встановити цілі та повідомити про них. Необхідно визначити та оцінити значні внутрішні та зовнішні ризики. Необхідно розробити, довести до відома та впровадити політику. Плани повинні бути розроблені та доведені до відома. Плани повинні включати вимірювані цілі та показники ефективності.

Зобов'язання. Необхідно встановити, довести до відома та практикувати спільні етичні цінності. Кадрова політика повинна відповідати етичним цінностям. Повноваження, відповідальність та підзвітність мають бути чітко визначені. Необхідно розвивати взаємну довіру для підтримки потоку інформації.

Спроможність. Люди повинні мати необхідні знання, навички та інструменти. Комунікаційні процеси повинні підтримувати цінності організації. Достатня та релевантна інформація має бути визначена та передана. Рішення та дії всередині організації мають бути скоординованими. Діяльність з контролю повинна бути розроблена як невід'ємна частина організації.

Моніторинг та навчання. Необхідно здійснювати моніторинг середовища для переоцінки контролів. Результати діяльності слід відстежувати в порівнянні з поставленими цілями. Припущення, що лежать в основі цілей, повинні періодично переглядатися. Інформаційні потреби та відповідні інформаційні системи мають бути переоцінені. Необхідно встановити процедури для забезпечення виконання відповідних дій. Керівництво повинно періодично оцінювати ефективність контролю.

Обґрунтування концепції CoSo пояснюється наступним чином: людина виконує завдання, керуючись розумінням його мети та спираючись на свої здібності. Для того, щоб добре виконати завдання, людині потрібне відчуття відповідальності. Людина стежить за своєю роботою і зовнішнім середовищем, щоб дізнатися, як краще виконувати завдання та вносити необхідні зміни. У будь-

якій організації суть контролю полягає в чотирьох компонентах, викладених вище [13,19].

1.2. Процес управління метрологічними ризиками якості продукції

Управління метрологічними ризиками - це не просто технічна формальність, а стратегічна необхідність. Воно забезпечує точність даних, на яких базуються ключові рішення, мінімізує витрати, підвищує безпеку та зміцнює репутацію. Без цього неможливо гарантувати стабільність та розвиток у сучасному світі, де вимірювання є в основі практично всіх процесів - від виробництва до науки й медицини.

Управління ризиками може здійснюватися на рівні всієї організації, окремих підрозділів, у межах конкретних проектів, видів діяльності або щодо окремих ризиків. Для кожного окремого середовища можуть застосовуватись свої специфічні методи та інструменти управління ризиками [24]. Принципи управління ризиками слід застосовувати протягом усього життєвого циклу продукту [27].

Компанія може обрати широку оцінку ризиків, а може обрати вузьку оцінку, яка стосується конкретного ризику в межах галузі (наприклад, фінансова, енергетична, транспорт, медична) [29]. На відміну від загальних ризиків, метрологічні ризики мають специфічний характер, пов'язаний із точністю та надійністю вимірювальних систем. Неточності в результатах вимірювань можуть призводити до виробничих дефектів, порушення технологічних процесів, значних фінансових втрат і навіть критичних наслідків.

Метрологічні ризики якості продукції на етапі виготовлення відіграють ключову роль, оскільки вони безпосередньо впливають на якість вимірювань, що лежать в основі процесів прийняття рішень, контролю якості продукції та забезпечення відповідності стандартам.

Цикл PDCA («Плануй-Виконуй-Перевірй-Дій») може використовуватись як до окремих процесів, так і до всієї системи управління якістю загалом [2,30]. Структура стандарту ДСТУ ISO 31000 [20, 31] відповідно до циклу PDCA представлена на рисунку 1.6.

Цикл «Плануй-Виконуй-Перевірй-Дій» (PDCA) є ефективним інструментом для процесу управління ризиками якості продукції, забезпечуючи систематичний підхід до ідентифікації, аналізу та мінімізації ризиків.

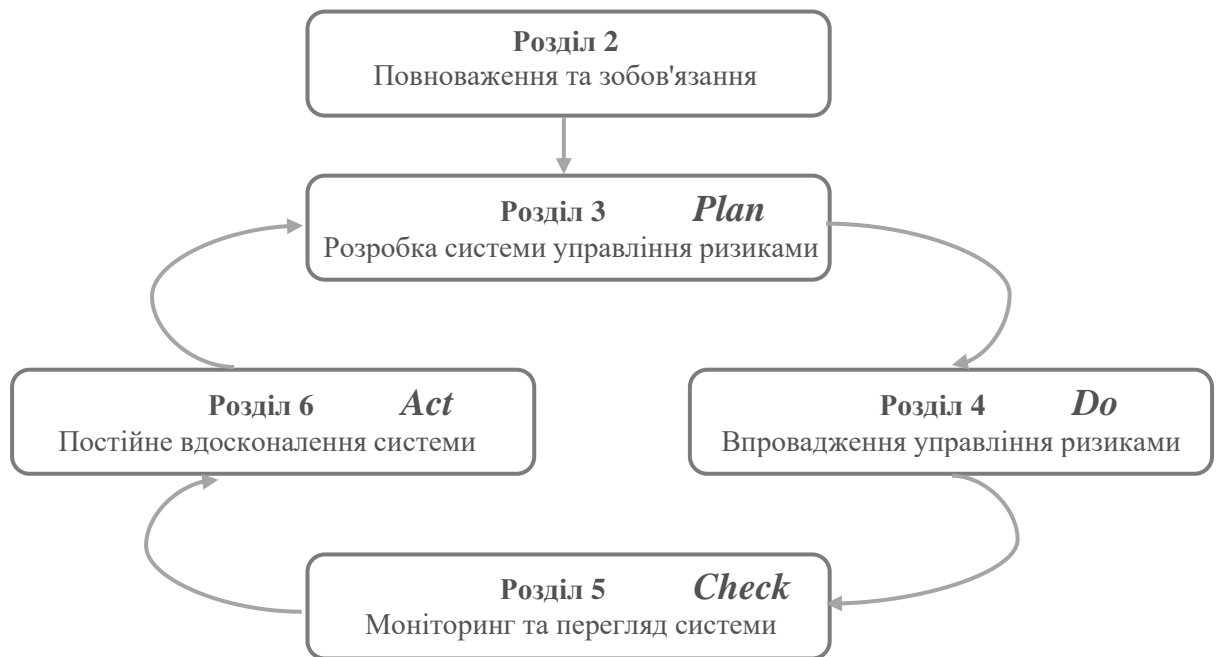


Рисунок 1.6. Цикл «Плануй-Виконуй-Перевірй-Дій»

Плануй (Plan). На цьому етапі здійснюється ідентифікація ризиків, що можуть вплинути на якість продукції. Аналізуються можливі джерела похибок вимірювання, технічних збоїв чи людського фактору. Розробляється план дій для зменшення впливу цих ризиків, включаючи заходи з оптимізації процесів вимірювання, вдосконалення технічних засобів та навчання персоналу.

Виконуй (Do). Реалізуються заплановані заходи з управління ризиками. Наприклад, це може бути впровадження нових методик калібрування, оновлення обладнання, організація перевірок чи тренінгів для співробітників. Також у цей

період проводиться тестування запроваджених змін для визначення їх ефективності.

Перевірй (Check). Оцінюються результати впроваджених змін. Здійснюється аналіз отриманих даних для виявлення, наскільки успішно вдалося зменшити або усунути ідентифіковані ризики. Перевіряється відповідність вимогам стандартів якості та очікуванням споживачів.

Дій (Act). На основі отриманих результатів вносяться корективи до плану управління ризиками. Успішні практики стандартизуються та впроваджуються як постійні елементи процесу. Виявлені недоліки аналізуються для подальшого вдосконалення системи управління ризиками.

Використання циклу PDCA дозволяє підприємству постійно вдосконалювати процес управління ризиками, зберігати стабільну якість продукції та оперативно реагувати на нові виклики.

Діяльність процесу управління ризиками якості повинна здійснюватися з використанням систематичних процесів, призначених для координації, полегшення та вдосконалення прийняття науково обґрунтованих рішень щодо ризиків [32]. На рисунку 1.7 проілюстровано основні етапи розробки програми управління ризиками [18].



Рисунок 1.7. Основні етапи розробки програми управління ризиками

Зовнішній стандарт. Першим кроком у розробці програми управління ризиками є перевірка наявності стандартів зовнішнього органу, як правило, державного регулятора або власної корпоративної групи. Нормативи мають широку сферу застосування. Корпоративні стандарти, швидше за все, будуть більш конкретними, оскільки вони зосереджені лише на тих операціях, які здійснює компанія.

Настанови. Оскільки зовнішні стандарти, як правило, не містять достатньої кількості деталей для розробки та впровадження програми управління ризиками, необхідне додаткове практичне керівництво. Таке керівництво може бути розроблене всередині компанії або надане зовнішніми експертами та консультантами.

Планування та реалізація аналізу ризиків. Наступним кроком є проведення аналізу ризиків, який допоможе визначити, які ризики існують, як їх можна зменшити і як розставити пріоритети в розподілі ресурсів. За плануванням слідує реалізація.

Аудит/деталізація. Жодна управлінська програма не є досконалою. Розриви між цілями та реальністю існують завжди. Для того, щоб систематично виявляти ці розриви, необхідний аудит. Якщо аудит виявляє недоліки або прогалини, процес переходить до етапу впровадження.

Успіх/постійне вдосконалення. В ідеалі, після впровадження плану і проведення аудиту, керівництво може заявити, що воно успішно впровадило свою програму управління ризиками. Однак, ризик ніколи не може бути достатньо низьким; завжди є можливість його зменшити. Тому після завершення програми керівництво повинно почати весь процес заново, як правило, з етапів аналізу ризиків і планування, щоб досягти ще вищих рівнів безпеки та економічних показників [18].

Кроки, які слід вжити при ініціюванні та плануванні процесу управління ризиками, включають наступне [31-35] (рисунок 1.4):

1. Ідентифікація ризиків.

2. Проведення аналізу потенційних ризиків.
3. Оцінювання ризиків та визначення, які слід контролювати, а які можна прийняти.
4. Рекомендації та впровадження адекватних заходів контролю ризиків.
5. Розроблення процедури аналізу, моніторингу та перевірки ризиків.
6. Розгляд впливу виявлених ризиків на пов'язані або подібні продукти та/або процеси.

Діяльність з управління ризиками повинна бути визначена та задокументована [36].

Процес отримання оцінки ризику зазвичай включає кілька етапів, які дозволяють систематично визначити та оцінити ймовірність і наслідки різних ризиків, алгоритм представлений на рисунку 1.8 [37].

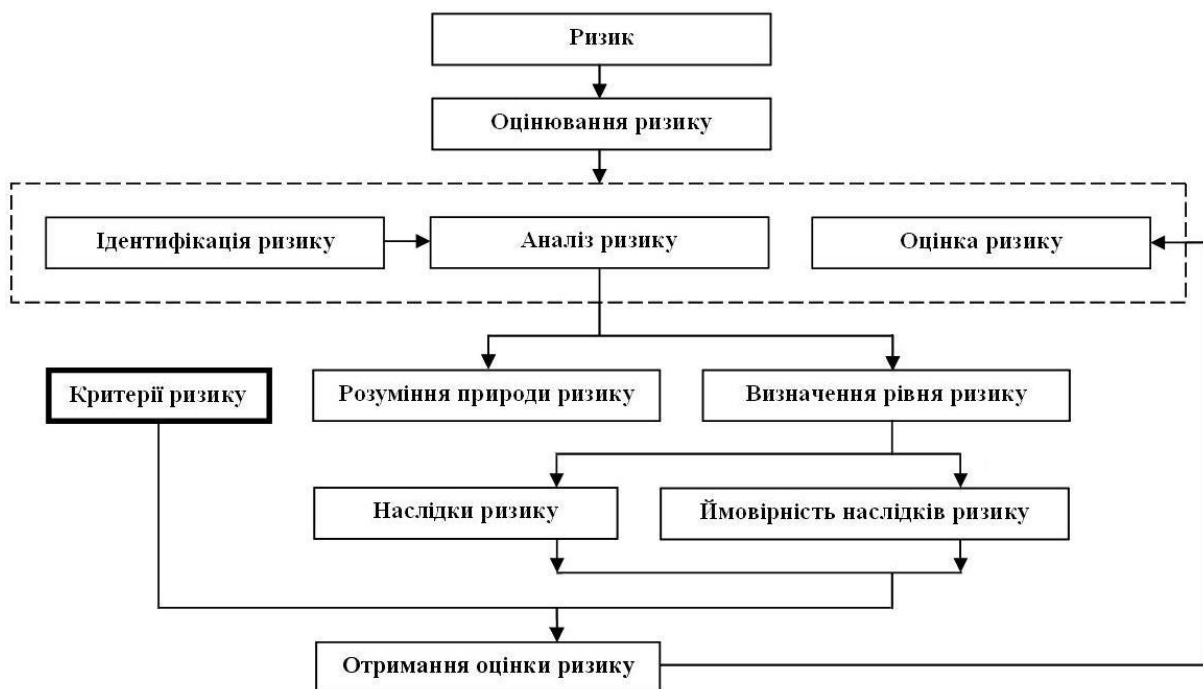


Рисунок 1.8. Алгоритм отримання оцінки ризику

Оцінювання ризику - це об'єднаний процес ідентифікації, аналізу та оцінки ризику [37]. Ідентифікація ризиків полягає у виявленні, визначенні та описі потенційних небезпек. Вона дає змогу визначити, які події або ситуації, що

виникають із внутрішніх чи зовнішніх джерел, можуть вплинути на реалізацію стратегії, якість продукції або досягнення цілей організації.

Процес ідентифікації ризиків включає виявлення причин та джерел ризиків, а також подій, ситуацій чи обставин, які можуть вплинути на якість продукції та досягнення поставлених цілей, із визначенням характеру цього впливу [36].

Аналіз ризику дає змогу отримати вхідні дані для оцінювання ризику та висновку щодо потреби опрацювання ризику та щодо найбільш вигідних стратегій та методів опрацювання. Процес аналізу ризиків полягає у визначенні та поєднанні наслідків та їхніх ймовірностей відносно ідентифікованих ризикових подій для встановлення розміру ризику (рівня ризику) [37].

На рішення щодо подальшої необхідності та способу опрацювання ризику впливатимуть витрати і переваги, що пов'язані із взяттям на себе ризику, та із введенням поліпшених засобів контролю. Важливість зменшення ризику полягає в необхідності обґрунтування процесу прийняття рішення та планування ефективних дій для мінімізації ризику якості продукції. Також необхідно організувати процес контролю розміру ризику, що дозволить вчасно реагувати на його зміну та виконувати необхідні коригувальні дії [38]. Важливим елементом управління ризиками підприємства є вибір ефективного механізму для запобігання, мінімізації, усунення або прийняття ризиків, які впливають на результативність діяльності компанії. Відсутність розуміння схильності підприємства до ризику може спричинити непередбачувані наслідки, кризу або навіть банкрутство [39].

Наступним етапом є моніторинг визначених ризиків. Відстежуються оцінки ймовірності виникнення ризику, його очікувана величина та інші чинники, які можуть змінити значущість цих ризиків. Забезпечення якості, підвищення ефективності розробки, впровадження та результатів процесу - у цьому полягає суть моніторингу й перегляду. Планованою складовою процесу управління ризиками має бути регулярний моніторинг і періодична перевірка як самого процесу, так і його підсумків [40- 42]. Перегляд є однією з ключових частин

управління ризиками, оскільки дозволяє оцінити ефективність застосованих засобів контролю та впевнитися в тому, що ці заходи не створюють додаткових небезпек [42].

1.3. Аналіз методів оцінювання ризиків

Управління ризиками можна здійснювати з різною мірою деталізації, використовуючи один або кілька методів – від найпростіших до складних. Можна встановити зв'язок між основними методами управління ризиками, факторами, які характеризують конкретні ситуації ризику, та прикладами того, як організації визначають оптимальні методи для оцінювання ризиків у певних умовах. Зокрема, найбільш ефективний метод управління ризиками повинен: бути логічним і адаптованим до особливостей певної організації чи конкретної ситуації; давати результати в такому вигляді, який сприяє кращому розумінню суті ризику та шляхів його управління; дозволяти відстежувати, повторювати або перевіряти процес його застосування.

Класифікувати методи оцінки ризиків можна по-різному, щоб спростити аналіз їхніх сильних і слабких сторін. Нижче наведено найбільш поширені з таких методів.

Мозковий штурм. Цей метод використовується групою кваліфікованих осіб, щоб заохотити вільне обговорення та стимулювати процес визначення потенційних відмов, пов'язаних із ними небезпек, ризиків, критеріїв для прийняття рішень і способів їх вирішення. Хоча термін «мозковий штурм» нерідко застосовують довільно для позначення будь-яких групових дискусій, справжній мозковий штурм вимагає використання спеціальних технік, які активізують творче мислення учасників через ідеї та думки інших членів команди [28, 35].

Важливим фактором ефективності цього методу є якісна координація процесу, яка полягає у стимулюванні обговорення на початковій стадії,

регулярному спрямуванні уваги учасників на нові, актуальні напрямки, а також виявленні труднощів, що виникають під час дискусії, яка, як правило, є динамічною. Мозковий штурм можна використовувати як самостійний інструмент для активізації творчого мислення на будь-якому етапі управління ризиками чи життєвого циклу системи, або ж комбінувати з іншими методами загальної оцінки ризиків. Зокрема, він застосовується на початкових етапах, коли необхідно визначити проблеми, або під час більш глибокого аналізу, а також для збору та опрацювання конкретних даних, пов'язаних із певними ризиками.

Оскільки мозковий штурм орієнтований на активізацію творчих ідей, він є особливо ефективним для виявлення ризиків, пов'язаних із впровадженням нових технологій, коли немає достатніх даних або досвіду, а також тоді, коли необхідно знайти оригінальні, нестандартні рішення для наявних проблем [43].

Метод може проводитись як у формалізованій, так і в неформалізованій формі. Формалізований підхід передбачає чітку структуру та попередню підготовку учасників, заздалегідь визначену мету та конкретні завдання зустрічі, а також встановлені критерії оцінювання запропонованих ідей. Неформалізований варіант мозкового штурму є більш вільним і гнучким, часто має ситуативний характер і менш формалізовані правила проведення. Мозковий штурм має свої переваги та недоліки, наведені у таблиці 1.2.

Таблиця 1.2.

Переваги та недоліки методу «Мозковий штурм»

Переваги	Недоліки
<ul style="list-style-type: none"> – Активізує творче мислення, дозволяючи знаходити нові ризики та нестандартні рішення. – Сприяє залученню ключових зацікавлених сторін до процесу виявлення ризиків, що покращує комунікацію та взаємний обмін інформацією. – Характеризується простотою впровадження та забезпечує швидке отримання результатів. 	<ul style="list-style-type: none"> – Не всі учасники здатні зробити ефективний внесок через недостатню компетентність або нестачу необхідного досвіду. – Часткова неструктурованість методу може ускладнювати демонстрацію того, що були враховані всі потенційні ризики. – У групі може формуватися специфічна динаміка обговорення, коли окремі учасники домінують, пригнічуючи висловлення ідей іншими. Для розв'язання цієї проблеми застосовують додаткові методи, наприклад, комп'ютеризований або номінальний мозковий штурм.

Метод Дельфі (або метод експертних оцінок). Метод є спеціальною процедурою, спрямованою на отримання надійного узгодженого рішення від групи експертів. Попри те, що сьогодні цим терміном іноді позначають різні форми мозкового штурму, головною особливістю цього методу є те, що експерти висловлюють свої думки незалежно один від одного, з подальшою можливістю ознайомлення з відповідями інших учасників в анонімному режимі [28, 44-46].

Процедура застосування методу складається з таких етапів:

- формування команди, відповідальної за організацію та контроль виконання процесу за методом Дельфі;
- підготовка однієї або кількох груп експертів (учасників), що братимуть участь у опитуванні;
- проведення розсилки попередньо розроблених анонімних анкет учасникам для збору їхніх незалежних думок;
- аналіз та узагальнення отриманих відповідей на першому етапі, після чого узагальнені результати повертають учасникам для повторного аналізу та обговорення;
- повторне отримання й обробка відповідей експертів, при необхідності з подальшими етапами обговорення, аж поки не буде досягнуто прийняттого для всіх сторін консенсусу.

Метод Дельфі можна використовувати на будь-якому етапі процесу управління ризиками або на будь-якій стадії життєвого циклу системи, коли виникає необхідність отримати узгоджену думку експертів. Експерти індивідуально відповідають на спеціально підготовлені анкети, при цьому вони не контактують особисто і не мають змоги впливати один на одного. Це гарантує об'єктивність та незалежність висловлених ними думок [44, 47, 48]. В таблиці 1.3. представлені переваги та недоліки методу Дельфі.

Таблиця 1.3.

Переваги та недоліки методу Дельфі

Переваги	Недоліки
<ul style="list-style-type: none"> – зважаючи на анонімність суджень, більш імовірним є висловлювання непопулярних думок; – усі думки мають однакову вагу, що дає змогу уникати проблеми переважання думок окремих особистостей; – дає право власності на результати; – немає потреби збирати учасників одночасно в одному місці. 	<ul style="list-style-type: none"> – потребує багато часу та значних затрат праці; – учасники мають бути здатні чітко письмово викладати свої думки.

Попередній аналіз небезпечних чинників (РНА). Це простий індуктивний метод аналізу, який використовують для виявлення небезпечних факторів, потенційних загроз та подій, здатних завдати шкоди діяльності, обладнанню або самій системі [49].

Зазвичай такий аналіз проводять на початкових етапах розробки проекту, коли доступна лише обмежена інформація щодо окремих компонентів чи операційних процедур системи. Цей метод часто слугує попереднім кроком до більш детального аналізу або використовується для формулювання початкових вимог до проектування системи.

РНА також є корисним для вже існуючих систем, коли необхідно визначити пріоритетність небезпечних чинників і ризиків, щоб пізніше провести їх більш ретельне дослідження або коли застосування інших, складніших методик є неможливим.

Попередній аналіз небезпечних чинників є якісним методом, за допомогою якого оцінюються внутрішні фактори ризику та визначається їх значущість у межах конкретної системи [50].

Під час проведення аналізу може здійснюватись якісна оцінка наслідків можливих небажаних подій і ймовірності їх виникнення з метою визначення ризиків для подальшого оцінювання. Для цього формують перелік небезпечних факторів, ситуацій і ризиків, враховуючи такі характеристики, як: тип використовуваного обладнання; матеріали, які застосовуються або утворюються

в процесі, та їхні хімічні властивості; навколишні умови експлуатації; розташування системи та взаємодії між її компонентами тощо [28].

РНА необхідно регулярно оновлювати на різних етапах, таких як проектування, конструювання та випробування, щоб вчасно виявляти нові небезпечні чинники і за необхідності вносити відповідні зміни.

Результати такого аналізу можуть подаватися у різних форматах, зокрема у вигляді таблиць або схем із деревоподібною структурою. Переваги й недоліки методу РНА наведені в таблиці 1.4.

Таблиця 1.4.

Переваги та недоліки методу РНА

Переваги	Недоліки
<ul style="list-style-type: none"> – можливість використання за наявності обмеженої інформації; – змога розгляду ризиків на ранній стадії життєвого циклу системи. 	<ul style="list-style-type: none"> – РНА дає змогу отримувати лише попередню інформацію; – не є самодостатнім і не забезпечує докладною інформацією стосовно ризиків та способів, у який можна якнайкраще їм запобігати.

Аналіз видів і наслідків відмов (FMEA) і аналізування видів, наслідків і критичності відмов (FMESCA). Метод FMEA застосовують для того, щоб визначити, які компоненти, процеси або системи можуть вийти з ладу або перестати відповідати встановленим проектним вимогам. Цей метод найчастіше використовують у заходах, пов'язаних із забезпеченням якості [51]. Зокрема, FMEA дозволяє виявити:

- усі потенційні види відмов окремих елементів системи (вид відмови визначається на основі помічених порушень або неправильного функціонування);
 - наслідки, які ці відмови можуть мати для функціонування всієї системи;
 - причини, що можуть спричинити появу цих відмов;
 - способи уникнення або мінімізації негативного впливу потенційних загроз на систему.

Метод FMESA є розширенням FMEA та передбачає додаткове ранжування кожного визначеного ризику залежно від ступеня його важливості або критичності [52].

Метод FMEA може застосовуватися в різних сферах діяльності, а саме: FMEA проекту (або продукції) – щодо окремих компонентів або виробів; FMEA системи – щодо аналізу функціонування цілих систем; FMEA процесу – щодо виробничих та складальних операцій; FMEA послуг – у контексті надання послуг; FMEA програмного забезпечення – щодо аналізу надійності програмних продуктів [28, 53].

Процес FMEA містить такі кроки:

- а) визначення цілей аналізу й сфери застосування методу;
- б) формування робочої групи експертів;
- в) збір та узагальнення вихідних даних щодо досліджуваної системи чи процесу;
- г) поділ системи на окремі складові або на послідовні етапи функціонування;
- д) визначення функцій кожного складника або функцій на кожному етапі процесу;
- е) для кожного визначеного компонента чи етапу необхідно встановити:
 - які фактори можуть спричинити появу відмови?
 - яким чином конкретна частина чи етап можуть вийти з ладу?
 - які можливі наслідки виникнення такої відмови?
 - чи є відмова безпечною, чи навпаки – критичною або руйнівною?
 - яким чином можна виявити виникнення такої відмови?
- є) визначення відповідних заходів, які потрібно застосувати для мінімізації чи усунення наслідків виявлених відмов.

Після того як встановлені всі можливі види відмов і причини їхнього виникнення, визначаються та реалізуються коригувальні заходи щодо найбільш критичних ризиків [53].

Після реалізації запланованих коригувальних заходів можна повторно оцінити систему, виконавши наступний цикл аналізу FMEA [24].

На підставі узагальнення результатів досліджень [28, 34, 51, 54-60] було сформульовано основні переваги та недоліки застосування методів FMEA/FMECA, які наведені у таблиці 1.5.

Таблиця 1.5.

Переваги та недоліки FMEA/FMECA

Переваги	Недоліки
<ul style="list-style-type: none"> – придатність для видів відмов, пов'язаних з людиною, устаткуванням і системами, а також до технічних і програмних засобів та процедур; – змога ідентифікувати види відмов складників, їхні причини та наслідки для системи, а також подавати їх у зручному для сприйняття форматі; – змога уникати затратних змін експлуатованого устаткування завдяки ідентифікації проблем на ранній стадії у процесі проектування; – змога ідентифікувати види локалізованої відмови та вимоги щодо систем з резервуванням або систем убезпечення. 	<ul style="list-style-type: none"> – можливість використання лише для ідентифікації окремих видів відмов, а не комбінацій видів відмов; – для досліджень може бути потрібно багато часу та витрат, якщо їх належно не контролювати та не спрямовувати; – дослідження можуть бути важкими та затратними для складних багаторівневих систем.

Аналіз небезпечних чинників та критичні точки контролю (НАССР).

Метод дозволяє ефективно виявляти небезпечні чинники й впроваджувати заходи контролю на всіх важливих етапах виробничого процесу. Це дає змогу не лише уникнути появи небезпечних факторів, але й забезпечити відповідну якість, надійність та безпечність продукції [53]. Основною метою застосування методу НАССР є мінімізація ризиків саме завдяки регулярним превентивним заходам контролю на всіх стадіях виробництва, а не лише за допомогою контрольних перевірок кінцевого продукту [28].

Початково НАССР був розроблений для гарантування безпечності харчових продуктів у межах космічних програм NASA. Сьогодні цей метод широко застосовується в організаціях, діяльність яких охоплює весь цикл – від виготовлення до реалізації харчової продукції. Він спрямований на контроль ризиків, пов'язаних із фізичними, хімічними або біологічними забрудненнями.

Також метод знайшов застосування і в інших сферах, зокрема у виробництві фармацевтичних препаратів та медичних виробів. Принцип визначення факторів, що можуть впливати на якість продукції, та встановлення ключових етапів виробничого процесу для моніторингу критичних параметрів можна поширити і на інші технічні системи [8].

Застосування методу НАССР починається з аналізу основної технологічної або процесної схеми, а також зі збору інформації про потенційні небезпечні фактори, що можуть негативно вплинути на якість, безпечність, надійність продукції або результати виробничого процесу. Ці початкові дані щодо ризиків, небезпек і можливих методів їх контролю є ключовими вхідними параметрами для проведення НАССР [28, 34, 61]. Процес реалізації НАССР включає наступні сім послідовних кроків:

- виявлення небезпечних факторів і визначення відповідних заходів для їхнього попередження;
- визначення критичних контрольних точок (КТК), тобто таких стадій процесу, де виявлені ризики можуть бути ефективно контрольовані або усунуті;
- встановлення критичних меж для контролю небезпечних чинників (для кожної КТК визначають конкретні параметри);
- здійснення регулярного моніторингу за визначеними критичними межами у кожній контрольній точці;
- встановлення коригувальних дій у випадках, коли параметри процесу виходять за межі визначених значень;
- розробка та впровадження методик періодичної перевірки ефективності системи;
- ведення записів та відповідне документування всіх етапів і процедур у межах системи НАССР.

Результати роботи за методом НАССР фіксують у вигляді протоколів, зокрема оформлюють робочий аркуш аналізу небезпечних факторів, а також

окремий план НАССР. Переваги та недоліки застосування цього методу наведено у таблиці 1.6.

Таблиця 1.6.

Переваги та недоліки методу НАССР

Переваги	Недоліки
<ul style="list-style-type: none"> – зосередженість на практичних аспектах того, як і на яких етапах процесу можна запобігати небезпечним чинникам і контролювати ризики; – заохочує до контролювання ризиків протягом усього процесу, а не тільки інспекційного контролю кінцевої продукції; – дає змогу ідентифікувати небезпечні чинники, спричинені діями персоналу ще до того, як ці чинники спричинять небажані наслідки. 	<ul style="list-style-type: none"> – для реалізації методу слід заздалегідь ідентифікувати небезпечні чинники, визначати ризики, притаманні цим чинникам, і розглядати їхню вагомість як вхідні дані до процесу аналізу. Також потрібно визначити відповідні засоби контролю. Для цього НАССР доцільно поєднувати з іншими аналітичними методами; – застосування заходів у разі, коли контрольовані параметри виходять за встановлені межі, може призвести до того, що не буде виявлено їх поступових змін, що є статистично значимими і щодо яких треба застосувати належні дії.

Структурований аналізу сценаріїв методом «що - якщо» (SWIFT). SWIFT розроблено як спрощену альтернативу методу HAZOP. Дослідження за цим методом здійснюється групою експертів з використанням певного набору навідних фраз і слів, які озвучує координатор під час проведення засідання. Це дозволяє стимулювати процес визначення та ідентифікації ризиків. Координатор разом із командою спеціалістів формулює питання на кшталт «Що станеться, якщо...», доповнюючи їх спеціальними ключовими словами, досліджуючи можливі наслідки відхилень у поведінці чи функціонуванні технічного об'єкта або системи [34, 52, 62].

Перед початком аналізу необхідно чітко визначити саму систему, процедури, технічні об'єкти й можливі зміни в них. Внутрішнє й зовнішнє середовище об'єкта чи системи аналізує координатор, використовуючи опитування експертів, документацію, креслення та інші вихідні матеріали. Зазвичай, для спрощення проведення аналізу, досліджуваний об'єкт, ситуацію чи систему поділяють на окремі вузли або ключові елементи. Іншим важливим джерелом інформації є компетентність і практичний досвід членів експертної групи, формування якої

потребує особливої уваги. Крім того, бажано, щоб до складу групи входили не тільки особи з практичним досвідом аналізованих систем, об'єктів чи ситуацій, але також, по можливості, представники всіх основних зацікавлених сторін [8,28].

Загальна процедура застосування методу SWIFT складається з наступних кроків [27]:

- перед початком аналізу координатор складає відповідний перелік навідних слів і фраз, використовуючи стандартний набір або розробляючи власний список з урахуванням максимально повного охоплення потенційних ризиків і небезпек.
- Під час робочого засідання група експертів разом із координатором обговорює та узгоджує внутрішнє й зовнішнє середовище, що стосується досліджуваного об'єкта, процесу, системи чи ситуації, а також визначає сферу застосування аналізу;
- координатор просить учасників ідентифікувати та детально розглянути:
 - вже відомі ризики й небезпечні фактори;
 - накопичений досвід і попередні випадки;
 - відомі й чинні засоби контролю або захисту;
 - законодавчі, нормативні та регуляторні вимоги й обмеження.
- дискусію спрямовують запитаннями, сформульованими у формі «що буде, якщо...», які супроводжуються відповідними навідними словами або темами.
- виявлені ризики підсумовують, а група додатково аналізує ефективність вже впроваджених заходів контролю;
- група затверджує та документує чіткий опис ризику, його потенційні причини, наслідки та заплановані контрольні заходи у відповідних протоколах;
- учасники аналізують та оцінюють адекватність і результативність обраних методів контролю, після чого узгоджують остаточну думку щодо їхньої ефективності;

- у ході обговорення ставляться додаткові уточнювальні запитання за схемою «що – якщо» для виявлення нових, раніше не визначених ризиків;
- координатор контролює хід обговорення, користуючись попередньо підготовленими навідними фразами, і за необхідності пропонує групі додаткові питання та сценарії можливого розвитку ситуацій.

В таблиці 1.7. представлені переваги та недоліки методу «що - якщо».

Таблиця 1.7.

Переваги та недоліки методу «що - якщо» (SWIFT)

Переваги	Недоліки
<ul style="list-style-type: none"> – може бути застосований до всіх видів технічних об'єктів або систем, ситуацій чи обставин, організацій або діяльності; – потребує мінімального підготування членами групи; – є відносно швидким, а основні небезпечні чинники та ризики швидко стають очевидними під час робочого засідання; – дослідження має системно орієнтований характер і дає змогу учасникам побачити, як система реагує на відмови, а не просто дослідити наслідки відмов окремих складників; – можна використовувати для визначення можливостей щодо поліпшування процесів і систем та, загалом, для визначення дій, які ведуть до успіху та збільшують його ймовірність; – передбачає участь у засіданнях осіб, відповідальних за наявні засоби контролювання та за подальші дії щодо опрацювання ризиків, збільшує їхню відповідальність; – дає змогу скласти реєстр ризиків і, за незначного дороблення, план опрацювання ризиків; – дає змогу ідентифікувати ризики та небезпечні чинники так, щоб результати можна було застосовувати для кількісного дослідження. 	<ul style="list-style-type: none"> – результативність залежить від досвіду та кваліфікації координатора; – потреба в ретельній підготовці, щоб не втрачати часу на робочих засіданнях групи; – якщо досвід групи недостатній або якщо система навідних фраз не всебічна, деякі ризики чи чинники можуть не бути не ідентифіковані; – застосування методу на загальному рівні може не давати змоги виявити складні, докладні чи взаємопов'язані причини.

1.4. Висновки до розділу 1

У першому розділі проаналізовано та систематизовано сучасний стан теорії та практики управління метрологічними ризиками та їхнього впливу на забезпечення якості продукції. Особливу увагу приділено міжнародним стандартам, таким як ISO 31000 та ISO 9001, які регламентують загальні принципи управління ризиками. Визначено, що більшість сучасних підходів до оцінювання ризиків мають обмеження: вони орієнтовані на вузькоспеціалізовані задачі та не враховують специфіки метрологічних процесів.

Впровадження системного підходу до ризик-менеджменту, зокрема використання циклу PDCA, забезпечує ідентифікацію, аналіз, оцінку та мінімізацію ризиків на всіх етапах виробничого процесу.

Проведено аналіз переваг та недоліків існуючих методів оцінювання ризиків, зокрема FMEA, HACCP, SWIFT і PNA. На основі проведеного аналізу обґрунтовано потребу в розробці комплексної методології управління метрологічними ризиками. Така методологія має враховувати всі аспекти, пов'язані з оцінюванням, прогнозуванням і мінімізацією ризиків, а також передбачати використання сучасних математичних моделей, цифрових технологій і автоматизованих систем моніторингу.

Метрологічні ризики є важливим фактором, який безпосередньо впливає на якість продукції, стабільність виробничих процесів та відповідність вимогам стандартів. Недостатнє врахування цих ризиків може призводити до збоїв у технологічних процесах, зростання обсягів бракованої продукції, додаткових витрат на її переробку або утилізацію, а також до втрати конкурентних позицій підприємства.

РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОБЛЕМАТИКИ ОЦІНЮВАННЯ ТА ЗАСТОСУВАННЯ ТЕОРІЇ МЕТРОЛОГІЧНИХ РИЗИКІВ

2.1. Дослідження факторів впливу на технологічний процес

Фактори, що впливають на технологічний процес (ТП), умовно ділять на прямий і непрямий вплив. До факторів непрямого впливу належать джерела МР, пов'язані із зовнішнім середовищем, оскільки вони не мають безпосереднього впливу на механізми ТП. Такі зовнішні чинники одночасно впливають на всі підприємства, а не вибірково на конкретне виробництво. Водночас рівень їхнього впливу неоднорідний і значною мірою залежить від специфіки діяльності підприємства. Через масштабність та опосередкований характер цього впливу його можна оцінити лише з певним ступенем імовірності.

Процеси, що відбуваються у зовнішньому середовищі, мають взаємозв'язки. Наприклад, політичні чи соціальні зміни можуть впливати на екологічну ситуацію, яка, своєю чергою, значною мірою позначається на виробництві. Таким чином, зовнішні фактори взаємопов'язані кореляційними зв'язками, що означає, що зміна одного з них може спричинити зміни в інших [63]. Цю особливість необхідно враховувати при оцінюванні МР. У таких умовах проведення факторного аналізу є доволі складним завданням, оскільки для ідентифікації таких ризиків недостатньо лише залучення персоналу підприємства. Для більш якісного аналізу необхідна участь експертів відповідної галузі. Зовнішні ризики, які виникають незалежно від діяльності підприємства, зазвичай не піддаються його впливу або впливають мінімально, проте їх ідентифікація та аналіз є обов'язковими під час оцінювання МР. Вплив цих ризиків на ТП визначається рівнем адаптивності виробництва та ефективністю системи управління якістю. Одне з ключових завдань — ретельно дослідити вплив зовнішніх факторів на процес виробництва, своєчасно визначити найзначніші джерела ризиків і врахувати їх під час оцінювання МР [40]. Оскільки, зовнішнє середовище

постачає виробництву ресурси, що підтримують його внутрішній потенціал, аналіз його факторів, які породжують МР, є необхідним і включає вивчення зовнішніх елементів оточення підприємства.

Внутрішнє середовище, подібно до зовнішнього, також є джерелом МР. До внутрішніх факторів належать усі чинники, що безпосередньо залежать від діяльності підприємства та впливають на якість виробленої продукції. Вони є факторами прямого впливу та мають індивідуальний характер для кожного підприємства. Подібно до зовнішніх чинників, рівень впливу внутрішніх ризиків може суттєво відрізнятись й залежить від організаційних процесів конкретного виробництва.

Процеси, що відбуваються у внутрішньому середовищі, також взаємопов'язані. Наприклад, некоректне використання вимірювального обладнання персоналом може призвести до його неправильної роботи, що, своєю чергою, вплине на якість продукції під час виробництва. Однак такі взаємозалежні ризики легше виявити й проаналізувати, оскільки вони виникають у межах підприємства, де керівництво має повний доступ до процесів і ресурсів. На відміну від зовнішніх ризиків, для аналізу внутрішніх факторів не потрібно залучати сторонніх експертів, адже вони не володіють достатньою компетентністю щодо внутрішніх механізмів роботи виробництва.

Оскільки внутрішні МР є результатом діяльності самого підприємства, вони повністю підконтрольні йому. Їхній вплив залежить від того, наскільки своєчасно будуть виявлені джерела ризиків і вжиті заходи для їх усунення чи зменшення. Тому аналіз та оцінка внутрішніх ризиків є так само необхідними, як і дослідження зовнішніх чинників. Класифікація факторів, що впливають на технологічний процес, представлена у вигляді схеми (рис. 2.1).

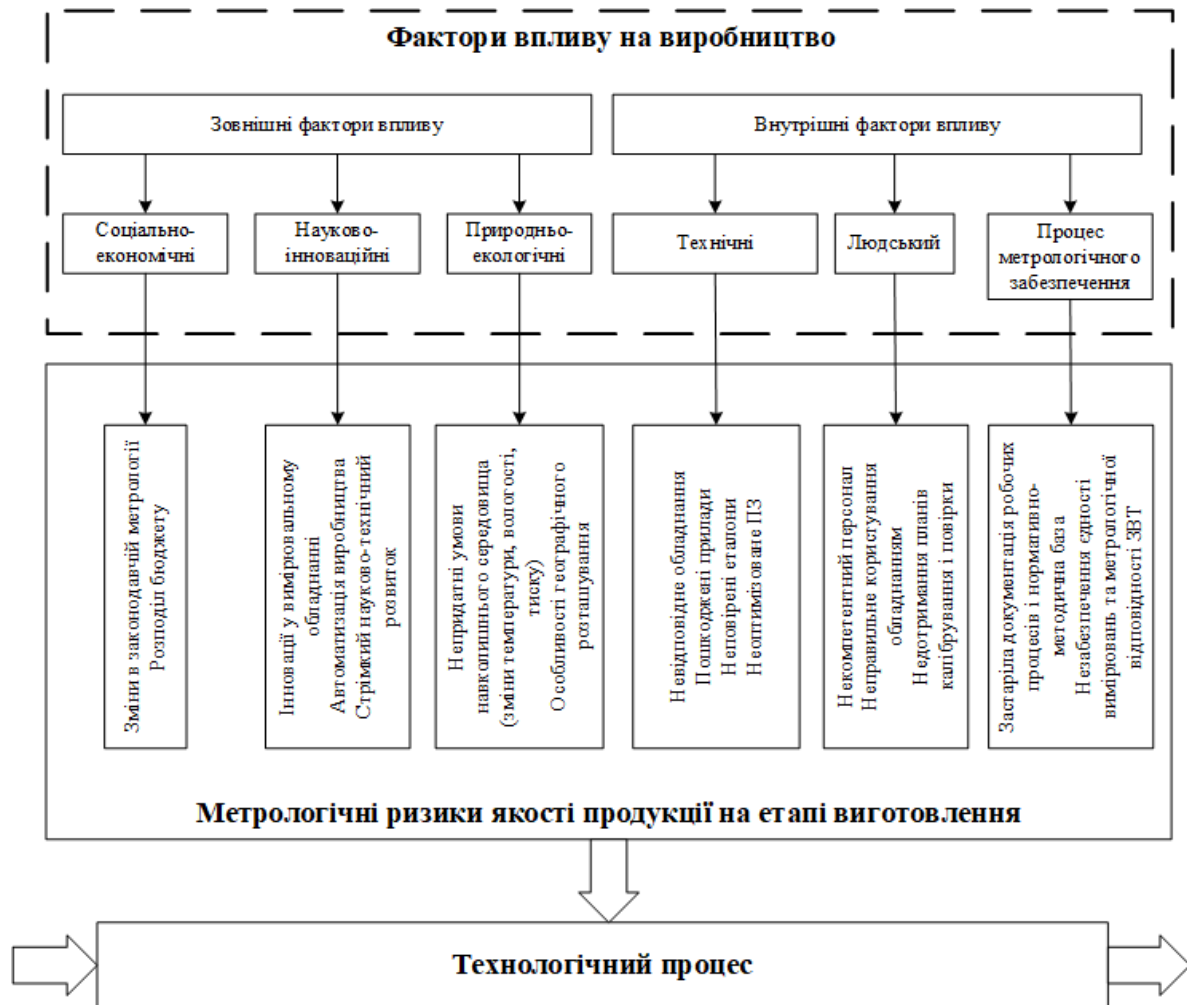


Рисунок 2.1. Класифікація джерел метрологічних ризиків

Соціально-економічні фактори. До цієї групи належать джерела МР, що виникають під впливом соціальних, політичних та економічних чинників. У межах даної класифікації ці фактори доцільно об'єднати в одну категорію соціально-економічних факторів. Ці фактори становлять одну з груп, що породжують МР, які впливають на якість продукції під час її виготовлення, тому потребують ретельного вивчення, аналізу та оцінки [40, 64].

Соціальні фактори є джерелами МР, що з'являються через непередбачувані суспільні події, спричинені різними соціальними процесами в країні.

Політичні фактори є джерелами МР, які призводять до збитків і погіршення якості продукції через зміни в політичній ситуації країни. Особливо важливим є врахування таких ризиків у країнах із нестабільною законодавчою базою, де

політичні зміни можуть безпосередньо впливати на регулювання виробничих процесів.

Економічні фактори формують джерела МР, які впливають на якість продукції через зміни в економічній ситуації країни. Вони визначають загальний економічний стан та можуть впливати на ресурси, фінансування та ефективність виробництва.

Отже, якість продукції на етапі виробництва залежить від соціальних, політичних та економічних подій і рішень, що є джерелами МР. Однак, у багатьох випадках складно чітко визначити, до якої з трьох категорій належить певний ризик, оскільки його причиною можуть бути одночасно всі три фактори. Наприклад, ризики, пов'язані з бюджетним розподілом, виникають через взаємопов'язані зміни в економічній та політичній сферах. Тому джерела МР, зумовлені цими факторами, пропонується об'єднати в одну соціально-економічну групу. У таблиці 2.1 представлено джерела МР, пов'язані з соціально-економічними факторами.

Таблиця 2.1.

Джерела МР, пов'язані із соціально-економічними факторами

Джерело ризику	Опис	Приклад наслідків
1	2	3
Коливання валютного курсу	Збільшення вартості імпортного метрологічного обладнання	Обмеження доступу до сучасних ЗВТ, зниження точності вимірювань
Інфляція	Зростання витрат на обслуговування та калібрування	Зниження регулярності обслуговування, підвищення похибок
Соціальна нестабільність	Відтік кваліфікованих працівників	Недостатня компетентність персоналу, збільшення систематичних помилок
Санкції або торгові обмеження	Відсутність доступу до високоточних еталонів та компонентів	Використання застарілих методик, невідповідність стандартам
Недостатня підтримка галузі	Відсутність державного фінансування для розвитку метрології	Застаріла нормативна база, низький рівень інтеграції сучасних технологій
Погіршення якості освіти	Випуск спеціалістів із недостатніми знаннями та практичними навичками	Збільшення кількості помилок у вимірюваннях через низьку кваліфікацію

Продовження таблиці 2.1.

1	2	3
Зміна вікового розподілу працівників	Домінування старших працівників, брак молодих кадрів	Повільна адаптація до нових технологій, зменшення динаміки модернізації
Терористична діяльність	Загроза безпеці працівників, пошкодження інфраструктури	Зниження продуктивності, проблеми з утриманням людських ресурсів
Рівень бюрократії та корупції	Ускладнення процесів сертифікації, отримання дозволів	Затримки у впровадженні нових ЗВТ, зростання вартості процедур

Науково-інноваційні фактори. Це джерела МР, які призводять до втрат через відставання виробництва від науково-інноваційних процесів у сфері метрології в межах країни. Такі ризики залежать від типу галузі, у якій працює підприємство, тому їхні наслідки різняться для кожного виробництва. Особливу увагу на ці ризики слід звертати підприємствам, що діють у новітніх науково-технічних сферах, де науково-інноваційний прогрес відбувається надзвичайно швидко. Важливо зазначити, що наукові інновації включають не лише технічне вдосконалення обладнання, а й нові методи та підходи до організації виробничих процесів, вирішення як існуючих, так і нових викликів.

Інтеграція інновацій у МЗ виробництва сприяє не лише покращенню якості продукції, але й підвищенню конкурентоспроможності підприємства. Впровадження сучасних технологій є також запобіжним заходом, що допомагає уникнути серйозних ризиків у майбутньому, пов'язаних із старінням методів і технологій, які можуть негативно впливати на якість продукції. Проте, процес інтеграції наукових інновацій у виробництво має бути своєчасним і добре продуманим. Неправильні рішення в цьому напрямку можуть призвести до серйозних наслідків, тому необхідно підходити до їхнього впровадження виважено. Джерела МР, пов'язані з науково-інноваційними факторами, наведено в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2.

Джерела МР, пов'язані з науково-інноваційними факторами

Джерело ризику	Опис	Приклад наслідків
Недостатня сумісність нових технологій	Інноваційне обладнання не відповідає існуючим стандартам	Зростання похибок, неможливість інтеграції у поточні процеси
Невідповідність методик вимірювання	Методики не враховують особливості нових технологічних процесів	Некоректна оцінка якості
Швидкий науково-технологічний прогрес	Розробка інновацій вимагає постійного оновлення методик, обладнання та кадрової підготовки	Високі витрати на інтеграцію, підвищення метрологічних ризиків через організаційні труднощі
Ризики цифровізації	Програмні збої, втручання в обробку даних	Неточна обробка вимірювань, зниження довіри до даних
Впровадження експериментальних технологій	Використання нових підходів без належної валідації	Нестабільність вимірювань, невідповідність результатів, збільшення часу адаптації ТП
Застарілі еталони для нових технологій	Відсутність сучасних еталонів, які відповідають інноваційним процесам	Перенесення похибок на ЗВТ
Системи передачі та обробки інформації	Використання нових автоматизованих систем може викликати проблеми через недосконалу інтеграцію	Ризик втрати даних, уповільнення процесів вимірювань

Природньо-екологічні фактори. Природно-екологічні фактори є джерелами МР, що виникають унаслідок впливу стихійних природних явищ та можуть спричинити незаплановані зміни у результатах метрологічної діяльності. Вони безпосередньо пов'язані з географічним розташуванням підприємства, природними катаклізмами та кліматичними особливостями регіону, в якому здійснюється виробнича діяльність.

Такі чинники створюють ризики, пов'язані з несприятливими умовами навколишнього середовища, що можуть впливати як на результати метрологічної діяльності, так і на забезпечення необхідної якості продукції на етапі її виготовлення, зокрема на відтворюваність вимірювань. Відтворюваність, згідно з [65], характеризує якість вимірювань через близькість результатів однієї й тієї ж величини, отриманих за різних умов (у різний час, у різних місцях, за

допомогою різних методів та засобів), але приведених до стандартних умов (температура, тиск, вологість тощо). Як зазначено NIST [66], ці стандартизовані умови повинні відповідати міжнародно прийнятим значенням температури (20 °C) та тиску (760 мм рт. ст.). Будь-які, навіть незначні, відхилення цих параметрів можуть призвести до виникнення додаткових похибок, які необхідно враховувати при оформленні результатів вимірювань. До ключових природно-екологічних факторів, що впливають на метрологічні процеси, належать: відносна вологість, температурні градієнти, вібрація, концентрація CO₂ у повітрі. Зокрема, ці фактори можуть змінювати показник заломлення світла, що необхідно враховувати при проведенні відповідних вимірювань. Джерела МР, пов'язаних із природно-екологічними чинниками, наведено у таблиці 2.3.

Таблиця 2.3.

Джерела МР, пов'язані з природно-екологічними факторами

Джерело ризику	Опис	Приклад наслідків
1	2	3
Посилення екологічного регулювання	Вимоги до модернізації обладнання для зменшення впливу на екологію	Додаткові витрати, обмеження в роботі ЗВТ
Кліматичні зміни	Коливання температури, вологи у виробничих приміщеннях	Нестабільність параметрів вимірювань, зростання випадкових похибок
Природні катастрофи	Повені, землетруси, урагани тощо призводять до фізичних пошкоджень обладнання	Втрата працездатності ЗВТ, переривання виробничого процесу
Забруднення рідин і матеріалів	Використання неякісної сировини або забрудненої води	Погіршення якості кінцевої продукції, нестабільність у технологічних процесах
Забруднення повітря	Пил, гази або хімічні речовини осідають на компонентах обладнання	Погіршення точності вимірювань, збільшення частоти обслуговування
Дефіцит ресурсів через природні фактори	Погіршення доступу до сировини, води, енергії через екологічні події	Обмеження у виробництві, збої у роботі метрологічного забезпечення
Пошкодження інфраструктури	Знищення або пошкодження метрологічних лабораторій через стихійні лиха	Потреба у відновленні або перенесенні метрологічної діяльності

Продовження таблиці 2.3.

1	2	3
Блискавки та електростатичні розряди	Вплив природних явищ на електронне обладнання	Несправності або вихід з ладу високочастотних електронних ЗВТ
Високий рівень радіації	Вплив природного або техногенного радіаційного фону на чутливе вимірювальне обладнання	Пошкодження обладнання

Хоча виробництво не може змінювати умови зовнішнього середовища, воно здатне пристосовуватися до них і впроваджувати відповідні заходи для підтримки оптимальних умов. З цією метою необхідно забезпечити дотримання норм температури, тиску, вологості, освітлення, вібрацій, шуму тощо. Якщо параметри навколишнього середовища можуть поставити під сумнів достовірність результатів метрологічних вимірювань, метрологічну діяльність слід тимчасово призупинити до відновлення належних умов.

Фактори системи метрологічного забезпечення. Система МЗ суттєво впливає на стабільність та ритмічність виробничих процесів, рівень собівартості продукції, обсяг випуску, продуктивність праці, а також ефективність як виробничих, так і споживчих процесів. Для того, щоб визначити фактори впливу, які стають джерелами метрологічних ризиків у системі МЗ, необхідно спочатку роз'яснити поняття «метрологічне забезпечення». Згідно з нормативним документом [65], метрологічне забезпечення включає встановлення та застосування метрологічних норм і правил, а також розроблення, виготовлення та використання технічних засобів, необхідних для забезпечення єдності та необхідної точності вимірювань.

Фактори системи МЗ є джерелами МР, що виникають унаслідок недотримання метрологічних норм і правил, що призводить до порушення необхідної точності та єдності вимірювань. Відповідно до [67], систему показників якості МЗ можна поділити на показники результативності та ефективності (рис. 2.2).



Рисунок 2.2. Система показників якості МЗ

Недотримання, або навіть часткове недотримання вказаних показників призводить до виникнення МР, що впливають на технологічний процес і спричиняють виробничі втрати. Джерела ризиків, пов'язаних із цими факторами, наведено в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4.

Джерела МР, пов'язані з системою метрологічного забезпечення

Джерело ризику	Опис	Приклад наслідків
1	2	3
Недостатня стандартизація методик вимірювань	Відсутність єдиних методик виконання вимірювань або їх застарілість	Невідповідність результатів, складність порівняння даних
Застаріла нормативно-методична база	Використання старих або неповних стандартів та регламентів	Помилки у вимірюваннях через нерелевантні вимоги

Продовження таблиці 2.4.

1	2	3
Недостатній метрологічний контроль	Відсутність регулярних перевірок обладнання та процедур	Зростання кількості систематичних та випадкових похибок
Неправильна організація калібрування	Пропуски в графіку калібрування, недотримання умов під час його виконання	Недійсність результатів вимірювань
Низька якість метрологічної експертизи	Поверхневий аналіз документації без врахування специфіки вимірювань	Помилки у проектуванні вимірювальних процесів
Невідповідність структури метрологічної служби	Надмірно складна або неефективна структура, відсутність чіткого розподілу обов'язків	Затримки у виконанні завдань, плутанина в процесах

З огляду на те, що МЗ являє собою складну організаційно-технічну систему, її ускладнення зумовлено модернізацією сучасних виробничих процесів, потребою підвищення рівня керованості та автоматизації технологічного процесу, впровадженням більш точних методик вимірювань, а також зростанням вимог до якості та безпеки продукції. Тому одним із важливих завдань сучасних підприємств є створення високоефективних систем МЗ, що сприятимуть зниженню впливу чинників, пов'язаних із цією категорією джерел МР. МЗ охоплює всі складові виробничого процесу, включаючи технічну базу та персонал, відповідальний за метрологічну діяльність. Оскільки технічне оснащення та людський фактор є ключовими елементами цієї системи [68], їх вплив варто розглядати окремо, класифікуючи в окремі категорії та проводячи незалежну оцінку.

Технічні фактори. Джерела МР, пов'язані з технічним забезпеченням виробництва, впливають на кінцевий результат через використання у ТП невідповідного обладнання та технологій. Під таким обладнанням розуміють не лише апаратні засоби (еталони, ЗВТ), але й програмне забезпечення або їхні комбінації, що застосовуються для оптимізації ТП. До програмного забезпечення належать спеціалізовані операційні системи, програми для ЗВТ, системи для багатовимірних вимірювань із залученням великої кількості сенсорів,

автоматичного контролю стану систем, оцінки результатів вимірювань і захисту даних.

На сучасному етапі виробництва широкого застосування набувають автоматизовані системи вимірювання та контролю, які використовуються без безпосередньої участі спеціалізованого персоналу під час проведення вимірювань. Однак для їхньої ефективної роботи критично важливими є своєчасне обслуговування, калібрування та моніторинг контрольних показників. Якщо цього не забезпечити, можуть виникнути МР, які спричинять серйозні й незворотні наслідки, що в майбутньому позначаться на якості продукції та функціонуванні виробництва. Джерела МР, пов'язані з технічними факторами, представлено в таблиці 2.5.

Таблиця 2.5.

Джерела МР, пов'язані із технічними факторами

Джерело ризику	Опис	Приклад наслідків
Зношеність вимірювального обладнання	Механічні пошкодження, зниження точності через старіння компонентів	Постійні систематичні похибки, зниження достовірності вимірювань
Неправильне калібрування	Використання некаліброваних інструментів	Систематичні похибки
Збої в програмному забезпеченні	Неправильні алгоритми розрахунку	Втрата даних
Відсутність кліматичного контролю	Коливання температури, висока вологість	Вплив на стабільність та відтворюваність вимірювань
Недостатня точність еталонів	Використання вторинних еталонів без перевірки їх точності	Передача похибок від еталону на вимірювальні інструменти
Невідповідність інструментів стандартам	Використання обладнання без сертифікації чи метрологічної атестації	Недійсність результатів, юридичні наслідки
Неправильне транспортування чи зберігання	Транспортування без дотримання умов температури, вологи, механічних впливів	Пошкодження елементів обладнання, похибки у подальших вимірюваннях
Перевантаження обладнання	Використання ЗВТ понад його технічні можливості	Вихід із ладу обладнання, зниження точності

Людський фактор. Людський фактор виступає джерелом метрологічних ризиків, що виникають через вплив людської діяльності на технологічний процес. Зазвичай, такі ризики обумовлені недотриманням посадових обов'язків, низькою кваліфікацією, порушенням технологічних норм, процедур та корпоративних правил, а також помилками та зловживаннями.

Щоб забезпечити потрібну якість і зменшити кількість ризиків цієї категорії, підприємству необхідно приділяти особливу увагу навичкам, знанням і компетентності кожного працівника залежно від типу виконуваної роботи. Це стосується виконання таких завдань, як проведення вимірювань, складання графіків, заповнення звітів або догляд за вимірювальними приладами.

Згідно з [69] компетентність – це вміння мобілізувати в конкретній ситуації отримані знання та досвід, з врахуванням зовнішніх обставин. Некомпетентність персоналу призводить до неналежного обслуговування вимірювального обладнання, порушень під час вимірювань, проблем із виявленням і усуненням дефектів, а також до отримання недостовірних результатів, що впливає на ТП. Дослідження [70] показує, що різні аспекти людського фактора, такі як ознайомленість із завданнями, рівень втоми, підготовка та концентрація уваги, мають значний вплив на результати будь-якого виробничого процесу.

МР, пов'язані з людським фактором, необхідно вивчати незалежно від типу виробництва. Навіть на підприємствах із високим рівнем автоматизації їхній аналіз залишається критично важливим. Наприклад, у ядерній енергетиці, де контрольні процедури виконуються людьми, машинами або їхньою комбінацією [71], людський фактор відіграє значну роль у виробництві.

У сфері метрології, як і в інших галузях, персонал є одним із основних джерел ризиків [50]. В таблиці 2.6 наведено джерела МР, пов'язані із людським фактором.

Таблиця 2.6.

Джерела МР, пов'язані із людським фактором

Джерело ризику	Опис	Приклад наслідків
Низький рівень кваліфікації	Відсутність знань або досвіду у персоналу	Помилки під час вимірювання, пошкодження обладнання
Порушення процедур	Недотримання інструкцій, графіків калібрування	Неправильні результати вимірювань, недійсні сертифікації
Фізичний та психологічний стан	Втома, стрес, демотивація, постійний тиск через строки або високі вимоги	Зниження точності операцій, аварійні ситуації, погіршення прийняття рішень
Неправильна організація робочих місць	Невідповідність умов праці (освітлення, шум, температура)	Підвищений рівень похибок через незручні умови
Відсутність резервного персоналу	Неможливість замінити працівника у разі хвороби чи звільнення	Переривання технологічного процесу
Неправильний розподіл обов'язків	Виконання складних завдань некваліфікованим персоналом	Збільшення похибок, пошкодження обладнання

Щоб звести до мінімуму вплив МР, пов'язаних із людським фактором, роботодавець має забезпечити відповідне обладнання та приміщення, які сприятимуть свободі пересування й точності виконання дій. Керівництво повинно бути впевненим у компетентності працівників, особливо тих, хто працює з обладнанням, що вимагає спеціальних умінь і досвіду. Усі завдання чи то калібрування, чи догляд за приладами мають доручатися з урахуванням відповідної освіти, практичного досвіду та рівня підготовки.

2.2. Специфіка системи оцінювання метрологічних ризиків

Специфіка системи оцінювання метрологічних ризиків якості продукції на етапі виготовлення полягає у необхідності формування таких методичних та організаційних підходів, які забезпечують відповідність вимогам міжнародних стандартів. На сьогоднішній день існують нормативні документи, які формують вимоги до управління ризиками, а саме:

- ДСТУ EN ISO 9001:2018. Системи управління якістю. Вимоги [30].

- ДСТУ ISO 31000:2018. Менеджмент ризиків. Принципи та настанови [31].
- ДСТУ ІЕС/ISO 31010:2013. Керування ризиками. Методи загального оцінювання ризику [28].

Оскільки специфіка системи оцінювання метрологічних ризиків значною мірою визначатиметься саме цими вимогами та принципами, тому проведемо аналіз вимог до системи та її специфіки на основі вищевказаних нормативних документів.

Аналіз ISO 9001 з погляду оцінювання метрологічних ризиків полягає в тому, щоб інтегрувати вимоги щодо визначення, контролю та зменшення впливу відхилень у вимірюваннях у загальну систему управління ризиками. Нижче наведено основні моменти, які варто враховувати.

Інтеграція дій у процеси СУЯ (п. 4.4). Дії з управління метрологічними ризиками слід розглядати не як окрему ініціативу, а як частину процесів виготовлення, контролю якості, зберігання, випробувань тощо.

Врахування контексту та вимог зацікавлених сторін (п. 6.1.1). При оцінюванні метрологічних ризиків важливо враховувати як внутрішні фактори (технічний стан обладнання, кваліфікацію персоналу, методи вимірювань), так і зовнішні чинники (законодавчі вимоги, стандарти галузі, очікування замовників). Вимоги зацікавлених сторін (зокрема замовників і регуляторних органів) можуть передбачати особливо жорсткі допустимі межі невизначеності вимірювань або частоту калібрування, що вплине на вибір дій для реагування на ризик.

Планування заходів щодо виявлених ризиків (п. 6.1.2). Система оцінювання метрологічних ризиків має містити механізми визначення пріоритетів ризиків та формування конкретних дій для зменшення їх впливу (наприклад, посилення контролю, профілактика несправностей, періодичний аудит вимірювальних методик).

Пропорційність дій потенційному впливу (п. 6.1.2). Це означає, що заходи з контролю (калібрування, перевірка, аудит методик) мають бути тим ретельнішими й частішими, чим більший ризик критичних відхилень внаслідок

неправильних результатів вимірювання. Водночас надмірне посилення контролю може бути економічно недоцільним, тому організація повинна балансувати між ризиком та вартістю його мінімізації.

Окрім вимог стандарту ISO 9001, що регламентує систему управління якістю, ефективне управління метрологічними ризиками в організації потребує також урахування рекомендацій міжнародного стандарту ISO 31000. Нижче наведено аналіз цього стандарту з позиції системи оцінювання ризиків.

Повноваження та розподіл відповідальності (п. 5.2). Вищий менеджмент та наглядові органи мають постійно відстежувати ризики й оцінювати ефективність системи для прийняття коригувальних дій і вдосконалення процесів. Керівництво відповідає за впровадження ризик-менеджменту в усі процеси й проєкти, формуючи єдині підходи до оцінювання та контролю ризиків. Необхідно розробити чітку політику щодо управління ризиками, а також виділити достатні фінансові, кадрові та інформаційні ресурси для її реалізації. Окрім цього необхідно визначити конкретні ролі на кожному рівні організаційної структури, щоб забезпечити результативне оцінювання й мінімізацію ризиків.

З огляду на вимоги пункту 5.2, чітко прослідковується необхідність ієрархічної розподіленої відповідальності в управлінні ризиками. У контексті впровадження системи оцінювання метрологічних ризиків доцільно застосувати так звану «піраміду відповідальності» з трьома рівнями. На рисунку 2.3. представлено піраміду організаційних рівнів відповідальності, де:

- Верхній рівень (керівництво) – стратегічний рівень, визначає стратегію і політику управління метрологічними ризиками.

- Середній рівень (менеджери, інженери) – тактичний рівень, аналізує та приймає рішення про коригувальні дії.

Нижній рівень (оператори, майстри) – операційний рівень, виконує вимірювання, фіксує дані, впроваджує зміни безпосередньо у виробничому процесі.



Рисунок 2.3. Піраміда організаційних рівнів відповідальності системи оцінювання метрологічних ризиків

Періодичність оцінки (п. 5.6). Для оцінки ефективності ризик-менеджменту організація повинна періодично визначати результативність системи відповідно до мети, планами та очікуваними результатами та визначати чи залишається вона придатною для досягнення поставлених цілей організації.

Враховуючи розподіл відповідальності (рис. 2.3.) рекомендована періодичність оцінювання на різних рівнях наведена в таблиці 2.7.

Таблиця 2.7.

Періодичність проведення оцінки результативності системи

Рівень	Періодичність	Зміст / Обсяг перевірки
Верхній рівень (керівники, наглядові органи)	Не рідше одного разу на рік	- Оцінка ефективності всієї системи ризик-менеджменту. - Аналіз стратегічних ризиків і результатів впровадження політики. - Прийняття рішень щодо вдосконалення системи.
Середній рівень (керівники підрозділів, менеджери, інженери)	Щоквартально	- Перевірка виконання планів управління ризиками у межах підрозділів. - Коригування ресурсів, ініціювання додаткових заходів. - Актуалізація процедур і методик для контролю ризиків.
Нижній рівень (оператори, майстри)	Щомісяця або за підсумками виробничого циклу/проекту	- Оцінювання результатів у повсякденній діяльності. - Надання звітів щодо виявлених інцидентів та відхилень. - Формування пропозицій із покращення процесів і практик.

Безперервне вдосконалення (п. 5.7). Організація повинна постійно відстежувати зовнішні та внутрішні зміни, вносячи необхідні корективи до системи управління ризиками для збереження або підвищення її цінності. Система ризик-менеджменту має постійно вдосконалюватися з погляду придатності, достатності та ефективності інтеграції процесів управління ризиками в діяльність організації. При виявленні прогалин або можливостей для покращення слід розробляти відповідні плани й завдання, призначати відповідальних за їх виконання та оцінювати внесок цих поліпшень у загальну результативність ризик-менеджменту.

Формування обсягу та критерії оцінювання ризиків (п. 6.3). Система оцінювання метрологічних ризиків повинна визначати обсяг і контекст процесу управління ризиками, узгоджуючи його з цілями та стратегією організації на різних рівнях (стратегічному, операційному тощо). Організація має чітко окреслити сфери застосування ризик-менеджменту, зокрема конкретні завдання й результати, що планується досягнути. При цьому слід встановити допустимий рівень і тип ризиків, а також розробити критерії, які дають змогу об'єктивно оцінювати їхню значущість і підтримувати процес прийняття управлінських рішень. Зазначені критерії мають відповідати загальній політиці управління ризиками, відображати цінності й ресурси підприємства. Однією з вимог є обов'язкове врахування послідовності й комбінацій різних ризиків, оскільки взаємодія кількох чинників може істотно вплинути на результати оцінювання і спричинити появу нових ризиків.

З точки зору системного аналізу взаємовплив факторів впливу системи оцінювання метрологічних ризиків можна представити у вигляді кортежу:

$$S_{MP} = \langle E, I, R_{XY} \rangle, \quad (2.1)$$

де $E = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$ – множина зовнішніх факторів (науково-інноваційні, соціально-економічні, природньо-екологічні), $I = \{i_1, i_2, \dots, i_n\}$ – множина

внутрішніх факторів (людські, технічні, фактори, що стосуються метрологічного забезпечення), $R_{XY} \subseteq X \times Y$ – множина відношень, що описує вплив факторів множини X на фактори множини Y .

Оскільки кожен із перелічених чинників потенційно може впливати не лише на інші фактори в межах власної групи, а й на фактори з протилежної групи, необхідно визначити систему відношень, які описуватимуть усі можливі «лінії впливу». Зокрема:

- $R_{EE} \subseteq E \times E$ – відношення впливу між зовнішніми факторами, коли соціальні умови (наприклад, e_a) можуть спричинити зміну наукових підходів (e_b), і навпаки;

- $R_{II} \subseteq I \times I$ – відношення впливу всередині групи внутрішніх факторів, наприклад, коли технічні обмеження (фактор i_a) створюють ризики для метрологічного забезпечення (фактор i_b);

- $R_{EI} \subseteq E \times I$ – відношення, що визначають вплив зовнішніх факторів на внутрішні, наприклад вплив екологічних вимог на кадрові рішення чи перенавчання працівників;

- $R_{IE} \subseteq I \times E$ – відношення впливу внутрішніх факторів на зовнішні, наприклад, зміни у організаційній культурі підприємства, які згодом впливають на соціальний стан регіону за умови, що підприємство є містоутворюючим.

Таким чином, усі типи взаємного впливу описуються чотирма відношеннями:

$$R_{XY} = \langle R_{EE}, R_{II}, R_{EI}, R_{IE} \rangle. \quad (2.2)$$

Загалом формалізована модель усієї системи ризиків може бути подана кортежем:

$$S_{MP} = \langle E, I, R_{EE}, R_{II}, R_{EI}, R_{IE} \rangle, \quad (2.3)$$

де кожний елемент кортежу відповідає множині факторів (зовнішніх чи внутрішніх) або відношенню між цими множинами. Такий підхід відображає складну та багаторівневу природу системи оцінювання ризиків. З одного боку, зовнішні фактори (екологічні, соціальні чи наукові) можуть бути незалежними від управлінських рішень підприємства, однак безпосередньо задають контекст функціонування системи (наприклад, через законодавчі обмеження або суспільний запит на якість продукції). З іншого боку, внутрішні фактори (насамперед людські ресурси та технічне забезпечення) залишаються в межах керованості, проте здатні не тільки залежати від зовнішніх умов, а й самі впливати на зовнішнє середовище за певних умов.

Зазначимо, що кожне відношення R_{XY} може бути як бінарним (тобто факт впливу або його відсутності), так і «ваговим» - із кількісним оцінюванням сили впливу. У такому випадку необхідно вводити функцію ваг (наприклад $w_R(x, y) \in \mathbb{R}_+$), яка дає змогу виявити, які з факторів є найбільш критичними з погляду впливу та утворення нових ризиків.

Документація процесу оцінювання та забезпечення звітності (п. 6.7). Організація повинна забезпечувати належне документування та звітування щодо процесу оцінювання ризиків. По-перше, якісне ведення записів дає змогу ефективно комунікувати результати та дії із ризик-менеджменту на всіх рівнях організації, підтримуючи ухвалення рішень і взаємодію зі зацікавленими сторонами. По-друге, документування допомагає системно вдосконалювати процеси управління ризиками, адже створює базу для аналізу та зворотного зв'язку.

Для документації процесу рекомендується використання протоколу оцінювання метрологічних ризиків, який повинен забезпечувати прозорість і повноту методу аналізу ризиків і його результатів та повинен містити нижченаведені розділи.

Аркуш погодження. Цей розділ містить основну ідентифікаційну інформацію про процес оцінювання ризиків: підписи відповідальних осіб (членів експертної

групи та керівника тощо); місце та дата проведення оцінювання; номер чи код документа; наявність печатки або затвердженого грифа. На рисунку 2.4. наведено зразок оформлення аркуша погодження протоколу оцінювання метрологічних ризиків.

ПРОТОКОЛ ОЦІНЮВАННЯ МЕТРОЛОГІЧНИХ РИЗИКІВ

№ _____ від « _____ » _____ р

Місце проведення:			
П.І.Б.	Посада	Підпис	Дата
<i>Керівник групи з оцінювання:</i>			
<i>Експерти групи з оцінювання:</i>			
<i>Узгоджено:</i>			
<i>Погоджено:</i>			

Рисунок 2.4. Аркуш погодження протоколу оцінювання метрологічних ризиків

Методи та інструменти аналізу ризиків. У цьому пункті описуються та обґрунтовуються методи, які застосовуються для виявлення, аналізу та оцінювання метрологічних ризиків, а також відповідні інструменти (матриці, контрольні листи, схеми тощо). На рисунку 2.5. наведено приклад таблиці з описом методів та інструментів аналізу ризиків.

Найменування методів та інструментів аналізу ризиків		
Допоміжні методи ідентифікації ризиків:	Блок-схема	<input type="checkbox"/>
	5 чому	<input type="checkbox"/>
Допоміжні методи ідентифікації та оцінки ризиків:	Діаграма Ішикави	<input type="checkbox"/>
	Ранжирування та фільтрація	<input type="checkbox"/>
Статистичні методи:	Контрольні карти Шухарта	<input type="checkbox"/>
Основні методи:	Аналіз характеру наслідків відмов (FMEA)	<input checked="" type="checkbox"/>
	Аналіз ризиків та критичні контрольні точки (НАССР)	<input type="checkbox"/>
	Аналіз дерева помилок (Fault Tree Analysis – FTA)	<input type="checkbox"/>
Інше		<input type="checkbox"/>

Рисунок 2.5. Методи та інструменти аналізу метрологічних ризиків

Мета (цілі) оцінювання ризиків. У цьому розділі протоколу формулюється основна мета проведення оцінювання. Також зазначаються конкретні завдання (наприклад, розробка планів дій щодо усунення метрологічних ризиків, коригувальні та запобіжні заходи).

Обсяг та межі оцінювання. Тут фіксується, які саме об'єкти, процеси чи етапи розглядаються під час оцінювання: перелік елементів виробництва, що підлягають аналізу; тривалість та період, протягом якого проводиться оцінювання (дата початку та завершення); обмеження (наприклад, фінансові, часові, технічні).

Опис та реєстр виявлених ризиків. Визначені ризики вносяться до реєстру ризиків, де відображаються: категорія ризиків; ризикова ситуація; причини появи ризикової ситуації; її наслідки; наявні заходи щодо попередження ризикової ситуації; наявні заходи щодо виявлення ризикової ситуації у разі її виникнення. У таблиці 2.8. наведено структуру реєстру метрологічних ризиків із відповідними полями. Для кожного ризику вказується також відповідальна особа за його моніторинг та усунення.

Таблиця 2.8.

Реєстр метрологічних ризиків

№ п/п	Категорія ризиків	Ризикова ситуація	Причини появи ризикової ситуації	Наслідки появи ризикової ситуації	Наявні заходи по попередженню появи ризикової ситуації/ її причини	Наявні заходи по виявленню ризикової ситуації/її причини (у разі її виникнення)	Заходи по зниженню ризиків / Відповідальність/ Термін виконання
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Соціально-економічні						
2	Науково-інноваційні						
3	Природньо-екологічні						
4	Людський фактор						
5	Технічні фактори						
...	...						
n	Фактори системи МЗ						

Пропозиції зниження та управління ризиками. Цей розділ повинен містити інформацію щодо негайних (короткострокових) заходів для зниження критичних ризиків (наприклад, планові перевірки обладнання, додаткова навчальна сесія для персоналу тощо) та довгострокові стратегії (оновлення внутрішніх інструкцій з метрологічного контролю, придбання нового обладнання, удосконалення методів вимірювань). Також повинно передбачатися оцінювання ефективності вже впроваджених заходів та актуалізація реєстру ризиків у випадку змін.

Висновки та рекомендації. Цей розділ містить підсумкове узагальнення результатів оцінювання: огляд загальної кількості ризиків та їхніх рівнів; виявлені тенденції або закономірності у виникненні ризиків; рекомендації щодо удосконалення метрологічних процесів (оновлення стандартів, графіків повірки тощо).

Додатки. В додатках наводиться детальна методологія (розширений опис алгоритмів та формул), перелік термінів та визначень, повна версія реєстру ризиків або первинних даних, якщо обсяг інформації значний.

Таким чином, запропонований протокол аналізу ризиків відповідає вимогам пункту 6.6 стандарту ISO 31000, оскільки передбачає документування всіх ключових етапів процесу.

2.3. Розроблення концепції управління метрологічними ризиками

З метою забезпечення безперервності виробничого процесу, підвищення якості продукції та зниження рівня потенційних втрат (як матеріальних, так і нематеріальних), на промислових підприємствах дедалі ширше застосовуються системи управління ризиками. Такий підхід відповідає рекомендаціям міжнародних стандартів (зокрема, [28, 31]) та дозволяє мінімізувати негативні наслідки ризикових ситуацій.

Актуальність розроблення концепції управління метрологічними ризиків обумовлена необхідністю сформулювати цілісну методологічну основу, що

визначає механізми визначення, аналізу та регламентації дій для зменшення негативних впливів на якість продукції. На рисунку 2.6 подано узагальнену схему системи управління МР із зображенням ключових елементів системи.

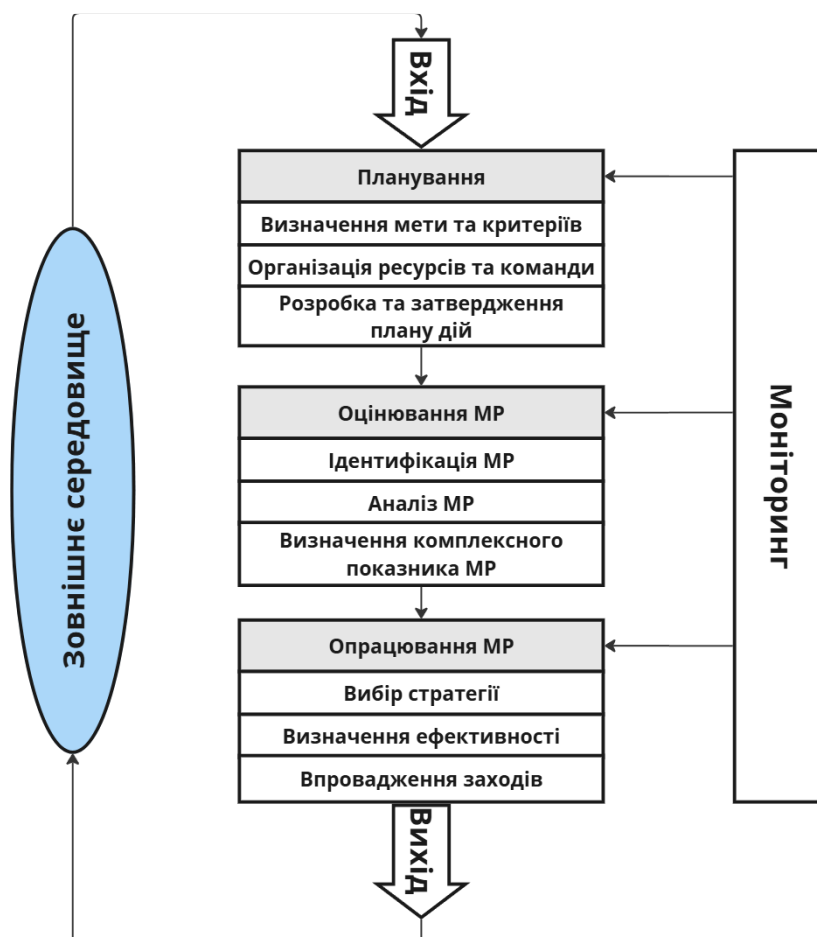


Рисунок 2.6. Узагальнена схема системи управління метрологічними ризиками

Система складається з 3 ключових етапів: планування, оцінювання та опрацювання МР. Розглянемо кожен з цих етапів детальніше.

Планування. Ключову роль у процесі управління МР цьому відіграє етап планування. Саме на ньому формуються цілі, визначаються сфера дії системи, учасники процесу та критерії ризику, які надалі впливають на всю логіку ідентифікації, аналізу та оцінювання ризиків. На рисунку 2.7. наведено діаграму процесу планування.



Рисунок 2.7. Gantt діаграма етапу планування

Етап планування системи управління метрологічними ризиками передусім передбачає визначення цілей та сфери застосування, які слугуватимуть орієнтиром для подальших етапів ідентифікації, аналізу та оцінювання ризиків. Згідно з рекомендаціями ISO 31000, першим кроком є формулювання ключових завдань щодо забезпечення точності вимірювань і відповідності метрологічним нормам у межах конкретних виробничих процесів. Ці завдання можуть охоплювати підвищення надійності контрольних операцій, мінімізацію ймовірності появи браку через неправильні вимірювання та покращення ефективності моніторингу критичних параметрів у виробництві.

Наступним важливим аспектом планування стає встановлення відповідного контексту та критеріїв ризику. З урахуванням вимог нормативних документів, специфіки галузі та внутрішньої політики підприємства визначаються допустимі межі відхилень, а також «апетит до ризику» - прийнятний рівень невідповідностей у вимірювальному процесі. Крім того, аналізується й зовнішній контекст: наявність обов'язкових регуляторних норм, галузевих стандартів, потенційного впливу замовників і постачальників на систему контролю якості.

Цей етап допомагає узгодити бажання підприємства уникати ризиків із реалістичними економічними та технічними умовами, в яких воно функціонує.

Паралельно з визначенням критеріїв ризику формують команду або експертну групу, яка відповідатиме за подальше впровадження системи. Тут визначають сфери відповідальності ключових фахівців. У класичних підходах (наприклад, FMEA, HAZOP, Fault Tree Analysis, Ishikawa diagrams [72, 73]) передбачається залучення мультидисциплінарної групи фахівців із різних напрямів діяльності підприємства. Зазвичай до складу експертної групи входять:

- Технічні спеціалісти (інженери-технологи, інженери з обслуговування обладнання) - забезпечують фахову оцінку стану та особливостей експлуатації обладнання, аналізують можливі точки збою й описують технічні чинники ризику.

- Спеціалісти з якості (відповідальні за контроль якості сировини, продукції та виробничих процедур) - оцінюють вплив ризикових подій на якість, відповідність стандартам і вимогам нормативної бази.

- Фахівці з охорони праці та екологічної безпеки - аналізують ризики, пов'язані з впливом виробничого середовища на здоров'я працівників, а також еколого-орієнтовані ризики.

- Фінансові аналітики - виконують економічну оцінку наслідків ризикових подій та беруть участь у формуванні рекомендацій щодо оптимізації витрат на заходи безпеки.

- Керівники різних рівнів (керівники виробничих підрозділів, проєктні менеджери) - забезпечують стратегічний погляд, визначають пріоритети й ухвалюють рішення щодо доцільності та черговості впровадження заходів.

Спираючись на внутрішні розпорядження чи накази керівництва, формалізують структуру комунікацій, щоб кожен етап плану виконувався без дублювання функцій і з чітким розумінням зони відповідальності. Для наочного відображення розподілу обов'язків та уникнення можливих непорозумінь застосовують RACI-матрицю (табл. 2.9.), яка чітко визначає, хто виконує

завдання, хто ухвалює остаточні рішення, кого консультують та кого тримають у курсі подій.

Таблиця 2.9.

RACI-матриця

Завдання/Процес	Керівник підприємства (КПП)	Керівник підрозділу (КП)	Менеджер з якості (МЯ)	Експертна група (ЕГ)	Інженер метролог (ІМ)	Спеціаліст виробничого процесу (СВП)
Визначення мети та критеріїв	A	C	R	C	C	I
Організація ресурсів та команди	A	R	C	C	I	I
Розробка та впровадження плану дій	C	A	R	C	C	I
Ідентифікація МР	I	C	A	R	R	I
Аналіз МР	I	C	A	R	R	I
Оцінювання МР	I	C	A	R	R	I
Вибір стратегії опрацювання МР	C	A	R	C	C	I
Визначення ефективності мінімізації	I	A	R	C	C	I
Впровадження заходів щодо мінімізації	I	A	C	I	R	R

Пояснення позначень RACI матриці:

- R (Responsible) — «Виконує завдання»: особа, яка безпосередньо виконує або реалізує процес, відповідальна за практичний результат.
- A (Accountable) — «Несе відповідальність»: особа з правом ухвалювати остаточні рішення і відповідає за кінцевий результат.
- C (Consulted) — «Консультація»: особа, яка надає експертну думку, поради, необхідну інформацію та бере участь у прийнятті рішень.
- I (Informed) — «Поінформований»: особа, яку потрібно тримати в курсі подій, але яка не бере активної участі у процесі.

Окремої уваги заслуговує питання ресурсів і термінів, оскільки будь-яка система управління ризиками потребує достатнього фінансування й оптимального розподілу часу. У плані мають бути передбачені витрати на калібрування чи закупівлю нового обладнання, навчання персоналу, організацію контрольних перевірок і аудитів. Також визначаються часові рамки реалізації заходів: складається попередній графік або спрощена Gantt-діаграма (рис. 2.7.) з чіткими пунктами контролю, коли буде можливо оцінити проміжні результати та, за потреби, скоригувати план.

Важливим результатом цього етапу стає створення або оновлення внутрішніх політик і процедур, які регламентують усі аспекти роботи з вимірюваннями та вимогами до метрологічного забезпечення. Крім того, планування завершується затвердженням документа, в якому офіційно зафіксовано, що саме підприємство визначає як прийнятні межі точності, яку стратегію воно обирає для моніторингу ризиків, та як розподіляються обов'язки між відповідальними особами. У такий спосіб етап планування створює міцний фундамент для подальших дій із виявлення та аналізу метрологічних ризиків, а також забезпечує інтегрованість системи управління ризиками в усі рівні виробничої діяльності.

Оцінювання МР. Згідно з [31], оцінювання ризику - це об'єднаний процес ідентифікації, аналізу та оцінювання ризику. Тобто він передбачає послідовне виявлення потенційно небажаних подій, дослідження ймовірності їх виникнення та оцінку значущості можливих наслідків. У контексті виробничих процесів та системи управління ризиками МР ідентифікація та аналіз ризикових подій посідають центральне місце, адже саме на цьому етапі виявляють чинники загроз та формують базові дані для подальшого прийняття рішень щодо їхньої мінімізації. З огляду на визначену стандартом концепцію, комплексний розгляд факторів небезпеки та ймовірних сценаріїв ризикових подій є підґрунтям для своєчасного впровадження профілактичних або коригувальних заходів.

Як відображено на рисунку 2.8., зазначений процес містить послідовність логічно пов'язаних етапів: від вибору об'єкта дослідження (або конкретного

виробничого елемента) до формування звіту з результатами аналізу. Кожен етап має власні «входи» у вигляді джерел інформації, критеріїв прийняття рішень тощо, а також «виходи», що слугують основою для подальших кроків або є результатом для кінцевого користувача.

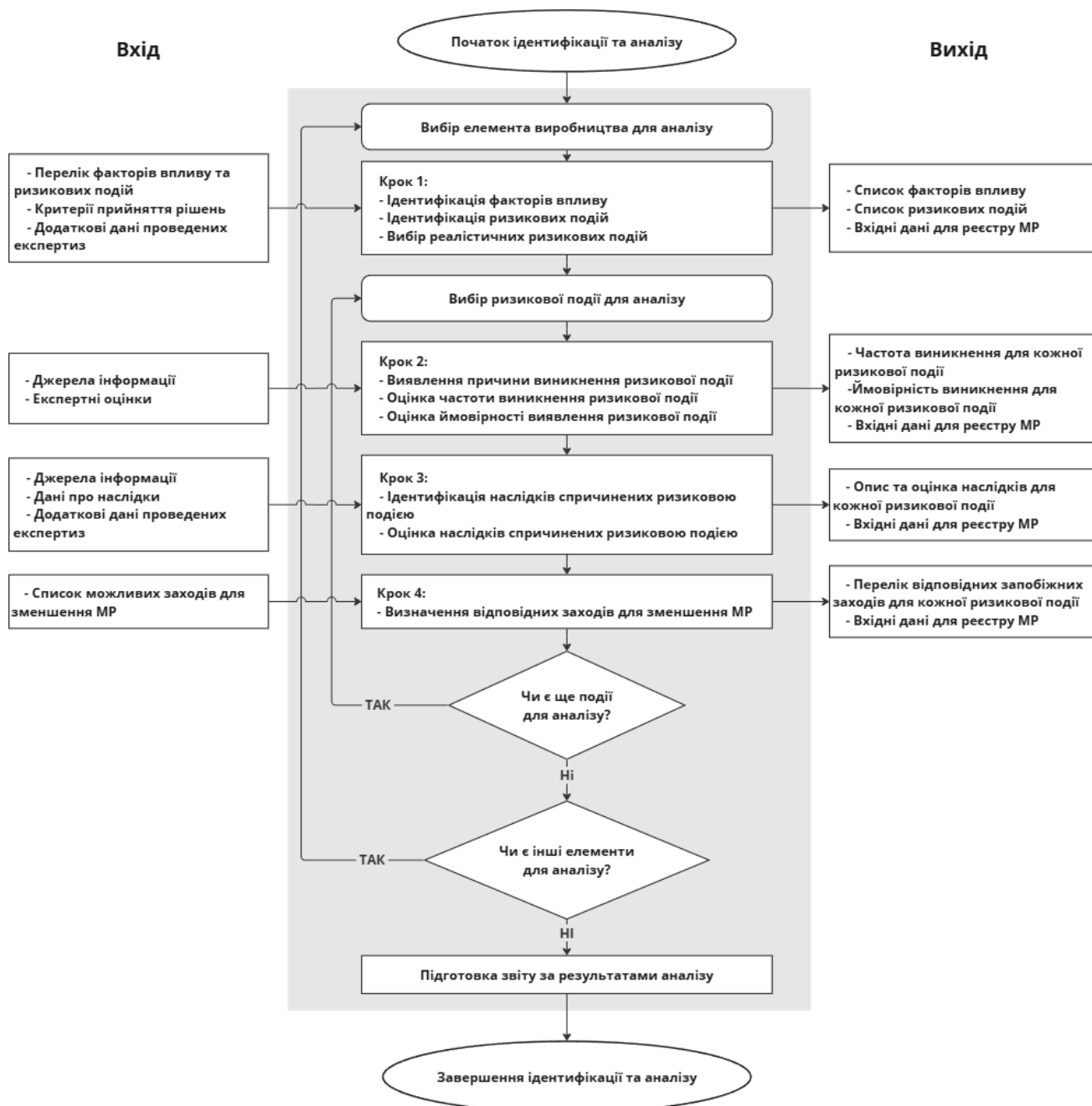


Рисунок 2.8. Узагальнена блок-схема процесу ідентифікації та аналізу метрологічного ризику

Наведена блок-схема побудована за принципом послідовного виконання чотирьох кроків із перевіркою (в кінці кожної ітерації), чи не залишилось «нерозглянути» ризикові події або елементи виробництва.

Перед початком здійснюється ідентифікація об'єкта або підсистеми, де можуть виникати невідповідності або де якість вимірювань є критичною. Під об'єктом розуміють:

- Технологічні лінії з високими вимогами до точності.
- Конкретні засоби вимірювальної техніки.
- Контрольно-вимірювальні процедури, передбачені виробничими регламентами або стандартами якості.

Вибір об'єкта визначається цілями підприємства, доступними ресурсами та критичністю кожного елемента для загального виробничого процесу. На цьому ж етапі уточнюються критерії оцінювання – наприклад, гранично допустимі витрати на покриття ризиків, рівень готовності підприємства до зупинки процесу, вимоги стандартів якості та безпеки.

Першим кроком даного процесу є ідентифікація факторів впливу та ризикових подій. Спираючись на опрацьовані каталоги ризик-факторів, дані про історичні відмови обладнання, статистичні показники щодо інцидентів, а також експертні оцінки, формується перелік можливих чинників ризику. Для цього застосовуються методи «мозкового штурму», експертні опитування, аналіз первинної документації про збої у виробництві. На підставі виявлених факторів визначаються конкретні події, які можуть призвести до втрат якості, порушень графіків виробництва тощо. Це можуть бути несправність сенсорів, недотримання графіків калібрування, помилки персоналу, відхилення за параметрами якості. Серед усіх можливих подій виділяють ті, що мають найбільшу імовірність або найсуттєвіші наслідки. Такий відбір здійснюється за допомогою матриць пріоритезації (рис. 2.9.) чи методом Pareto [74], відсіюючи малоімовірні або малозначущі ризикові події.

		Значущість наслідків				
		Дуже низька Е	Низька D	Середня С	Висока В	Дуже висока А
Ймовірність	Дуже висока А	Помірний АЕ - 5	Значний AD - 10	Значний АС - 15	Критичний AB - 20	Критичний AA - 25
	Висока В	Помірний BE - 4	Значний BD - 8	Значний BC - 12	Критичний BB - 16	Критичний BA - 20
	Середня С	Незначний CE - 3	Помірний CD - 6	Значний CC - 9	Значний CB - 12	Значний CA - 15
	Низька D	Незначний DE - 2	Помірний DD - 4	Помірний DC - 6	Значний DB - 8	Значний DA - 10
	Дуже низька Е	Незначний EE - 1	Незначний ED - 2	Незначний EC - 3	Помірний EB - 4	Помірний EA - 5

Рисунок 2.9. Матриця пріоритезації метрологічних ризиків

Другим кроком є аналіз причин та визначення частоти виникнення ризикової події. На цьому етапі з'ясовують, чому може вникнути обрана ризикова подія, як часто вона може траплятися та як часто ця подія проявляється у разі її виникнення. Основні прийоми:

- Причинно-наслідковий аналіз (метод «5 чому?», дерева відмов, Ishikawa-діаграма). Застосування таких інструментів допомагає структуровано розкласти подію на безпосередні й опосередковані причини, виявити «вузькі місця».

- Оцінка ймовірності або частоти. Використовуючи історичні дані [75], а в разі браку даних – експертні оцінки із залученням спеціалістів. Чим точніша вхідна інформація, тим достовірніший результат аналізу.

Результатом цього кроку є чисельна або категорійна оцінка імовірності виникнення та виявлення кожної події.

Наступний крок полягає у визначенні масштабу наслідків або впливу на виробничий процес, який може спричинити ризикова подія. Тут розглядають:

- Технічні наслідки: виникнення відхилень параметрів обладнання, виготовлення неякісної, зниження періоду експлуатації агрегатів.

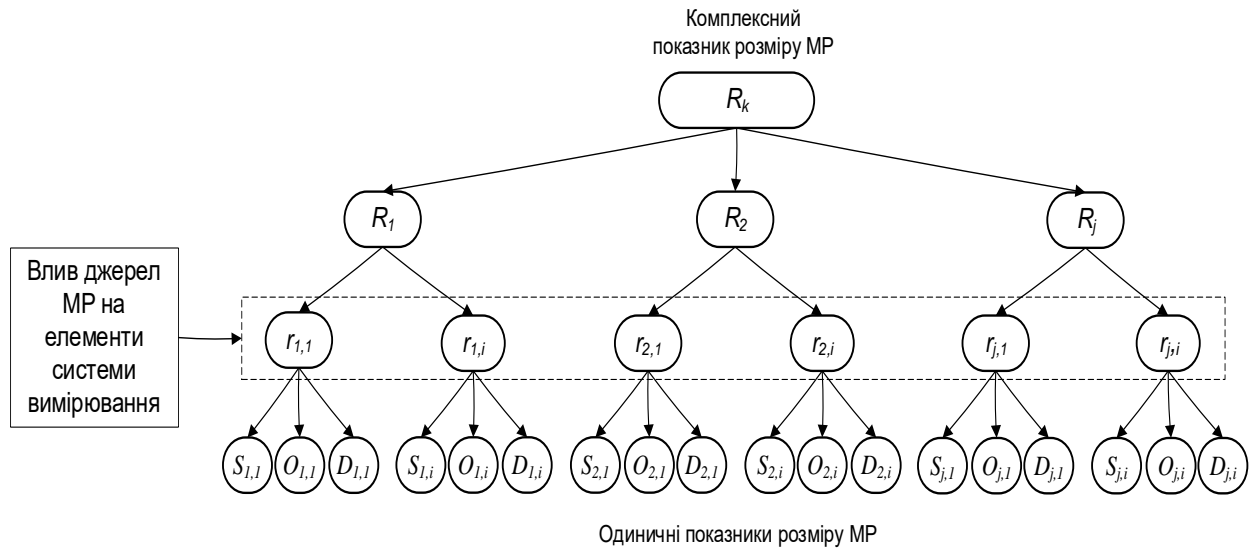
- Економічні наслідки: витрати на переробку або утилізацію браку, зменшення прибутку внаслідок втрати замовників.
- Репутаційні та регуляторні наслідки: можливі претензії з боку контролюючих органів, відмова клієнтів від співпраці, погіршення позицій на ринку.

Оцінка наслідків може бути як кількісною (наприклад, у грошовому еквіваленті або втратою точності), так і якісною (поділ на категорії «критичні», «серйозні», «несуттєві»). Шкалу категоризації встановлюють відповідно до політики підприємства.

Останнім кроком є встановлення заходів для зниження метрологічних ризиків. Визначивши ймовірність та наслідки можливих ризиків, розробляють план дій, що спрямований на зменшення імовірності виникнення помилок та мінімізацію шкоди у разі їх появи. Така система заходів має бути пропорційна економічній доцільності, аби витрати на вдосконалення метрологічної інфраструктури не перевищували очікуваної вигоди від зменшення ймовірності/наслідків помилок.

За результатами виконання вищевказаних кроків готуються відповідний звіт та заповнюється реєстр МР (рис. 2.8.).

Після формування зазначених документів здійснюється оцінювання МР. У зв'язку з тим, що поняття «Метрологічний ризик» включає комплекс необхідних процедур та дій з управління і моніторингу МР, то є доцільним введення спеціального показника, за допомогою якого можна оцінити розмір МР і який забезпечує узагальнене відображення сукупного рівня метрологічного ризику й дозволяє ухвалювати обґрунтовані рішення щодо його мінімізації. В даній роботі пропонується підхід до визначення розміру МР в процесі виробництва за допомогою комплексного показника розміру МР. З метою наочного відображення рівня взаємодії властивостей і взаємозв'язку групових та одиничних показників, що входять до складу комплексного показника розміру МР, застосовується граф-модель представлена на рисунку 2.10.



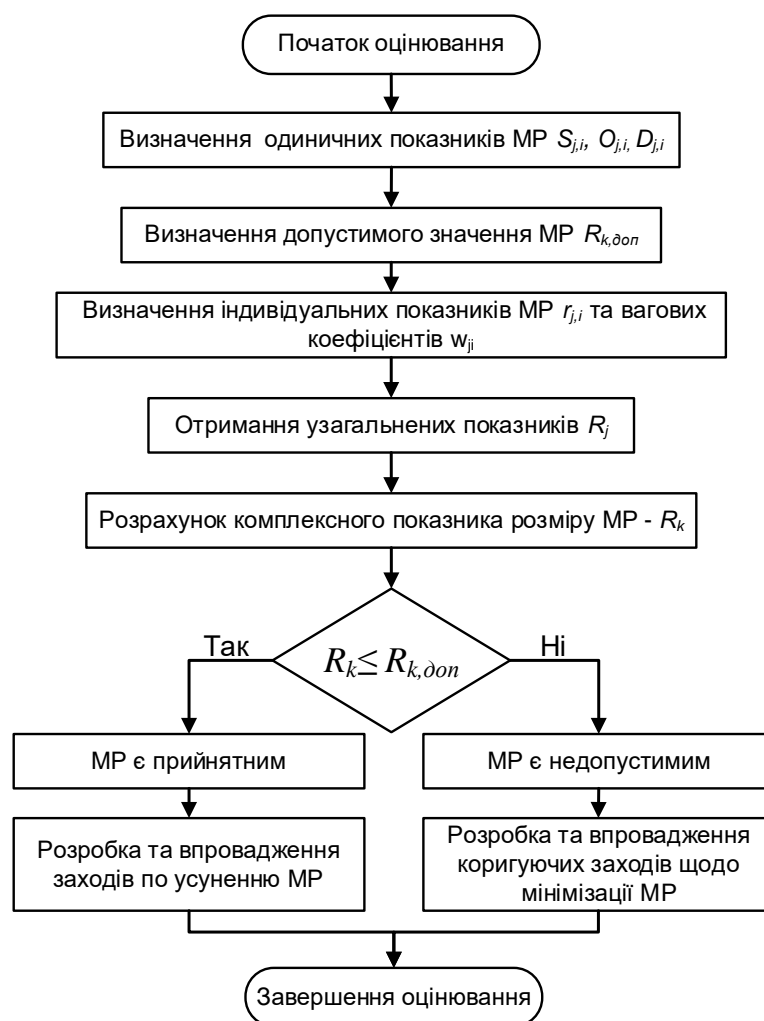
Рисунку 2.10. Граф-модель комплексного показника метрологічного ризику

Пропонований показник «Розмір метрологічного ризику», позначений на рисунку 2.10 як R_k , є комплексним, оскільки включає множину як узагальнених показників (R_1, R_2, \dots, R_j) так і індивідуальних ризиків ($r_{1,1}, r_{2,1}, \dots, r_{j,i}$), що характеризують складові елементи системи оцінювання МР. Завдяки такій побудові можна послідовно відстежувати внесок кожного структурного рівня на комплексний показник розміру МР та застосовувати відповідні заходи для зниження метрологічних ризиків на різних рівнях.

Узагальнені показники відображають основні групи чи напрями у межах яких можуть виникати індивідуальні ризики. При цьому кожен індивідуальний ризик визначається за допомогою одиничних показників, що встановлюються на етапі ідентифікації та аналізу. Значення одиничних показників визначаються на етапі ідентифікації та аналізу, де значення одиничного показника оцінюється за прийнятою шкалою оцінки. Так як, процес аналізу ризиків полягає у визначенні наслідків та їхніх ймовірностей відносно ідентифікованих ризикових подій, пропонується до одиничних показників розміру метрологічного ризику віднести значущість наслідків МР ($S_{j,i}$), ймовірність появи МР ($O_{j,i}$), можливість виявити та ідентифікувати МР ($D_{j,i}$).

Таким чином, узагальнені показники виступають проміжною ланкою між одиничними характеристиками та єдиним комплексним показником. Зміна значення будь-якого одиничного показника впливає на відповідний індивідуальний ризик, а сукупна зміна цих ризиків відображається у значенні узагальнених показників. У результаті такої ієрархічної взаємодії формується підсумковий рівень метрологічного ризику, що дає змогу всебічно оцінити його розмір та відобразити ступінь небезпек.

Архітектура пропонованої системи оцінки розміру МР, відповідно до рисунку 2.10. базується на 4-х ієрархічних рівнях показників: комплексний МР, узагальнений МР, індивідуальний МР і одиничні показники МР. Блок-схема алгоритму оцінювання розміру МР представлена на рисунку 2.11.



Рисунку 2.11. Блока-схема оцінювання комплексного показника МР

В представленій блок-схемі потрібно звернути увагу на етап визначення вагових коефіцієнтів $w_{j,i}$. Для об'єднання окремих ризикових показників у єдиний результат кожному показнику надають певну вагу. Ці вагові коефіцієнти визначаються на основі матриці впливу, яку формують, аналізуючи взаємний вплив ризиків, встановлений під час їх ідентифікації та аналізу, коли встановлювалися причинно-наслідкові зв'язки між потенційними небезпеками. Якщо один ризик може істотно загострити або змінити вплив іншого, це відображається за допомогою вагових коефіцієнтів.

Одним з ключових кроків процесу оцінювання є встановлення допустимого рівня $R_{k,доп}$. Це може бути нормативний поріг чи внутрішній критерій, нижче/вище якого ризик вважають неприйнятним. Порівнюючи обчислене R_k із $R_{k,доп}$, приймають рішення, чи потрібно подальше опрацювання для зменшення показника ризику (якщо $R_k > R_{k,доп}$), чи ризик залишається на прийнятному рівні (якщо $R_k \leq R_{k,доп}$).

Опрацювання МР. Опрацювання метрологічних ризиків є ключовим етапом у забезпеченні якості продукції під час виробничого процесу. Його метою є мінімізація впливу МР, пов'язаних із неточностями вимірювань, шляхом застосування системного підходу до управління ними. Це передбачає реалізацію комплексу заходів, спрямованих на оптимізацію технологічних процесів і використання високоточних засобів вимірювань, що дозволяє підвищити стабільність і надійність виробничих систем. Блок-схема процесу опрацювання МР наведено на рисунку 2.12.

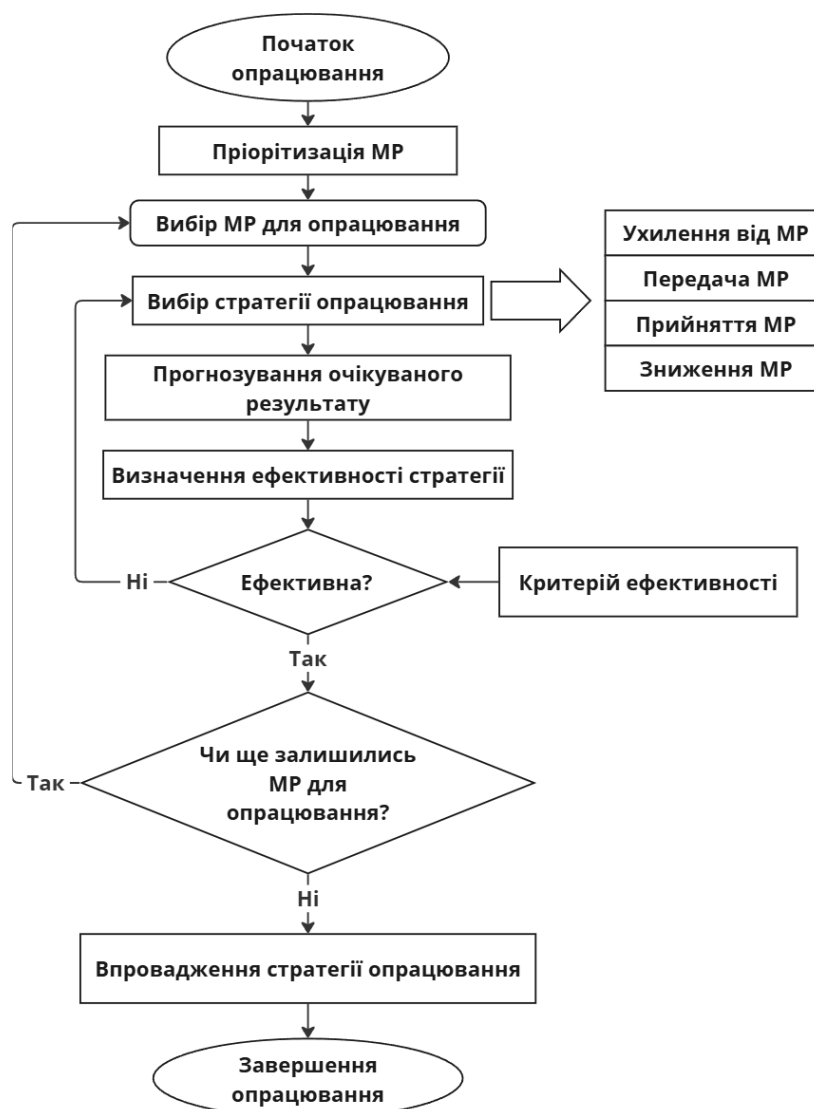


Рисунок 2.12. Блок-схема процесу опрацювання МР

Процес опрацювання метрологічних ризиків включає декілька ключових етапів, які реалізуються послідовно для мінімізації їх впливу. Спершу здійснюється пріоритизація ризиків, що дозволяє виділити найбільш критичні для опрацювання. Для кожного ризику обирається одна з наступних стратегій:

- *Ухилення від МР* – стратегія, що повністю виключає можливість виникнення МР шляхом відмови від діяльності, процесу або рішень, що спричиняють МР. Застосовується якщо: МР є неприйнятним через значний негативний вплив на якість продукції; витрати на управління МР перевищують

вигоди від продовження діяльності; є альтернативні процеси або технології, які повністю виключають МР.

- *Передача МР* – стратегія делегації відповідальності за МР іншій стороні, яка має кращі можливості для його управління або зниження. Це може бути страхування, аутсорсинг або передача певних процесів зовнішнім організаціям. Застосовується якщо: виробництво не має достатньої експертизи або ресурсів для управління МР; МР можна ефективно передати іншій стороні, яка спеціалізується в певному процесі; витрати на передачу МР нижчі, ніж його потенційний негативний вплив.

- *Прийняття МР* – стратегія усвідомлення та погодження із існуванням МР без вжиття активних заходів для його зменшення. Застосовується, якщо МР незначний або витрати на його мінімізацію перевищують очікуваний негативний вплив.

- *Зниження МР* – стратегія вжиття активних заходів для зниження ймовірності виникнення ризику або зменшення його впливу. Це може включати покращення процесів, оновлення обладнання або посилення контролю якості. Застосовується якщо: МР є значущим, але його можна знизити до прийняттого рівня; є можливості для впровадження заходів, які зменшать ймовірність виникнення МР або його вплив; витрати на зменшення ризику є обґрунтованими порівняно з потенційними втратами.

Після цього здійснюється прогнозування очікуваного результату реалізації обраної стратегії. Цей етап є критично важливим, оскільки дозволяє оцінити доцільність впровадження конкретного підходу до мінімізації ризику. Прогнозування здійснюється на основі аналізу ключових показників, таких як ймовірність виникнення ризику, рівень його впливу на якість продукції та витрати на впровадження обраної стратегії [76].

Оцінка ефективності стратегії здійснюється за декількома критеріями. По-перше, розглядається співвідношення витрат на впровадження стратегії та її очікуваної вигоди, яка може включати зменшення дефектів, скорочення втрат

через брак або уникнення штрафів за недотримання метрологічних стандартів. По-друге, оцінюється реальна можливість зменшення ймовірності виникнення ризику до прийняттого рівня. Для цього проводиться моделювання впливу обраної стратегії на ключові виробничі параметри, зокрема точність вимірювань, стабільність процесів та дотримання нормативних вимог.

Якщо за результатами прогнозування обрана стратегія виявляється ефективною, тобто її впровадження призведе до досягнення поставлених цілей за розумні витрати, розпочинається процес реалізації заходів. Якщо ж прогнозовані результати є незадовільними, відбувається повернення до етапу вибору стратегії для розгляду альтернативних підходів. Процес завершується після успішного впровадження заходів з мінімізації всіх визначених ризиків та підтвердження їхньої ефективності через моніторинг виробничих параметрів і контроль якості продукції.

Таким чином, описаний підхід забезпечує системне охоплення усіх складових системи управління метрологічними ризиками, встановлюючи чітку послідовність дій з моменту планування до розробки і впровадження заходів з керування виявленими ризиками. Залучення мультидисциплінарної групи фахівців і використання відповідних методів гарантує об'єктивність оцінки та поглиблений розгляд різних аспектів МР. Це, у свою чергу, підвищує прогнозованість і керованість виробничих процесів, допомагає раціонально використовувати ресурси та сприяє впровадженню практик безпечної та відповідальної діяльності підприємства.

2.4. Висновки до розділу 2

В цьому розділі було досліджено специфіку внутрішніх і зовнішніх факторів, які впливають на метрологічні ризики якості продукції. Зовнішні фактори, такі як соціально-економічні, природньо-екологічні та науково-інноваційні, переважно перебувають поза прямим контролем підприємства. Їхній вплив характеризується

високою варіативністю та залежить від масштабів і адаптивності виробничих процесів. Водночас внутрішні фактори, до яких належать технічні аспекти, людський фактор і специфіка метрологічного забезпечення, мають чітко виражений причинно-наслідковий зв'язок із діяльністю підприємства, що спрощує їх ідентифікацію та оцінювання. На основі проведеного аналізу запропоновано класифікацію факторів впливу на метрологічні ризики, яка враховує їхню природу, взаємозв'язки та специфіку впливу на якість продукції. Така класифікація дозволяє систематизувати ризики та більш точно визначати пріоритетні напрями роботи з їхньої мінімізації.

У розділі проведено аналіз міжнародних стандартів ISO 9001, ISO 31000 та ISO 31010 для оцінювання метрологічних ризиків, що дозволило сформулювати вимоги до побудови системи управління цими ризиками.

Запропоновано концепцію системи управління метрологічними ризиками, що включає три основні етапи: планування, оцінювання та опрацювання ризиків. Ця система побудована на принципах системного підходу, що дозволяє враховувати взаємодію зовнішніх і внутрішніх факторів, а також їхній вплив на якість продукції.

Для забезпечення комплексного підходу до оцінювання метрологічних ризиків запропоновано використання комплексного показника розміру метрологічного ризику. Цей показник дозволяє враховувати взаємозв'язок різних груп факторів та їхній внесок у загальний ризик. Такий підхід сприяє кращому прогнозуванню ризикових подій, визначенню пріоритетів у мінімізації ризиків та прийняттю оптимальних рішень на стратегічному, тактичному й операційному рівнях. Застосування комплексного показника забезпечує інтеграцію ризиків у єдину систему моніторингу та контролю, що значно підвищує надійність виробничих процесів і стабільність якості продукції.

РОЗДІЛ 3. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ СИСТЕМИ ОЦІНЮВАННЯ МЕТРОЛОГІЧНИХ РИЗИКІВ

3.1. Математична модель комплексного показника рівня метрологічного ризику

У процесі метрологічного забезпечення якості продукції на етапі виготовлення одним із ключових завдань є своєчасне й адекватне оцінювання метрологічних ризиків. Точність вимірювань, достовірність результатів контролю та ефективність виявлення відхилень мають визначальний вплив на кінцеву якість виробу. Однак у реальних виробничих умовах кількість потенційних джерел ризиків або небезпек досить велика: різноманітні типи вимірювальних приладів, особливості технологічних процесів, людський фактор тощо. Щоб отримати цілісне уявлення про загальний рівень МР доцільно використовувати комплексний показник МР. Такий показник:

- Узагальнює різні аспекти МР (частоту відмов, тяжкість наслідків, здатність своєчасного виявлення).
- Спрощує порівняння альтернативних сценаріїв або змін у виробничому процесі.
- Полегшує прийняття управлінських рішень, оскільки замість численних показників керівник отримує одне інтегроване значення ризику.
- Підтримує моніторинг динаміки за рахунок простішого відстежування зростання МР і чинників які на нього найбільше впливають.

Щоб перейти від ідеї комплексної оцінки до математичної моделі, необхідно визначити базові складові метрологічного ризику та спосіб їх агрегації. У спрощеному вигляді математичну модель комплексного показника МР (згідно рис. 2.10) можна представити як:

$$R_k = f(R, r, S, O, D), \quad (3.1)$$

де R_k – комплексний показник МР, $R = \{R_1, R_2, \dots, R_j\}$ – множина узагальнених (групових) МР, $r = \{r_1, r_2, \dots, r_i\}$ – множина метрологічних ризиків усередині кожної групи, $S = \{S_1, S_2, \dots, S_i\}$ – множина значущості наслідків і-го МР, $O = \{O_1, O_2, \dots, O_i\}$ – множина ймовірності виникнення і-го МР, $D = \{D_1, D_2, \dots, D_i\}$ – множина ймовірності виявлення і-го МР.

Відповідно до структури моделі композиції МР (рис. 2.10.), на найнижчому четвертому ієрархічному рівні розташовані три одиничні показники, які є основою визначення комплексного показника R_k . Вони характеризують кожен МР з точки зору:

- S_i – значущість наслідків (Severity): наскільки серйозними будуть наслідки для якості продукції, якщо ризикова подія станеться і залишиться непомітною;
- O_i – ймовірність виникнення (Occurrence): як часто (з якою ймовірністю) дана ризикова подія може трапитися;
- D_i – ймовірність виявлення (Detection) або «важкість виявлення»: наскільки реально (або важко) виявити, що ризикова подія трапилася.

Зазвичай кожен із цих показників набуває значень у діапазоні від 1 до 10:

$$S, O, D \in \{1, 2, 3, \dots, 10\}. \quad (3.2)$$

Для оцінювання одиничних показників використовуються спеціальні шкали оцінки. Шкали оцінки значущості наслідків, ймовірності виникнення та ймовірності виявлення наведені в таблицях 3.1, 3.2 та 3.3 відповідно.

Таблиця 3.1.

Шкала оцінки значущості наслідків ризикової події

Значущість наслідків (якісна оцінка)	Характеристики	Значення (індексна оцінка)
1	2	3
Неістотна	Наслідки неістотні	1
Дуже низька	Наслідки прийнятні без впливу на процес виготовлення продукції	2
Низька	Значення показників знаходяться на межі прийнятності	3

Продовження таблиці 3.1.

1	2	3
Нижче середнього	Незначні наслідки для усунення яких необхідно застосувати ряд заходів	4
Середня	Помітно погіршують функціонування процесу виготовлення продукції	5
Вище середнього	Наслідки для усунення яких потрібні більш жорсткі заходи	6
Помірно висока	Наслідки, які потребують значних зусиль на усунення	7
Висока	Робить неможливим належне функціонування процесу виготовлення продукції	8
Дуже висока	Наслідки, які викликають небезпеку для функціонування процесу виготовлення продукції	9
Критична	Критичні наслідки, які не можуть бути усунені	10

Таблиця 3.2.

Шкала оцінки ймовірності виникнення ризикової події

Ймовірність виникнення (якісна оцінка)	Характеристики	Значення (індексна оцінка)
Малоймовірна	Малоймовірно, що подія виникне (0-10 %)	1
Дуже низька	Дуже низька ймовірність виникнення події (10-20 %)	2
Низька	Низька ймовірність виникнення події (20-30 %)	3
Нижче середнього	Ймовірність появи нижче середнього (30-40%)	4
Середня	Середня ймовірність виникнення події (40-50 %)	5
Вище середнього	Ймовірність виникнення події вище середнього (50-60 %)	6
Помірно висока	Помірно висока ймовірність виникнення події (60-70 %)	7
Висока	Висока ймовірність виникнення події (70-80 %)	8
Дуже висока	Дуже висока ймовірність виникнення події (80-90%)	9
Максимальна	Ймовірність виникнення максимально можлива (90-100 %)	10

Таблиця 3.3.

Шкала оцінки можливості виявлення ризикової події

Ймовірність виявити та ідентифікувати (якісна оцінка)	Характеристики	Значення (індексна оцінка)
Практично неможлива	Неможливо виявити або подію ще не було аналізовано до цього часу (0-10 %)	10
Дуже низька	Малоймовірно, що подію буде виявлено (10-20%)	9
Низька	Незначна можливість виявлення події (20-30 %)	8
Нижче середнього	Дуже низька можливість виявлення події (30-40 %)	7
Середня	Середня можливість виявлення події (40-50 %)	6
Вище середнього	Можливість виявлення події вище середнього (50-60 %)	5
Помірно висока	Значна можливість виявлення події (60-70%)	4
Висока	Висока можливість виявлення події (70-80 %)	3
Дуже висока	Дуже висока можливість виявлення події (80-90 %)	2
Максимальна	Подія завжди виявляється (90-100 %)	1

Такий підхід є доволі зручним та поширеним, зокрема в межах методики FMEA. Проте у загальному випадку діапазон значень S, O, D може бути довільним, наприклад, 1-5 або ж деталізована 100-бальна шкала. Незалежно від того, який саме діапазон обрано для первинних оцінок, подальший етап агрегування вимагає узгодженості шкал. З метою приведення усіх показників до уніфікованого масштабу та дотримання умови $0 \leq S, O, D \leq 1$ доцільно здійснити масштабування одиничних показників:

$$\begin{aligned} S_{i,N} &= S_i / S_{max} \\ O_{i,N} &= O_i / O_{max}, \\ D_{i,N} &= D_i / D_{max} \end{aligned} \quad (3.3)$$

де $S_{i,N}, O_{i,N}$ та $D_{i,N}$ – нормалізовані значення одиничних показників, S_{max}, O_{max} та D_{max} – максимальні значення одиничних показників у заданій шкалі.

Застосування індексної оцінки для визначення одиничних показників традиційно вимагає залучення досвідчених експертів. Ці фахівці повинні мати глибокі знання в предметній області та здатність об'єктивно оцінювати серйозність наслідків, ймовірність виникнення ризикових подій та ефективність засобів виявлення цих подій. Відповідно, індексна оцінка базується на суб'єктивних балах, які можуть варіюватися залежно від досвіду та інтерпретацій експертів. Тому під час оцінювання ризиків обов'язковою вимогою є наявність не одного експерта, а групи експертів. А значення одиничних показників конкретного ризику визначається як їх середнє з поміж усіх експертів:

$$\begin{aligned} S &= \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n S_k \\ O &= \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n O_k, \\ D &= \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n D_k \end{aligned} \quad (3.4)$$

де S_k, O_k, D_k – одиничні показники МР визначені k -тим експертом, n – загальна кількість експертів в групі.

Однак у випадку відсутності достатньої кількості таких експертів або при обмежених ресурсах для їх залучення виникає потреба у спрощених методах оцінки одиничних показників S , O та D . Одним із ефективних варіантів є використання насичувальних функцій для оцінки цих показників. Цей підхід дозволяє перейти від індексної оцінки до кількісної моделі, яка базується на математичних принципах та об'єктивних даних.

При виборі методу кількісної оцінки необхідно враховувати, що одиничні показники теоретично можуть прямувати до нескінченності, при цьому важко встановити верхню межу при якій ці показники набувають максимальних значень. З огляду на це для кількісної оцінки одиничних показників пропонується використання експоненційної функції, яка має наступний вигляд:

$$\begin{aligned} S(x_S) &= 1 - e^{-\frac{x_S}{c_S}} \\ O(x_O) &= 1 - e^{-\frac{x_O}{c_O}}, \\ D(x_D) &= 1 - e^{-\frac{x_D}{c_D}} \end{aligned} \quad (3.5)$$

де x_S – визначений показник втрат на рік внаслідок виникнення ризикової події (наприклад, втрати якості, години простою виробничого процесу, грошові втрати), x_O – визначений показник частоти виникнення ризикових подій на рік, x_D – визначений показник кількості виявлених ризикових подій на рік, c_S, c_O та c_D – певні параметри масштабу, які визначають при якому рівні відповідні показники досягають свого критичного значення (визначаються організацією відповідно до своїх можливостей).

Особливостями цієї функції є те що:

- $S(x_S), O(x_O), D(x_D) \approx 0$, при $x_S, x_O, x_D \rightarrow 0$
- $S(x_S), O(x_O), D(x_D) \approx 1$, при $x_S, x_O, x_D \rightarrow +\infty$;

- $S(x_S), O(x_O), D(x_D) \approx 0.63$, при $x_S = c_S, x_O = c_O, x_D = c_D$.

Таким чином, навіть якщо x_S, x_O, x_D зростають без обмежень, то значення $S(x_S), O(x_O), D(x_D)$ не перевищать 1, що узгоджується з вищевказаною умовою $0 \leq S, O, D \leq 1$ і дозволяє використовувати такий підхід для оцінки комплексного показника МР.

Перехід від індексної оцінки до методу з використанням експоненційних насичувальних функцій дозволяє досягти більш об'єктивної та кількісної оцінки показників S, O та D . Цей підхід забезпечує стабільність результатів навіть при великих значеннях показників, спрощує порівняння ризиків та підвищує точність аналізу. Таким чином, використання насичувальних функцій є ефективною альтернативою традиційним індексним методам, особливо в умовах обмеженої доступності експертних оцінок.

Отримавши нормалізовані значення одиничних показників здійснюється оцінка МР, що розташовані на третьому ієрархічному рівні моделі композиції МР як добуток трьох показників S, O та D :

$$r_i = S_{i,N} \times O_{i,N} \times D_{i,N}, \quad (3.6)$$

де r_i – відображає оцінку i -го метрологічного ризику і набуває значень у діапазоні $[0;1]$.

Таким чином, об'єднуються три ключові чинники, що характеризують потенційний ризик, в одну узагальнену величину. Застосування добутку дозволяє одночасно врахувати вплив усіх трьох чинників та зберегти їхню відносну важливість. Завдяки цьому r_i відображає загальний рівень ризику, який спричиняє відповідна ризикова подія.

У сучасних умовах управління ризиками, особливо в складних та взаємопов'язаних системах, стає надзвичайно важливим врахування взаємовпливу між різними факторами, що формують загальний рівень ризику. Традиційні методи оцінки ризику часто передбачають незалежний розгляд

окремих факторів, що може призводити до неточних результатів та недооцінки потенційних небезпек. Однак у реальних системах фактори рідко функціонують ізольовано; навпаки, вони взаємодіють між собою, що суттєво впливає на кінцевий рівень ризику.

Врахування вагових коефіцієнтів, які визначають ступінь впливу одного фактора на інший, дозволяє більш точно моделювати ці взаємозв'язки та отримувати комплексну оцінку ризику. Використання матричних методів для визначення цих коефіцієнтів забезпечує системний підхід до аналізу, де кожен фактор розглядається не лише в контексті його власних характеристик, але й у взаємодії з іншими компонентами системи. Це особливо актуально для складних систем, де зміна одного параметра може мати ланцюговий ефект на інші, що, в свою чергу, впливає на загальний ризик.

Першим етапом для визначення вагових коефіцієнтів є формалізація взаємозв'язків між факторами через створення матриці впливу A :

$$A = \begin{matrix} & r_1 & r_2 & r_3 & \cdots & r_j \\ \begin{matrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \\ \vdots \\ r_i \end{matrix} & \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \cdots & a_{1j} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \cdots & a_{2j} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & \cdots & a_{3j} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{i1} & a_{i2} & a_{i3} & \cdots & a_{ij} \end{bmatrix} \end{matrix}. \quad (3.7)$$

Нехай система аналізується за n факторами $F = \{F_1, F_2, \dots, F_n\}$ які спричиняють ризик $r = \{r_1, r_2, \dots, r_n\}$. Матриця впливу A розміром $n \times n$ визначається таким чином, що елемент a_{ij} приймає значення 1, якщо ризик r_i впливає на ризик r_j та 0 у протилежному випадку.

Таким чином, матриця A відображає структуру взаємозв'язків між факторами системи. Наприклад, розглянемо наступну матрицю впливу:

$$A = \begin{matrix} & r_1 & r_2 & r_3 & r_4 \\ r_1 & \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \\ r_2 & \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ r_3 & \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \\ r_4 & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix}. \quad (3.8)$$

Ця матриця демонструє, що:

- ризик r_1 впливає на ризики r_2 та r_3 ;
- ризик r_2 впливає на ризик r_4 ;
- ризик r_3 впливає на ризики r_2 та r_3 ;
- ризик r_4 впливає на ризики r_1 та r_3 .

Важливо відзначити, що значення елементів a_{ij} , розміщених на діагоналі цієї матриці ($i=j$) повинні бути рівними 1. Якщо діагональні елементи залишаться нульовими, а один з ризиків не матиме впливу на інші ризики, то це призведе до того, що ваговий коефіцієнт для цього ризику буде рівним 0, що в свою чергу виключає цей ризик з подальшої оцінки комплексного показника R_k .

Наступним кроком є визначення вагових коефіцієнтів, які характеризують ступінь впливу кожного ризику на систему. Вагові коефіцієнти можуть враховувати як прямий, так і зворотній вплив ризиків. Прямий вплив фактора визначається сумою елементів відповідного рядка матриці A , що виражається за наступною формулою:

$$w_i^{direct} = \sum_{j=1}^n a_{ij}, \quad (3.9)$$

де w_i^{direct} – коефіцієнт, що відображає кількість ризиків, на які безпосередньо впливає ризик r_i , тим самим характеризуючи його прямий вплив на систему.

Зворотній вплив ризиків визначається сумою елементів відповідного стовпця матриці A :

$$w_j^{indirect} = \sum_{i=1}^n a_{ij}, \quad (3.10)$$

де $w_j^{indirect}$ – коефіцієнт, що відображає кількість ризиків, які безпосередньо впливають на ризик r_j , тим самим характеризуючи його залежність від інших факторів у системі.

Для отримання комплексного уявлення про вплив ризиків на систему необхідно поєднати прямі та зворотні впливи. Це досягається шляхом комбінування відповідних вагових коефіцієнтів w^{direct} та $w^{indirect}$ з використанням вагових коефіцієнтів α та β , які відображають важливість прямого та зворотнього впливу відповідно:

$$w_i = \alpha w_i^{direct} + \beta w_i^{indirect}. \quad (3.11)$$

Вибір значень параметрів α та β залежить від конкретних умов завдання та може бути обґрунтований на основі експертних оцінок або емпіричних даних. У спрощеному варіанті застосовуються рівні ваги, тобто $\alpha = \beta = 0.5$, що дозволяє однаково враховувати прямий і зворотній впливи.

Після визначення комбінованих вагових коефіцієнтів необхідно здійснити їх нормалізацію для отримання відносних ваг, які використовуватимуться в подальших розрахунках комплексної оцінки. Цей крок забезпечує, що сума нормалізованих вагових коефіцієнтів дорівнюватиме 1. Нормалізація здійснюється за формулою:

$$w_{i,N} = \frac{w_i}{\sum_{k=1}^n w_k}, \quad (3.12)$$

де $w_{i,N}$ – нормалізоване значення i -го комбінованого вагового коефіцієнта, w_k – k -тий ваговий коефіцієнт в межах однієї групи ризиків r_i , n – кількість вагових коефіцієнтів в межах групи.

Отже, використання матричних методів для визначення вагових коефіцієнтів забезпечує системний та обґрунтований підхід до аналізу складних

систем. Цей підхід дозволяє враховувати як прямі, так і зворотні взаємозв'язки між факторами, що сприяє більш глибокому розумінню динаміки системи та прийняттю обґрунтованих рішень на основі комплексних даних.

У процесі управління ризиками важливо не лише аналізувати окремі ризики r_i , але й групувати їх для отримання більш узагальнених показників, які відображають стан ризиків у певних категоріях або підрозділах організації. Такий підхід дозволяє більш ефективно здійснювати моніторинг, пріоритезацію та розподіл ресурсів для управління ризиками. Переходячи від оцінки індивідуальних ризиків до групових показників забезпечується структурований та систематичний аналіз ризиків, що сприяє прийняттю обґрунтованих управлінських рішень.

Згідно з рисунком 2.1., ризики організовані у шість груп, кожна з яких відповідає певній категорії факторів впливу на технологічний процес. Кожна група об'єднує кілька індивідуальних ризиків r_i , що характеризуються спільними ознаками. Це дозволяє зменшити кількість показників для аналізу, зберігаючи при цьому достатній рівень деталізації для оцінки загального стану ризиків у кожній групі.

Для оцінки узагальненого (групового) ризику використовується зважена сума індивідуальних ризиків r_i у межах групи. Формально це можна представити наступною формулою:

$$R_{j,avg} = \sum_{i=1}^{n_j} w_{i,N} \cdot r_i, \quad (3.13)$$

де R_j – узагальнений (груповий) показник для групи j , n_j – кількість індивідуальних ризиків у групі j .

Використання лише зваженої суми індивідуальних ризиків дозволяє отримати загальне уявлення про рівень ризику в групі. Однак такий підхід може мати недолік у випадках, коли в групі присутній один або декілька критично високих

ризиків, які можуть суттєво вплинути на загальний стан, але через свою малу кількість залишаються непоміченими відносно середнього рівня. Наприклад, якщо в групі є декілька невеликих за розміром ризиків $r_i \rightarrow \min$ та один дуже високий $r_i \rightarrow \max$, і при цьому всі з однаковим впливом w_i , то середня зважена сума не відобразить потенційну небезпеку, пов'язану з цим критичним ризиком, оскільки буде приблизно рівна значенню невеликих ризиків. Чим більше незначних ризиків в групі j тим далі значення групового показника віддалятиметься від критичних ризиків. Це створює необхідність під час оцінки узагальнених показників враховувати не тільки зважену суму, але й такі критичні ризики в межах певної групи.

Для вирішення зазначеної проблеми до формули розрахунку групового показника (3.13) вводиться компонент, що враховує максимальне значення ризику в групі:

$$R_{j,max} = \max(r_1, r_2, \dots, r_{n_j}), \quad (3.14)$$

де $R_{j,max}$ – максимальне значення ризику в групі j .

Таким чином, груповий показник R_j визначається як зважена сума середнього значення ризиків та максимального ризику j -ої групи:

$$R_j = (1 - \lambda)R_{j,avg} + \lambda R_{j,max}, \quad (3.15)$$

де λ – коефіцієнт ваги, що визначає ступінь впливу максимального ризику на загальний показник групи (де $0 \leq \lambda \leq 1$).

Вибір коефіцієнта λ є дуже важливим, оскільки він визначає баланс між загальним рівнем ризику та впливом найвищого ризику в групі. Якщо λ наближається до 1, то більше уваги приділяється максимальному ризику $\lim_{\lambda \rightarrow 1} (R_j) = R_{j,max}$, що забезпечує його адекватне відображення у загальному

показнику групи. У випадку, коли λ ближче до 0, більший акцент робиться на середнє зважене значення ризиків $\lim_{\lambda \rightarrow 0}(R_j) = R_{j,avg}$, що відображає загальний рівень ризику в групі.

Комбінований підхід, який поєднує середнє зважене значення та максимальне значення ризику, дозволяє забезпечити більш комплексну оцінку групових ризиків. З одного боку, середнє зважене значення відображає загальний рівень ризику, що присутній у групі, враховуючи ваги кожного індивідуального ризику. З іншого боку, включення максимального значення ризику гарантує, що навіть один критично високий ризик буде адекватно відображений у загальному показнику групи, забезпечуючи тим самим точнішу та збалансовану оцінку ризиків.

Після визначення узагальнених показників необхідно перейти на перший, найвищий рівень ієрархії (рис. 2.10). Для цього потрібно отримати комплексне значення R_k , яке б відображало сукупність усіх групових ризиків R_1, R_2, \dots, R_n . Комплексний показник ризику R_k представляє собою єдине числове значення, яке відображає загальний рівень ризику на виробництві. Він дозволяє керівництву визначати пріоритетні напрями для зниження ризиків та оцінювати ефективність впроваджених заходів. Важливим аспектом при розрахунку R_k є врахування кількості ризиків у кожній групі, що дозволяє адекватно відобразити вплив різних груп на загальний ризик.

Комплексний показник ризику R_k визначається як зважена сума узагальнених показників R_j , де вагові коефіцієнти враховують кількість ризиків у кожній групі. Розраховується R_k за формулою:

$$R_k = \frac{\sum_{j=1}^n R_j \cdot n_j}{\sum_{j=1}^n n_j}, \quad (3.16)$$

де n_j – кількість індивідуальних ризиків r_i в j -тій групі, n – кількість груп.

Поділ суми зважених показників ризику на загальну кількість ризику гарантує, що комплексний показник R_k буде знаходитися в межах від 0 до 1. Це дозволяє легко інтерпретувати R_k як відносну величину, де 0 означає відсутність ризиків, а 1 – максимально можливий рівень ризику. Для більшої зручності R_k можна перевести у відсотки помноживши комплексний показник на 100%. Множення показника ризику R_j на кількість ризиків n_j у відповідній категорії дозволяє адекватно відобразити вплив кожної категорії на загальний ризик. Категорії з більшою кількістю ризиків мають більший внесок у загальний показник, що відображає їхню вагомість у загальній структурі ризиків організації. Такий підхід дозволяє інтегрувати різноманітні показники ризику у єдину, узгоджену систему, що сприяє більш ефективному управлінню ризиками та прийняттю обґрунтованих управлінських рішень.

Після визначення комплексного показника метрологічного ризику згідно блок-схеми оцінювання, наведеної на рис. 2.11., отримане значення слід порівняти з допустимим значенням МР. Цей пороговий показник встановлюється на підприємстві з урахуванням внутрішніх вимог, технічних стандартів, економічних чинників, а також згідно з вимогами ринку чи регуляторних органів. Зокрема, організація самостійно обирає метод визначення допустимого рівня орієнтуючись на вартісний підхід (коли враховується баланс між потенційними витратами на зниження ризику та можливими збитками), або на статистичний аналіз (коли орієнтуються на емпіричні дані враховуючи історичні значення ризику). Залежно від сфери діяльності, обсягів виробництва та кількості зібраних статистичних відомостей, підприємство може комбінувати обидва підходи або надавати перевагу одному з них.

У найпростішому вигляді допустимий рівень можна визначити, виходячи з припущення про «граничні» одиничні показники - тобто задати максимально прийнятні значення $S_{\text{доп}}$, $O_{\text{доп}}$ та $D_{\text{доп}}$, а далі підставити ці допустимі оцінки в б формулу (3.6) та визначити комплексний показник. Таким чином $R_{k,\text{доп}}$ залежатиме від допустимих значень одиничних показників:

$$R_{k,\text{доп}} = F(S_{\text{доп}}, O_{\text{доп}}, D_{\text{доп}}). \quad (3.17)$$

Якщо під час оцінювання з'ясується, що фактичний (розрахований) ризик перевищує це порогове значення $R_{k,\text{доп}}$, вважають, що ризик є надто високим і потрібні заходи для його зниження.

Допустиме значення можна встановити і за допомогою статистичного підходу. Його суть полягає в тому, що підприємство збирає історичні дані про власні значення ризику (наприклад, з попередніх періодів/партій виробництва) й обчислює з цієї вибірки певний квантиль. У результаті маємо вибірку значень $R_k = \{R_{k,1}, R_{k,2}, \dots, R_{k,N}\}$ впорядкованих за зростанням $R_{(1)} \leq R_{(2)} \leq \dots R_{(N)}$. Допустимим рівнем вважається той, який у більшості випадків не перевищувався на практиці. Інтуїтивно це означає, що: «Ми можемо прийняти такий ризик, бо в минулому ми з подібним рівнем ризику жили й особливих (неприйнятних) наслідків не було». Для цього обирається квантиль γ для допустимого ризику (для 80% $\gamma=0.8$) і розраховується позиція квантиля i^* у впорядкованій вибірці, як $i^* = (N + 1) \cdot \gamma$. Ця позиція вказує, куди приблизно «припадає» потрібна межа всередині відсортованої вибірки. Тоді допустиме значення рівне:

$$R_{k,\text{доп}} = \begin{cases} R_{(i^*)}, \text{ якщо } i^* \in \{1, 2, \dots, N\} \\ R_{(p)} + \delta [R_{(k+1)} - R_{(k)}], \text{ якщо } i^* \notin \mathbb{Z} \end{cases} \quad (3.18)$$

де $p = [i^*]$ - ціла частина числа i^* , а δ - дробова частина.

Наприклад, отримавши вибірку вибірку R_k при $\gamma=0.8$ (80% квантиль) і $N = 15$, отримаємо $i^* = (10 + 1) \cdot 0.8 = 8.8$. Потім інтерполяцією між $R_{(8)} = 0.65$ та $R_{(9)} = 0.71$ отримуємо наближене квантильне значення $R_{(8.8)} \approx 0.7$. У подальшому це значення приймається за допустиме $R_{k,\text{доп}}$, оскільки 80% історичних даних мали ризик нижче нього. Якщо в новій оцінці R_k опиняється

вище цього рівня, це означає, що ризик вийшов за «звичні межі» й доцільно вжити додаткові заходи щодо його зниження.

3.2. Вдосконалення шкал для визначення одиничних показників

Рангові шкали, що застосовують для визначення одиничних показників значущості наслідків ризикової події (S), ймовірності виникнення (O) та здатності виявлення (D), мають порядковий характер. Разом із тим формальна природа цих шкал, які найчастіше мають лише ранговий характер, може обмежувати точність оцінок, які погано надаються до подальшого опрацювання. З огляду на потребу в деталізованішому оцінюванні ризиків у реальних виробничих умовах, виникає завдання вдосконалити шкали для визначення одиничних показників.

Застосування лінійних шкал із фіксованими, рівномірними інтервалами часто не враховує різномірні зміни, що можуть відбуватися на різних ділянках їхнього діапазону. Ускладнення таких шкал через упровадження нелінійної градації дає змогу більш адекватно відображати і малі коливання на початкових етапах, і помітні стрибки в ділянці високих значень. Завдяки цьому з'являється можливість гнучкіше налаштовувати «вагу» приросту показника, тобто робити йому більший чи менший внесок залежно від реальної ситуації. Такий підхід дає змогу підвищити роздільну здатність оцінювання, зберігаючи при цьому основну структуру. У підсумку розширення лінійних шкал до нелінійних, або «зважених», сприяє кращому відображенню складних, нерівномірних процесів і підвищує точність аналізу. Це, своєю чергою, розкриває додаткові можливості для формування більш інформативних висновків у разі, коли відмінності між сусідніми рівнями шкали набувають особливого значення.

На основі аналізу таблиць 3.1 - 3.3 встановлено, що вони не містять кількісного критерію, а їхні шкали є суто якісними або ранговими та мають лінійний характер, як зображено на рисунках 3.1, 3.2 та 3.3.

З одного боку, ці шкали відзначаються простотою застосування, проте мають ряд недоліків, зокрема:

- **Обмежене використання можливих значень:** 88% діапазону можливих значень залишається незадіяними, а застосовуються лише 120 із 1000 можливих значень;

- **Неоднозначність результатів:** різні комбінації параметрів S , O та D можуть давати однакові результати. Наприклад, $r_{(642)} = 6 \times 4 \times 2 = 48$ і $r_{(426)} = 4 \times 2 \times 6 = 48$, що спричиняє неоднозначність;

- **Нерівномірна чутливість до змін параметрів:** шкали реагують по-різному на незначні коливання параметрів. Наприклад, якщо

$$r_{(993)} = 9 \times 9 \times 3 = 243, \text{ а } r_{(994)} = 9 \times 9 \times 4 = 324, \text{ то } r_{(994)} - r_{(993)} = 81$$

$$r_{(343)} = 3 \times 4 \times 3 = 36, \text{ а } r_{(344)} = 3 \times 4 \times 4 = 48, \text{ то } r_{(344)} - r_{(343)} = 12;$$

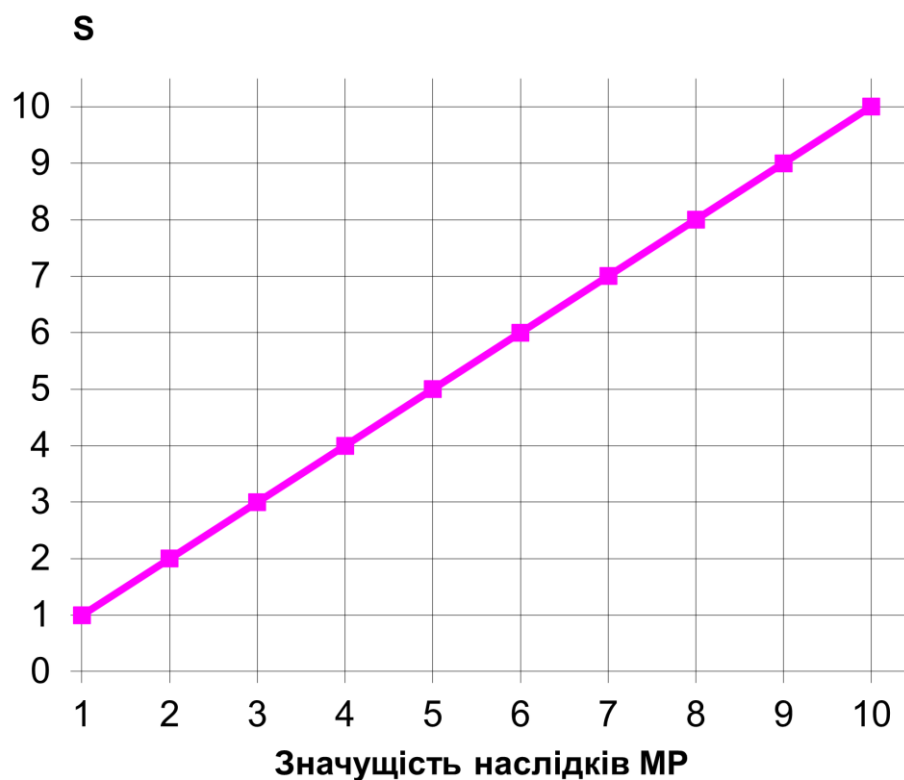


Рисунок 3.1. Лінійна залежність значущості наслідків МР

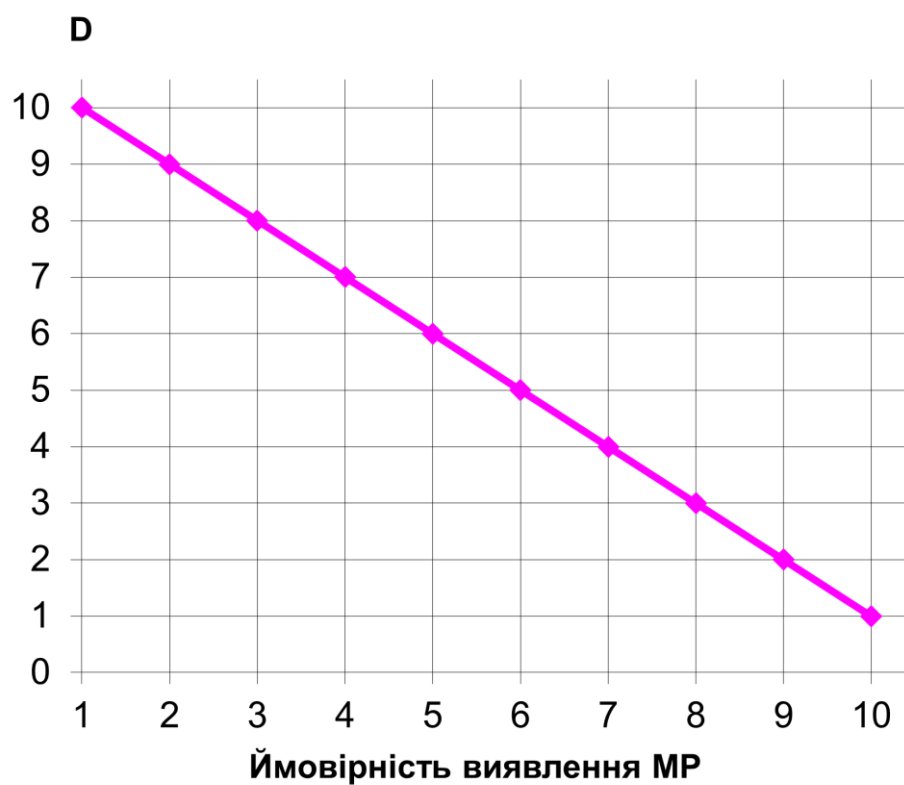


Рисунок 3.2. Лінійна залежність ймовірності виявлення МР

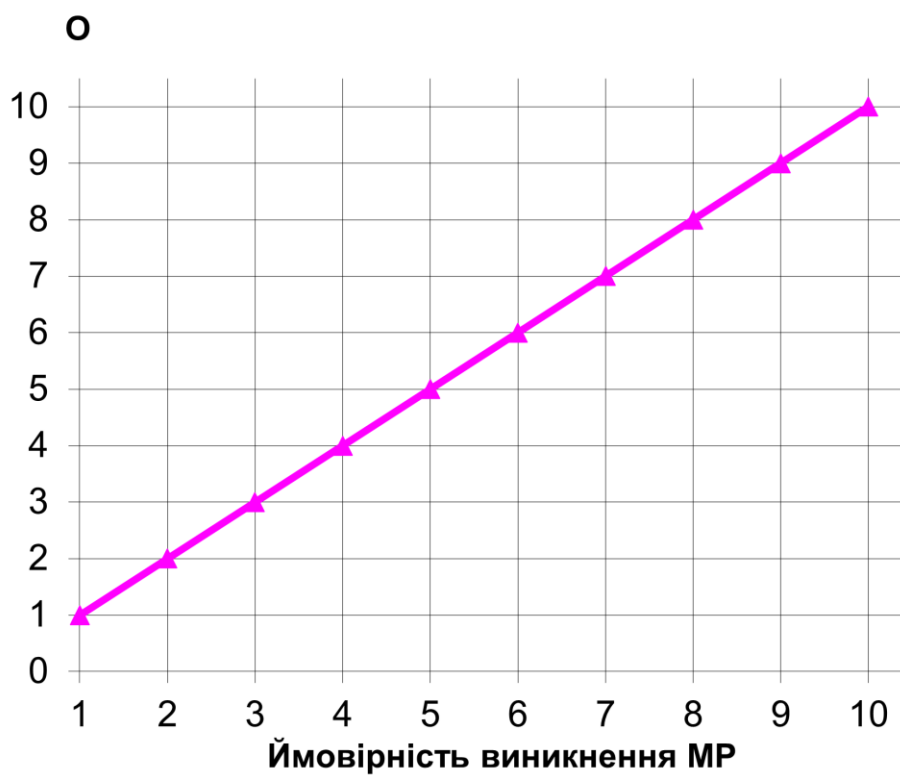


Рисунок 3.3. Лінійна залежність ймовірності виникнення МР

Найсуттєвішим недоліком є те, що застосування зазначених рангових шкал для визначення комплексного значення МР може призвести до хибних висновків. Оскільки такі шкали є порядковими, порівняння їхніх значень можливе лише за порядком розташування. Проте, оскільки значення r_i подані у числовій формі, їх слід оцінювати кількісно, використовуючи відношення між ними.

У даній роботі запропоновано методика зменшення небажаного впливу зазначених недоліків, спираючись на такі міркування. Оскільки значення параметрів O і D є однойменними (табл. 3.2 і 3.3), можна припустити, що їхня зміна має подібний характер у межах усього допустимого діапазону значень. Крім того, значення D упорядковані у зворотному порядку відносно O - ймовірності виникнення МР. Це означає, що зі збільшенням D ймовірність виявлення МР зменшується. Такі особливості дають підстави для спільного аналізу цих двох параметрів МР. З таблиці 3.4 видно, що добуток однакових рангів O і D характеризується яскраво вираженою нелінійністю. При цьому добуток середніх рангів (5×5) розміщений у співвідношенні 1:3 ближче до нижньої межі діапазону (табл. 3.4).

Таблиця 3.4.

Розміщення добутку значень O і D у межах допустимого діапазону

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ранги D і O	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$D \times O$	1	4	9	16	25	36	49	64	81	100

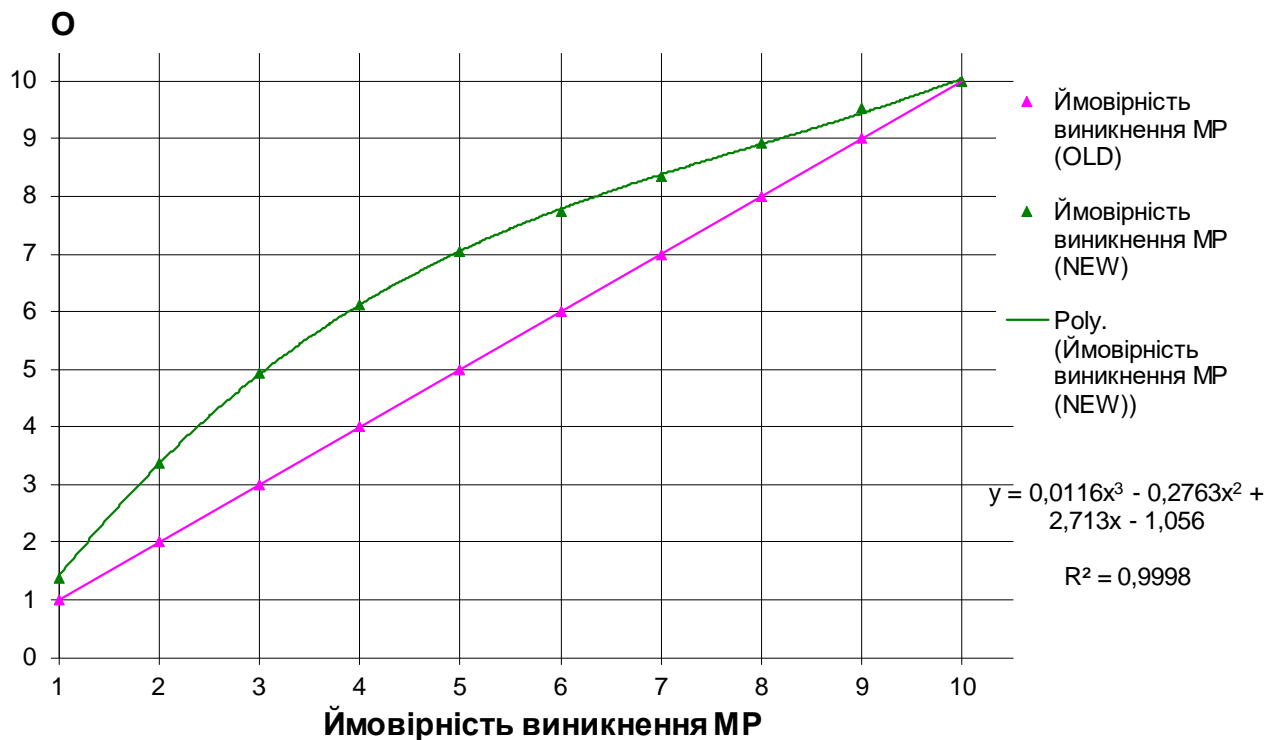
З урахуванням зазначених особливостей у дослідженні запропоновано скоригувати значення рангів таким чином, щоб результати їх перемноження розподілялися рівномірно по всьому діапазону допустимих значень. При цьому добуток середніх значень розташовувався в центрі діапазону, як це продемонстровано в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5.

Розміщення добутку провованих значень O і D у межах допустимого діапазону

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
D_N і O_N	1,37	3,38	4,93	6,13	7,04	7,75	8,35	8,91	9,53	10,00
$D_N \times O_N$	2	11	24	38	50	60	70	79	91	100

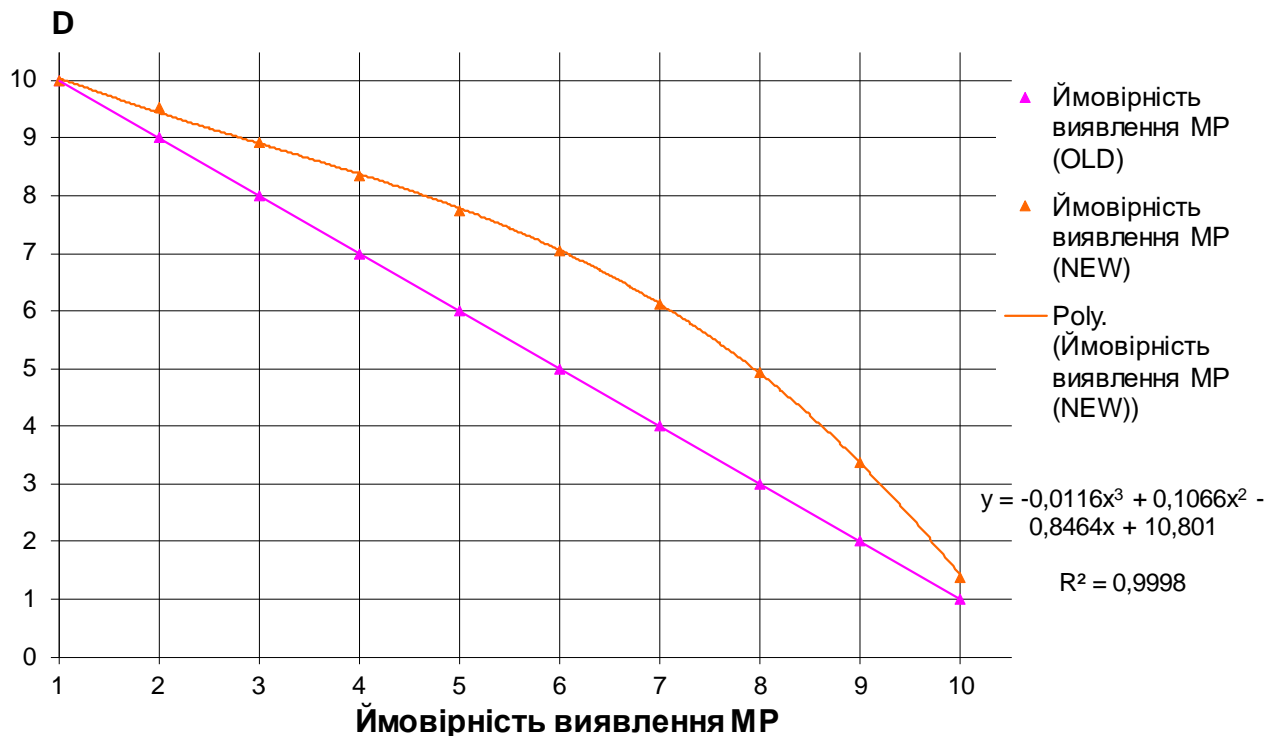
За результатами розроблено шкалу для визначення ймовірності виникнення МР, яка точніше відповідає вимогам визначення r_i (рис. 3.4.).



Ймовірність виникнення МР	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
O – ранг ймовірності виникнення МР	1,37	3,38	4,93	6,13	7,04	7,75	8,35	8,91	9,53	10,00

Рисунок 3.4. Характер запропонованої нелінійної залежності ймовірності виникнення МР

Для ймовірності виявлення МР встановлено залежність, аналогічну до попередньої, проте вона характеризується спадною тенденцією (рис. 3.5.).



Ймовірність виявлення МР	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
D – ранг ймовірності виявлення МР	10,0	9,53	8,91	8,35	7,75	7,04	6,13	4,93	3,38	1,37

Рисунок 3.5. Характер запропонованої нелінійної залежності ймовірності виявлення МР

Застосовуючи набори значень D_N і O_N , можна визначити функції належності $\mu(P)$, які дозволяють знаходити ранги, відповідні будь-яким елементам термножин ймовірностей P виявлення і виникнення МР відповідно.

Легко помітити, що, для множин D_N і O_N , наведених у таблиці 3.5, функція $\mu(P)$ демонструє чітко виражений нелінійний характер. При цьому значення D_N і O_N помітно збільшуються в міру наближення до середини діапазону. Відповідно, значущість наслідків появи ризиків також має зростати за схожим принципом,

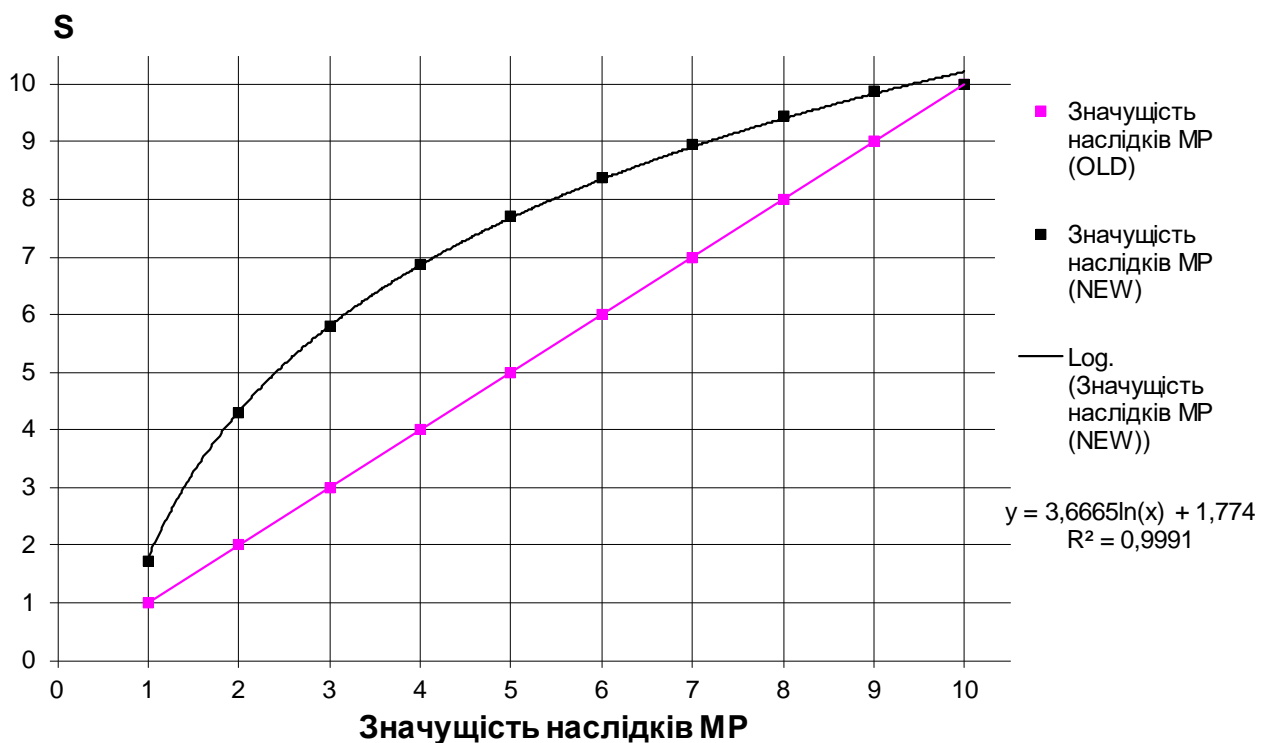
щоб зберегти загальну закономірність зміни показника r_i у всьому діапазоні допустимих значень. Розраховані значення S_N подано в таблиці 3.6.

Таблиця 3.6.

Розміщення запропонованих значень значущості наслідків S в діапазоні
можливих значень

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
S_N	1,73	4,31	5,81	6,88	7,71	8,38	8,96	9,45	9,89	10,00

Досліджуючи особливості зміни рангів S_N , наведених у таблиці 3.6., можна зробити висновок, що їхня динаміка має яскраво виражену нелінійну залежність. Зокрема, у першій половині діапазону значення рангів збільшуються значно інтенсивніше, ніж у другій, що чітко відображено на рисунку 3.6.



Значущість наслідків МР	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
S – ранг значущості МР	1,73	4,31	5,81	6,88	7,71	8,38	8,96	9,45	9,89	10,00

Рисунок 3.6. Характер запропонованої нелінійної залежності значущості наслідків МР

Подібний тип залежності цілком відповідає вимогам [51], оскільки саме значущість наслідків є тією частиною r_i , який визначає пріоритет під час вибору МР для усунення за близьких або однакових значень r_i . Водночас рівень значущості МР не має зростати лінійно зі збільшенням рангів, а набувати ступеневої чи логарифмічної форми. Крім того, згідно з [51], ранги S вважають точними для $S \geq 6$, адже саме тоді під час порівняння втрат внесок S у r_i стає вирішальним. Таким чином, що більша різниця між сусідніми рангами, то ефективніше вони диференціюють МР.

У різних модифікаціях FMECA показники S , O і D можуть мати відмінні діапазони, наприклад від 1 до 4 або 5. У деяких випадках, зокрема в автомобільній галузі для оцінювання конструкції та виробничого процесу (DFMEA і PFMEA), застосовується лінійна шкала від 1 до 10 [77, 78]. Правила ж користування FMEA, включно з критеріями оцінювання, регламентуються міжнародним стандартом [51].

Проте згаданий стандарт не пропонує чітко встановленого набору терм-множин, який би відповідав потребам експертів під час встановлення рангових оцінок. Тому в цій роботі пропонується скористатися єдиною номенклатурою термів, де оцінювання відбувається не шляхом простого ранжування з кроком 1 у потрібному проміжку (скажімо, 1–10 або 1–5), а на основі функції належності, обґрунтованої математично. Недоліком такого підходу є поява дробових значень рангів, які неможливо використовувати як кінцевий результат. Однак, оскільки дослідження зосереджено на точнішому визначенні r_i (що розраховується множенням S , O і D), цей недолік не спричиняє суттєвого впливу на остаточне значення r_i .

У такому підході S , O і D доцільно трактувати як лінгвістичні змінні (табл. 3.7.), а всі обчислення з ними виконувати згідно з принципами нечіткої логіки (fuzzy logic) [79]. Під лінгвістичною змінною розуміють сукупність нечітких змінних, які дають змогу описати нечітке число, що виникає в результаті певних операцій, у словесній формі. Терм-множина охоплює всі можливі значення такої

змінної. Кожен елемент цієї множини називають термом, і в теорії нечітких множин він представляється у вигляді нечіткої множини з відповідною функцією належності.

Як приклад, змінна «якість продукції» може набувати значень «низька», «середня», «висока» і «дуже висока». У цьому випадку «якість продукції» виступає лінгвістичною змінною, а наведені оцінки є термами, що формують її терм-множину [79].

Таблиця 3.7.

Терм-множини для лінгвістичних змінних S , O і D

№ терму лінгвістично ї змінної	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
S – значущість наслідків виникнення МР	не-істотна	дуже низька	низька	нижче середнього	середня	вище середнього	помірно висока	висока	дуже висока	критична
O – ймовірність виникнення МР	малоймовірна	дуже низька	низька	нижче середнього	середня	вище середнього	помірно висока	висока	дуже висока	максимальна
D – ймовірність виявлення МР	малоймовірна	дуже низька	низька	нижче середнього	середня	вище середнього	помірно висока	висока	дуже висока	максимальна

Нечітку підмножину A^* у складі універсальної множини U можна описати як набір впорядкованих пар $A^* = \{ \langle \mu_A(u) | u \rangle \}$, де $\mu_A(u)$ – функція належності, значення якої лежать у впорядкованій множині $M = [0; 1]$.

Функція $\mu_A(u)$ відображає ступінь належності певного елемента u нечіткій підмножині A^* . M – називають множиною належностей. Якщо ж $M = \{0, 1\}$, то нечітка підмножина фактично набуває властивостей звичайної (чіткої) множини.

Усі можливі значення лінгвістичної змінної формують нечітку підмножину, де для кожного її елемента визначають значення функції належності в інтервалі від 0 до 1. Ця функція вказує, наскільки елемент «належить» до згаданої підмножини. У результаті отримуємо набір впорядкованих пар, які можна опрацювати за визначеним алгоритмом і таким чином отримати чіткий кількісний показник.

Характер зміни S, O та D , що представлені на рисунку 3.7, можна використати для визначення функції належності $\mu(S)$, $\mu(O)$ і $\mu(D)$.

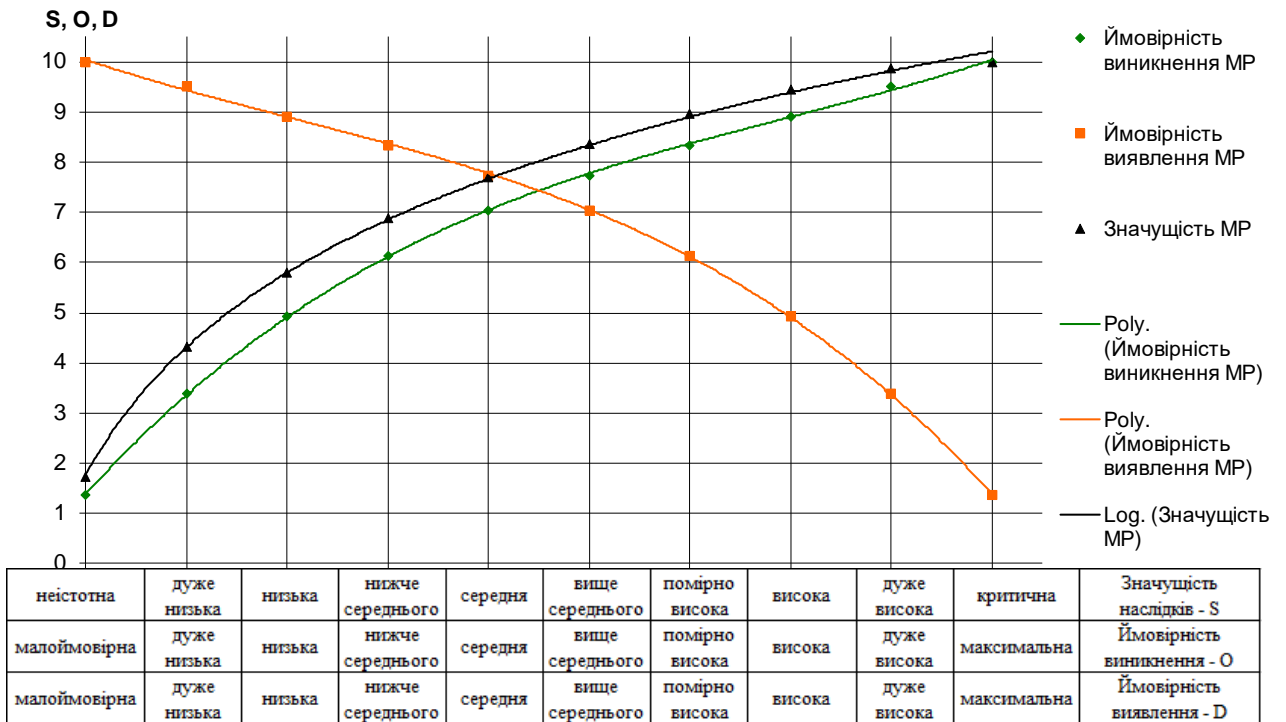


Рисунок 3.7. Графіки змодельованих змінних S, O і D для визначення функцій належності $\mu(S)$, $\mu(O)$ і $\mu(D)$

Аналізуючи представлені результати можна зробити висновки, що характер зміни отриманих рангів з одного боку добре узгоджується з вимогами міжнародного стандарту [51], а з іншого - отримані значення їх добутоків значно рівномірніше розташовані у всьому діапазоні можливих значень. Водночас

значущість наслідків S збільшується не пропорційно до збільшення рангів, а характеризується логарифмічною залежністю.

3.3. Математична модель визначення ефективності мінімізації метрологічних ризиків

Актуальність визначення ефективності впроваджених заходів мінімізації ризиків зумовлена вимогами міжнародного стандарту ISO 9001, який наголошує на необхідності оцінювати результативність усіх дій, що впливають на якість продукції. Відповідно до блок-схеми 2.12., оцінка ефективності заходів щодо зменшення ризиків має відбуватися згідно критерію ефективності, що допомагає обґрунтовано порівнювати різні підходи та обирати оптимальний набір заходів. У межах цього підходу слід виділити дві ключові складові, які зосереджуються на визначенні відносного зменшення комплексного показника ризику та на оцінці витрат стосовно можливих втрат.

Перша складова критерію оцінює, наскільки суттєво зменшено ризики після впровадження комплексу заходів по мінімізації. Нехай $R_k^{(0)}$ – початкове значення комплексного показника ризику (до впровадження заходів по мінімізації), $R_k^{(M)}$ – значення цього показника після впровадження деякого набору n заходів $M = \{M_1, M_2, \dots, M_n\}$ по мінімізації МР. Тоді для визначення відносного показника того, наскільки знизився R_k , зручно використати наступну формулу:

$$I_k = \frac{R_k^{(0)} - R_k^{(M)}}{R_k^{(0)}} = 1 - \frac{R_k^{(M)}}{R_k^{(0)}}, \quad (3.19)$$

де I_k – відносний показник зменшення комплексного показника МР.

Відносний показник I_k може набувати наступних значень:

- якщо $I_k < 1$, наприклад 0.3, це означає що реалізовані заходи зменшили початкове значення комплексного показника ризику на 30 %;
- якщо $I_k = 1$, теоретично означає повне усунення ризику ($R_k^{(M)} = 0$). Звісно, на практиці досягнення 1 може бути складним або недосяжним;
- якщо $I_k > 1$, означає, що ризик після впровадження заходів по мінімізації збільшився ($R_k^{(M)} > R_k^{(0)}$). В такому разі необхідно переглянути обрані заходи по мінімізації M , оскільки вони мають певні недоліки.

Друга складова критерію відображає, наскільки сукупні витрати на заходи мінімізації є виправданими порівняно з можливими втратами в разі реалізації ризиків. Позначимо цей параметр як C_k . Він визначається за формулою:

$$C_k = \frac{\sum_{i=1}^n C_{i,cost}}{\sum_{i=1}^n (C_{i,cost} + C_{i,loss})}, \quad (3.20)$$

де $C_{i,cost}$ – витрати внаслідок впровадження M_i заходу для мінімізації ризику r_i , $C_{i,loss}$ – втрати, яких зазнає підприємство, якщо ризик r_i реалізується без мінімізації.

Відповідно до такого визначення $C_k \in [0; 1]$. З погляду ефективності мінімізації, найкращою є ситуація, коли $C_k \rightarrow 0$, оскільки це означає мінімальні витрати відносно можливих втрат. Протилежною є ситуація, коли $C_{cost} \gg C_{loss}$, тоді $C_k \rightarrow 1$ і це свідчить про досить значне зростання витрат порівняно із запобіганням потенційним втратам. А $C_k = 0.5$, означає, що $C_{cost} = C_{loss}$. У такому випадку, навіть за хорошої здатності заходів знижувати ризики, ефективність може виявитися низькою, адже витрачені ресурси перевищують (або зрівнюються) із втратами.

Після визначення обох складових необхідно розрахувати показник ефективності E_k , що узагальнює обидві складові. З огляду на те, що $I_k \in [0; 1]$ та $C_k \in [0; 1]$, то показник ефективності E_k також повинен знаходитися в цих межах.

Це дає змогу зберігати узгодженість оцінки та забезпечувати прозоре порівняння різних варіантів заходів по мінімізації. Для визначення E_k можна скористатися наступними формулами:

$$E_k = \frac{I_k}{1+C_k}, \quad (3.21.a)$$

$$E_k = \sqrt{I_k \cdot (1 - C_k)}. \quad (3.21.б)$$

Хоча як (3.21.a) так і (3.21.б) дозволяють виконати умову $E_k \in [0; 1]$ проте кожна з них має певні особливості. Під час визначення ефективності необхідно враховувати специфічні вимоги щодо поведінки показника E_k за різних комбінацій I_k та C_k . Нижче наведено кілька характерних ситуацій, які допомагають зрозуміти, як саме E_k повинен реагувати на зміну кожної зі складових.

Перша ситуація стосується випадку, коли витрати дуже великі, майже максимальні ($C_{loss} \rightarrow +\infty$). У реальних умовах, якщо підприємство спрямовує значний бюджет на мінімізацію МР, то зазвичай отримує й суттєвий ефект зменшення самого ризику, тобто I_k близьке до 1. Водночас не бажано, щоб E_k автоматично зменшувалося до 0 тільки через надто великий C_k . Формально, якщо $C_k \rightarrow 1$, то $E_k > 0$. Використання (3.21.a) надає можливість при $C_k = 1$ отримати $E_k = \frac{I_k}{2}$. Тобто ефективність не є нульовою навіть за максимальних витрат, якщо $I_k \neq 0$. Натомість під час застосування (3.21.б) при $C_k = 1$ отримуємо $E_k = 0$, незалежно від I_k . Таким чином, коли витрати дуже високі, але справді суттєво зменшено ризику, формула (3.21.a) краще передає сенс ефективності.

Друга ситуація охоплює випадок, коли $I_k = 0$. Це означає, що заходи, які б мали зменшувати ризику, насправді неефективні, а ризик залишився на тому ж рівні. Тоді ефективність має дорівнювати нулю, адже немає сенсу впроваджувати заходи, що зовсім не мінімізують ризик, а лише спричиняють витрати.

Застосування як (3.21.а) так і (3.21.б) однаково дозволяють отримати $E_k = 0$ при $I_k = 0$. В цьому випадку обидві формули коректно передають суть ефективності.

Третя ситуація стосується випадку, коли $C_k = 0.5$. Це означає, що витрати дорівнюють втратам ($C_{cost} = C_{loss}$), тобто досягнуто межі допустимих втрат. Логічно, що при такому співвідношенні ефективність не може бути надто високою, оскільки витрати вже рівні можливим втратам від реалізації ризику. У формулі (3.21.а) при $C_k = 0.5$ маємо знаменник 1.5. Якщо навіть $I_k = 1$, тоді $E_k = \frac{1}{1.5} \approx 0.67$. Якщо I_k менше 1, то ефективність нижча. Використовуючи формулу (3.21.б) за умови $I_k = 1$ отримуємо $E_k = \sqrt{0.5} \approx 0.707$, що трохи вище. У деяких випадках це може означати недостатньо «жорстке» проявлення того, що витрати вже стали рівними втратам. Відповідно, модель (3.21.а) дає більш відчутне зниження E_k , а отже, відображає межу допустимих витрат дещо сильніше.

Четверта ситуація, коли $C_k \approx 0$. За таких умов витрати зовсім незначні порівняно із втратами. У такому випадку потрібно, щоб отримана ефективність була дуже близькою до I_k (адже саме I_k показує, наскільки сильно зменшився ризик). Застосовуючи (3.21.а) отримуємо точний збіг із I_k . Тобто жодного надмірного збільшення чи зменшення немає. Якщо ж використати (3.21.б), то при $I_k < 1$ результат буде дещо більший від самого I_k . Наприклад, якщо $I_k = 0.64$, то $E_k = 0.8$, що завищує ефективність порівняно з початковим I_k . Тож коли витрати майже нульові, то формула (3.21.а), відтворює I_k без штучного приросту.

П'ята ситуація стосується нерівномірної чутливості показника C_k . На проміжку $0 < C_k < 0.5$ навіть відносно невелика зміна витрат C_{loss} може дати помітний приріст значення C_k тоді як у діапазоні $0.5 < C_k < 1$ та сама зміна призводить до повільнішого приросту C_k . Проаналізувавши чутливість обох моделей до зміни C_k можна зробити висновок, що при застосуванні (3.21.б) навіть невелике зростання C_k може суттєво знизити E_k , тоді як застосування (3.21.а) забезпечує плавніше зменшення E_k . Враховуючи, що C_k може змінюватись

досить різко, то застосування (3.21.а) дасть змогу уникнути надмірного зниження ефективності в порівнянні з (3.21.б).

З врахуванням вищевказаного можна зробити висновок, що (3.21.а) забезпечує: відсутність нульової ефективності при великих втратах; нульову ефективність у разі повної відсутності зменшення ризику; чітке відображення втрат ефективності на рівні $C_k = 0.5$; збіг із I_k , якщо втрати мінімальні; рівномірне зниження ефективності при поступовому зростанні C_k . Таким чином, використання моделі (3.21.а) краще передає суть ефективності ніж (3.21.б). Тому для визначення ефективності рекомендується застосовувати формулу (3.21.а).

Загалом показник ефективності E_k дає змогу не лише формалізувати процес мінімізації метрологічних ризиків, але й обрати оптимальний набір n заходів $M = \{M_1, M_2, \dots, M_n\}$ по мінімізації МР, який забезпечує найкраще співвідношення при якому показник зменшення ризику $I_k \rightarrow 1$ та витрати на його мінімізацію $C_k \rightarrow 0$.

3.4. Висновки до розділу 3

У цьому розділі було розроблено математичну модель комплексного показника метрологічних ризиків, яка дозволяє інтегрувати ключові характеристики ризиків - значущість наслідків, ймовірність виникнення та можливість виявлення. Комплексний показник забезпечує об'єднання цих складових у єдину величину, що дозволяє проводити об'єктивне оцінювання рівня ризиків у складних системах. Запропонований підхід включає нормалізацію одиничних показників для забезпечення узгодженості оцінок та можливості використання моделей на різних рівнях ієрархії. Крім того, розроблена система вагових коефіцієнтів враховує взаємозв'язки між факторами ризиків, що дозволяє моделювати їхній вплив на загальний рівень ризику. В роботі запропоновано спосіб визначення допустимого рівня метрологічного ризику, який базується на встановлених порогових значеннях або статистичному аналізі, що дозволяє

порівнювати розраховані значення із заданими критеріями для прийняття відповідних рішень.

Запропоновано нелінійні шкали оцінювання, які дозволяють точніше враховувати реальні зміни характеристик метрологічних ризиків, уникаючи неоднозначностей і втрат інформації, властивих традиційним лінійним шкалам. Використання нелінійної градації рангів забезпечує рівномірний розподіл показників у всьому діапазоні значень, підвищуючи точність оцінки та диференціацію метрологічних ризиків. Запропоновані шкали також дозволяють інтегрувати методи нечіткої логіки, що розширює можливості для точнішого аналізу та прийняття управлінських рішень.

Математична модель визначення ефективності заходів мінімізації метрологічних ризиків включає два ключові компоненти: оцінку відносного зменшення ризиків після впровадження заходів та аналіз витрат у порівнянні з можливими втратами. Розроблено моделі для визначення показника ефективності, які дозволяють об'єктивно порівнювати різні варіанти заходів мінімізації та обирати оптимальний набір. Модель забезпечує об'єктивне відображення взаємозв'язків між зниженням метрологічних ризиків та витратами, дозволяючи приймати обґрунтовані рішення щодо впровадження заходів мінімізації.

РОЗДІЛ 4. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

4.1. Метод прогнозування метрологічних ризиків

Відповідно до джерел [18, 20], в основу процесу управління ризиками покладено використання даних історичного характеру, поточної інформації, а також прогнозних оцінок. Оцінка метрологічних ризиків, пов'язаних із якістю продукції, потребує врахування багатьох змінних, що впливають на точність вимірювальних процесів. Використання традиційних методів прогнозування супроводжується певними труднощами, зокрема обмеження в опрацюванні великих масивів інформації, труднощі з ідентифікацією нелінійних взаємозв'язків, а також вплив непередбачуваних внутрішніх і зовнішніх чинників.

Використання передових технологій, таких як нейронні мережі, створює нові перспективи для покращення процесу управління ризиками. Завдяки здатності до аналізу значних обсягів інформації, виявлення прихованих взаємозв'язків і прогнозування ризиків у режимі реального часу, ці технології сприяють зниженню ймовірності виникнення метрологічних відхилень, підвищують стабільність виробництва і забезпечують відповідність продукції чинним стандартам. Нейронні мережі здатні функціонувати в режимі реального часу, інтегруючись в автоматизовані системи моніторингу, опрацьовувати інформацію одразу після її отримання та миттєво уточнювати прогнози. Це надає можливість швидко ідентифікувати потенційні метрологічні ризики і вживати необхідних заходів ще до того, як вони призведуть до значних негативних наслідків для якості продукції та підприємства загалом.

Метрологічний ризик відображає ймовірність появи та вагомість наслідків, спричинених відхиленнями в якості продукції через неточності вимірювань, порушення вимог стандартів чи інші чинники, що впливають на достовірність і

стабільність виробничих процесів. Цей ризик може варіюватися з плином часу залежно від умов виробництва, стану обладнання та інших технологічних особливостей. Оскільки метрологічний ризик можна подати у вигляді часового ряду, де його значення динамічно змінюються під впливом різноманітних чинників, найбільш ефективним рішенням для його прогнозування є моделі прогнозування часових рядів (Time Series forecasting).

У дослідженні було проаналізовано шість моделей для прогнозування значень метрологічного ризику, а саме: Facebook Prophet [80], Statsmodels SARIMAX [81], Forecaster Recursive [82], Forecaster Direct [83], LGBM Regressor та Linear Regression [84]. Кожна модель характеризується певними перевагами і недоліками, залежно від особливостей конкретної задачі. Наприклад, модель Facebook Prophet демонструє високу ефективність на даних із чітко вираженими сезонними компонентами, тоді як SARIMAX підходить для складних часових рядів, у яких присутні зовнішні змінні. Методи LGBM Regressor і Linear Regression є ефективними для більш простих і лінійних задач, проте їхні можливості знижуються при роботі з нелінійними та складними часовими рядами.

Для навчання моделей прогнозування були використані вхідні дані у формі матриці розмірністю $m \times k$, де m відповідає кількості метрологічних ризиків, а k – числу історичних спостережень певного МР. На основі цих даних створюються часові ряди (англ. time series) за визначений період. На рисунку 4.1 зображено графік часового ряду, який ілюструє динаміку змін значень метрологічних ризиків МР1, МР2 та МР3 у проміжку з 1 січня 2023 року по 24 листопада 2024 року. Цей графік відображає особливості структури вхідних даних та закономірності їхньої мінливості.

Щоб забезпечити навчання моделей та оцінку їхньої результативності, вхідні дані було розподілено на два набори: для навчання та для перевірки. Набір для навчання охоплює значення параметрів ризику за період із 1 січня 2023 року по 30 вересня 2024 року. Набір для перевірки включає дані з 1 жовтня 2024 року по

24 листопада 2024 року і застосовується для перевірки точності прогнозних результатів нейронної мережі.

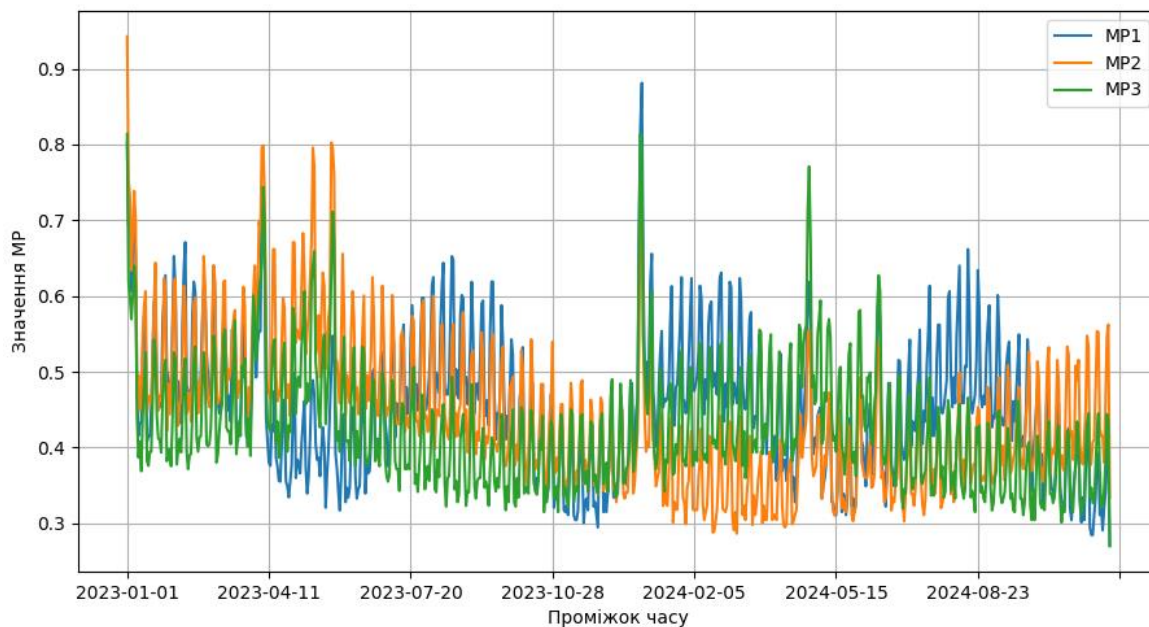


Рисунок 4.1. Зміна значень ризиків МР1, МР2 та МР3 протягом заданого періоду часу.

На рисунку 4.2 наведено розподіл даних, на якій чітко позначено межу між навчальним набором та набором для перевірки.

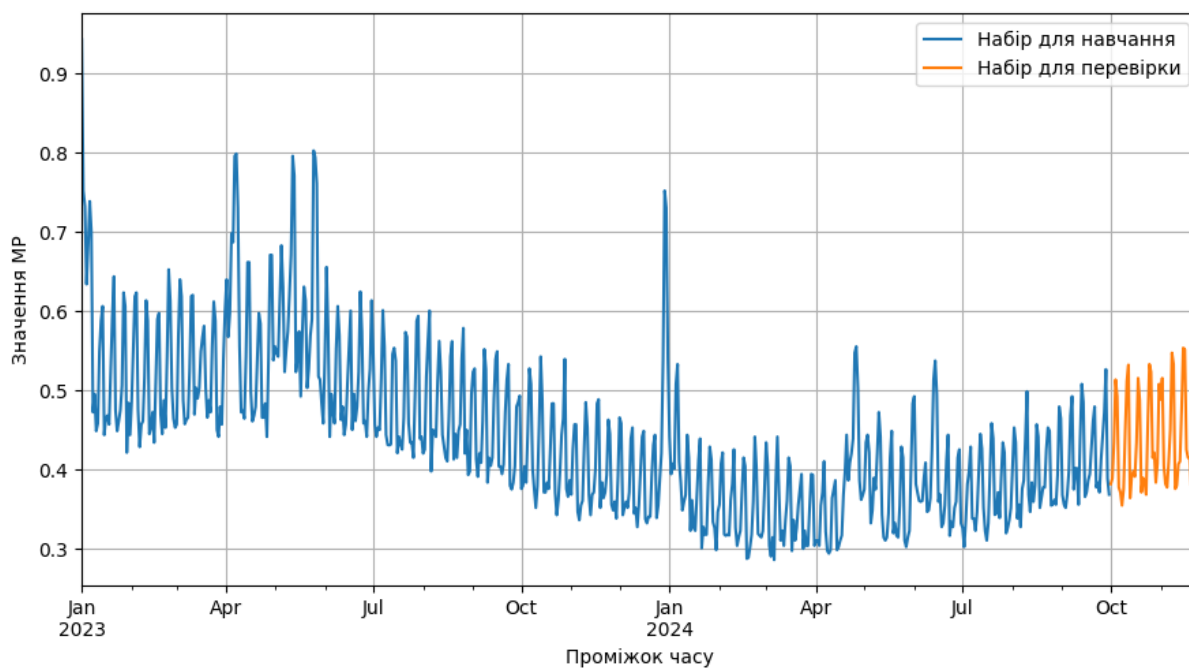


Рисунок 4.2. Розподіл вхідних даних на набори для навчання та перевірки

Після поділу вхідних даних відбувається процес навчання нейронної мережі на основі навчального набору. Після завершення цього процесу навчена нейронна мережа використовується для отримання прогнозних значень на заданий період часу, який відповідає періоду набору для перевірки, що містить реальні значення МР. Для оцінки точності отриманих прогнозів проводиться порівняння масивів прогнозованих і фактичних значень МР з використанням різноманітних метрик, які дозволяють кількісно визначити похибку побудованої моделі.

При розв'язанні задач прогнозування часових рядів, зокрема прогнозуванні метрологічного ризику, надзвичайно важливим є використання метрик, які дозволяють отримати змістовну й однозначну оцінку точності побудованих прогнозів. Для цього дослідження було відібрано наступні метрики: коефіцієнт кореляції (R^2), середньоквадратичну похибку (Root Mean Square Error – RMSE), середню відносну похибку (Mean Absolute Percentage Error – MAPE) та середню абсолютну похибку (Mean Absolute Error – MAE).

MAE відображає середню абсолютну величину похибки прогнозних значень у тих же одиницях вимірювання, що й оцінюваний метрологічний ризик. У контексті метрологічних ризиків ця метрика вказує на середню абсолютну розбіжність між прогнозованими та реальними значеннями ризику. Чим меншим є показник MAE, тим точнішими є прогнози. Формула для обчислення MAE має вигляд [85]:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|, \quad (4.1)$$

де n - кількість спостережень, \hat{y}_i - спрогнозоване значення МР, y_i - дійсне значення МР.

MAPE характеризує середню відносну похибку прогнозу. У контексті оцінювання метрологічного ризику ця метрика демонструє, наскільки у відсотках, прогнозовані значення відхиляються від дійсних. Менші значення

MAPE свідчать про вищу точність прогнозування. Формула для розрахунку MAPE подана нижче [86]:

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \times 100 \%. \quad (4.2)$$

RMSE характеризує квадратичні значення похибок прогнозу, завдяки чому ця метрика є особливо чутливою до великих відхилень. У контексті прогнозування метрологічних ризиків це дає змогу своєчасно ідентифікувати значні похибки, які можуть мати критичний вплив на прийняття управлінських рішень. Значення RMSE виражається в тих самих одиницях, що й значення метрологічного ризику. Чим менше значення RMSE, тим точнішою є модель. Для обчислення RMSE використовується формула [87]:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}. \quad (4.3)$$

Метрика R^2 характеризує точність прогнозування шляхом оцінювання відповідності моделі реальним змінам і тенденціям у значеннях метрологічного ризику. Вона набуває значень у діапазоні від 0 до 1, де значення, близькі до 1, вказують на те, що модель успішно описує варіативність ризику, а значення, близькі до 0, означають, що модель не враховує особливостей вхідних даних і дає прогноз, близький до середнього значення y_i . Більші значення R^2 свідчать про високу якість прогнозу, оскільки модель краще враховує особливості та тенденції зміни метрологічного ризику. Формула для розрахунку R^2 має вигляд [88]:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}. \quad (4.4)$$

де \bar{y} - середнє значення фактичних значень МР.

Враховуючи вищенаведену інформацію, було здійснено дослідження, головною метою якого було визначення точності прогнозування МР за допомогою різних моделей. У дослідженні застосовувались такі моделі: Facebook Prophet, Statsmodels SARIMAX, Forecaster Recursive, Forecaster Direct, LGBM Regressor та Linear Regression. Результати експерименту представлені на рисунках 4.3 – 4.5. Зокрема, на рисунку 4.3 наведено порівняння отриманих прогнозів моделей Facebook Prophet та Statsmodels SARIMAX із фактичними значеннями МР.

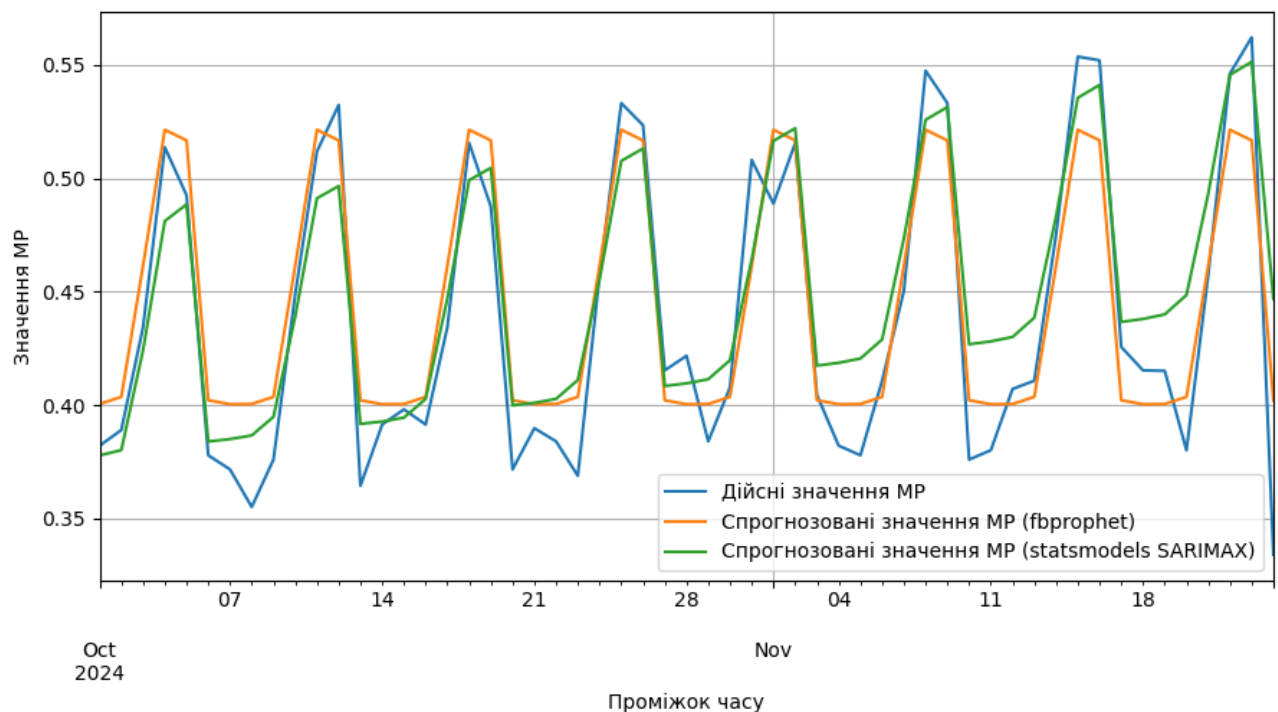


Рисунок 4.3. Спрогнозовані значення МР моделями: Statsmodels SARIMAX та Facebook Prophet

Обидві моделі адекватно відтворюють загальну тенденцію змін метрологічного ризику, однак модель Facebook Prophet точніше прогнозує пікові значення, у той час як модель Statsmodels SARIMAX демонструє певні розбіжності. На рисунку 4.4 наведено порівняння прогнозів моделей Forecaster Direct та Forecaster Recursive із реальними значеннями МР.

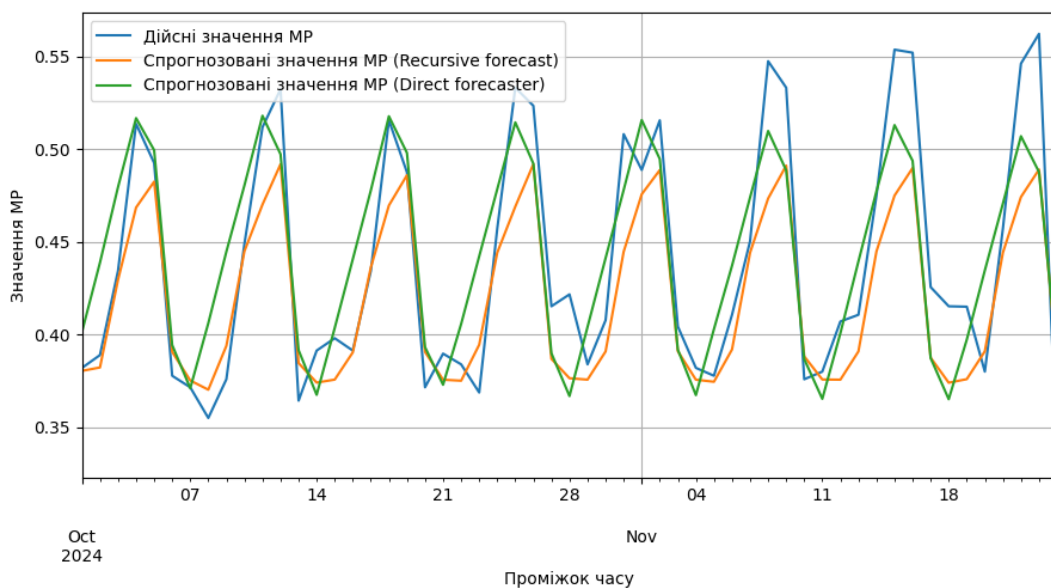


Рисунок 4.4. Спрогнозовані значення МР моделями: Forecaster Direct та Forecaster Recursive

Обидві зазначені моделі показують задовільну, але нижчу точність у порівнянні з попередньо розглянутими моделями. Зокрема, спостерігаються труднощі у прогнозуванні пікових значень, особливо під час різких змін (зростання або зниження). На рисунку 4.5 представлено графік, що демонструє результати прогнозування значень МР із застосуванням моделей Linear Regression та LGBM Regressor.

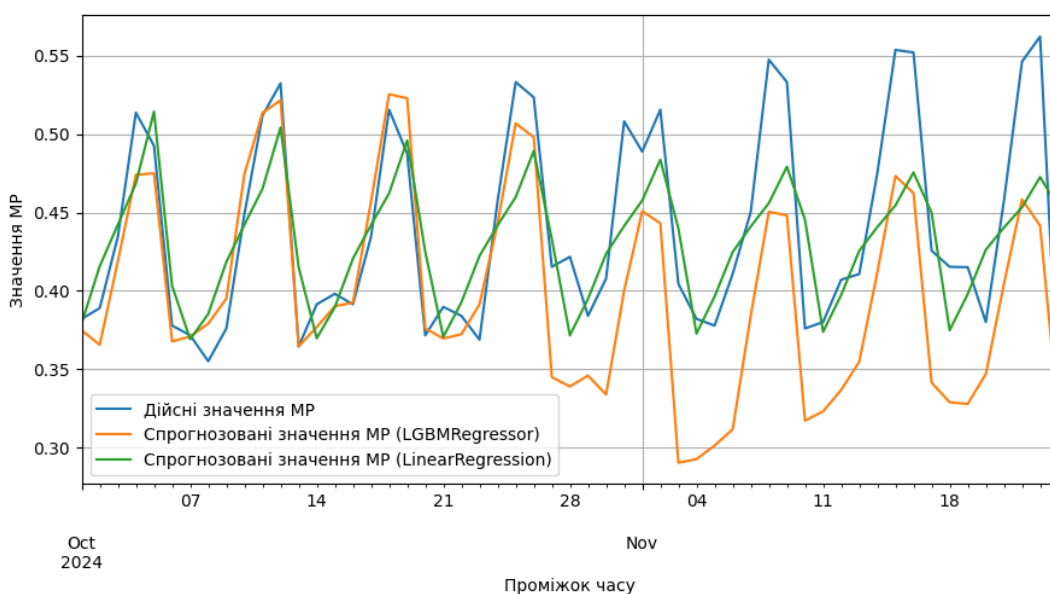


Рисунок 4.5. Спрогнозовані значення МР моделями: Linear Regression та LGBM Regressor

Моделі LGBM Regressor та Linear Regression характеризуються суттєвими відхиленнями, що знижує точність відтворення фактичних значень МР.

Кількісні показники точності прогнозування моделей, отримані з використанням описаних вище метрик, представлені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1.

Значення похибки прогнозування для шести досліджених моделей

Назва моделі	MAE	MAPE, %	R ²	RMSE
Facebook Prophet	0.019	4.697	0.861	0.024
Statsmodels SARIMAX	0.022	5.261	0.799	0.029
Forecaster Recursive	0.026	5.639	0.722	0.034
Forecaster Direct	0.029	6.792	0.709	0.035
LGBM Regressor	0.047	10.459	0.177	0.058
Linear Regression	0.035	7.899	0.511	0.045

Згідно з результатами аналізу таблиці, найточніші прогнози демонструє модель Facebook Prophet. Ця модель характеризується найнижчими показниками похибок MAE (0.019) та RMSE (0.024), що свідчить про її здатність забезпечувати найменші середні відхилення прогнозованих значень від реальних. Крім того, Facebook Prophet має найвищий показник R² (0.861), що вказує на високу ефективність цієї моделі у відображенні тенденцій та варіацій МР з часом. Модель Statsmodels SARIMAX має дещо нижчі показники точності порівняно з Facebook Prophet, але залишається достатньо ефективною (MAE = 0.022, RMSE = 0.029, R² = 0.799). Моделі Forecaster Direct та Forecaster Recursive показують помітно нижчі результати точності прогнозування, зокрема, мають вищі значення MAE (0.026 та 0.029) та MAPE (5.639% і 6.792%), що свідчить про більшу середню похибку у порівнянні з попередніми моделями. Найгіршу точність серед розглянутих моделей продемонстрували Linear Regression та LGBM Regressor. Показники коефіцієнта кореляції R² для них становили 0.177 та

0.511, що вказує на обмежену спроможність цих моделей враховувати складні зміни в динаміці метрологічного ризику.

Отже, найкращу ефективність показали моделі Facebook Prophet та Statsmodels SARIMAX, що продемонстрували як високу точність прогнозування, так і здатність належним чином адаптуватися до динамічних змін часових рядів. Зокрема, модель Facebook Prophet вийшла на перше місце за всіма показниками. Тому саме ця модель є найкращою для прогнозування МР у межах розглянутої задачі.

Важливим етапом у побудові систем прогнозування метрологічних ризиків є ретельний підбір обсягу даних, що використовуються для навчання та безпосередньо для формування прогнозу. Від правильного балансу між кількістю історичних спостережень (місяців), які мережа «вивчає» прогнозувати, та кількістю періодів, на які вона видає прогноз, залежать точність і надійність результатів. Занадто мала навчальна вибірка може спричинити «недонавчання» моделі, оскільки їй бракуватиме інформації про різноманітні закономірності. Натомість завелике «вікно» для прогнозування збільшує ймовірність накопичення помилки у віддаленому майбутньому.

У цьому дослідженні було використано модель Facebook Prophet, оскільки вона продемонструвала найкращі результати в попередньому дослідженні. Експеримент проводився з використанням початкових вхідних даних, розділених на 11 місяців для навчання та 11 місяців для перевірки. Для кожної ітерації бралася різна комбінація цих даних, усього 121 варіант (11×11). Для кожної такої комбінації спочатку здійснювалося навчання моделі Facebook Prophet, після чого виконувався прогноз на ту ж кількість місяців, що для набору для перевірки. Відповідні спрогнозовані значення порівнювалися з реальними спостереженнями і обчислювалася похибка.

На рисунку 4.6 наведено тривимірний графік залежності похибки прогнозу від кількості місяців для навчання нейронної мережі та кількості місяців для побудови прогнозу.

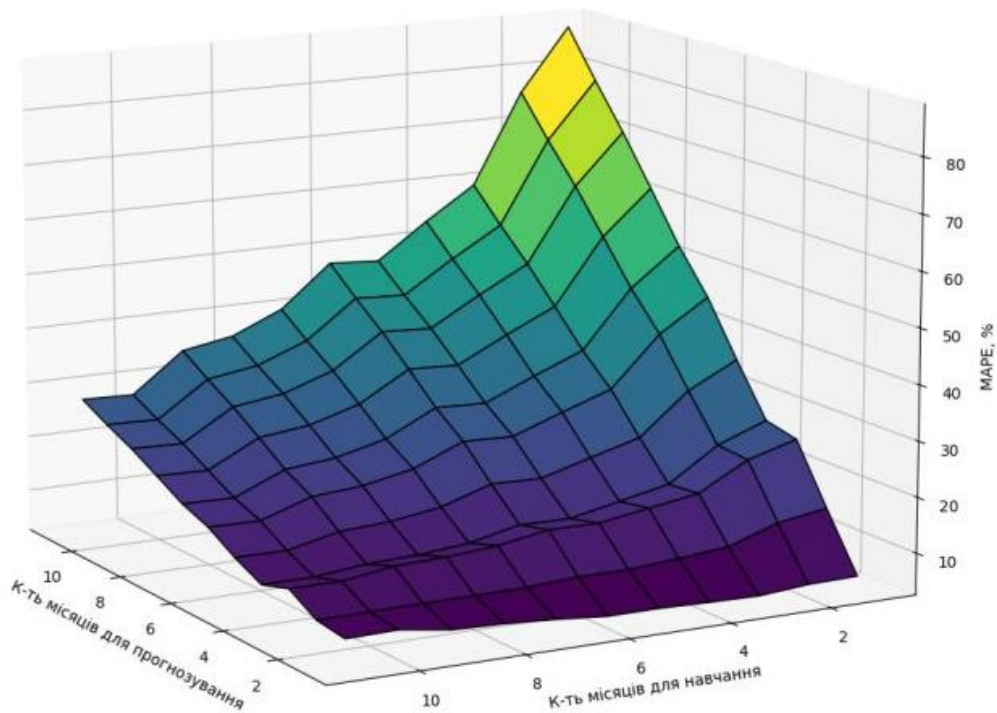


Рисунок 4.6. Графік залежності похибки від розміру даних для навчання та прогнозування

На рисунку 4.6 видно, що за умов збільшення історичного періоду для навчання та зменшення горизонту прогнозування похибка зменшується і навпаки: при короткому періоді навчання та довгому періоді прогнозу точність зменшується. Це підкреслює важливість пошуку оптимального балансу між «глибиною» вхідних даних і розміром прогнозного періоду, що, власне, дає можливість мінімізувати загальну похибку для моделі Facebook Prophet та інших досліджуваних методів.

Таким чином чим більше історичних даних враховується в процесі навчання й водночас чим коротше обрано вікно для прогнозу, тим вищою є точність оцінювання. Разом з тим, коректний вибір цих параметрів має урахувати специфіку процесу, типові коливання та наявність трендів у часовому ряді.

4.2. Програмне забезпечення системи оцінювання метрологічних ризиків

Застосування спеціалізованого програмного забезпечення (ПЗ) для оцінювання метрологічних ризиків якості продукції на етапі виготовлення є необхідним інструментом для підвищення достовірності та ефективності виробничих процесів. Таке ПЗ дозволяє автоматизувати аналіз даних, оперативно виявляти потенційні відхилення метрологічних параметрів і прогнозувати ризики. У порівнянні з традиційними методами, використання програмних рішень забезпечує швидше опрацювання великих обсягів інформації, мінімізацію людського фактора та можливість інтеграції з сучасними системами управління виробництвом.

Під час розробки ПЗ для оцінювання метрологічних ризиків використано сучасні технології, що забезпечують високу продуктивність і адаптивність системи. Для реалізації клієнтської частини (*frontend*) було обрано React [89] із застосуванням JSX (JavaScript XML) [90], оскільки ця бібліотека забезпечує модульну структуру інтерфейсу та має велику спільноту розробників, що пришвидшує розв'язання типових задач. Такий підхід дозволяє ефективно керувати станом застосунку, створювати динамічні та інтерактивні користувацькі інтерфейси та надає широкі можливості для повторного використання компонентів, що сприяє швидкому розвитку й супроводу коду. Клієнтську частину (*backend*) реалізовано на мові Python [91] у поєднанні з фреймворком FastAPI [92]. Python визнаний одним із найбільш гнучких та читабельних мов програмування, що забезпечує швидку розробку складних алгоритмів та інтеграцію з численними бібліотеками, зокрема для аналізу даних та машинного навчання. Використання FastAPI зумовлене його перевагами у створенні високопродуктивних веб-сервісів, зокрема автоматичною генерацією документації, підтримкою асинхронності, наявністю розширених можливостей до масштабування системи та зручною роботою з типізацією даних, що оптимізує процес обміну інформацією між клієнтом та сервером та підвищує надійність

розробленого програмного забезпечення. Вихідний код застосунку представлено у GitHub репозиторії [93] та в додатку В.

Інтерфейс застосунку для оцінювання МР показаний на рис. 4.7. Кожне вікно призначене для виконання певного етапу роботи даного застосунку.

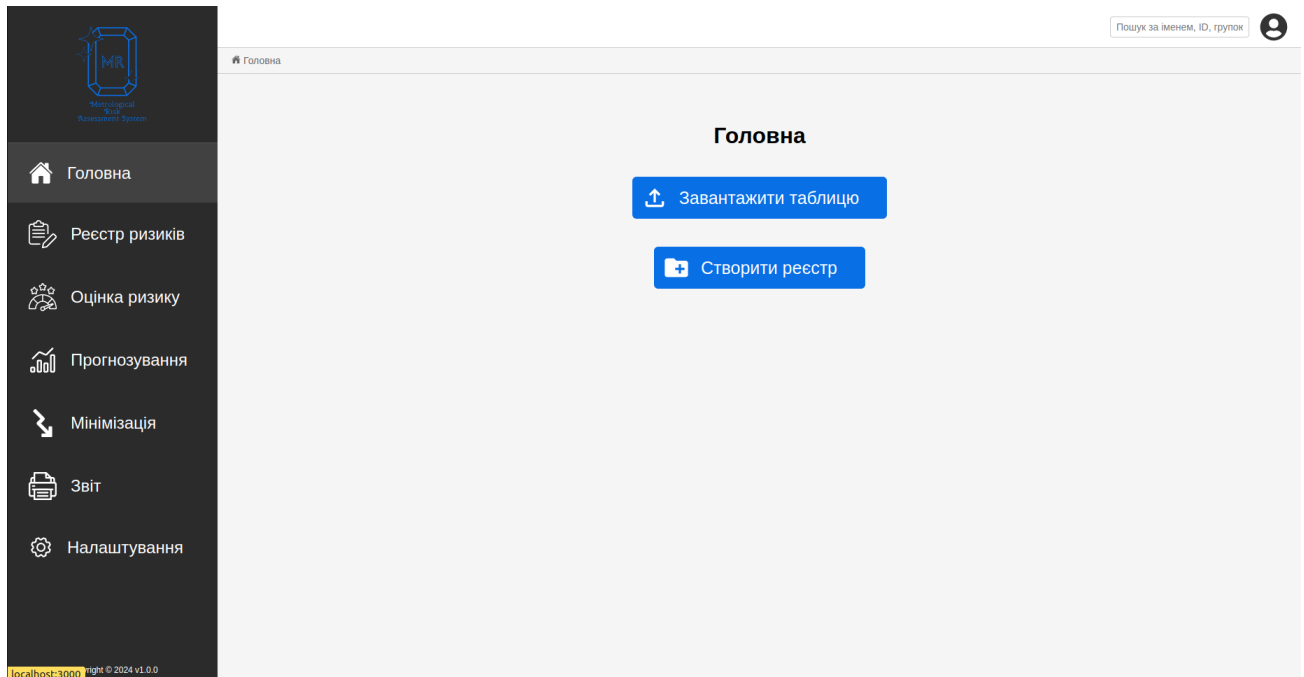


Рисунок 4.7. Головна сторінка програмного забезпечення для оцінювання МР

Щоб відкрити головну сторінку застосунку після запуску клієнтської і серверної частин, необхідно перейти за посиланням <http://127.0.0.1:3000>. На цій сторінці реалізовано дві опії:

- «Завантажити таблицю» – користувач може завантажити файл у форматі CSV, що містить готову таблицю з реєстром МР.
- «Створити реєстр» - користувач може створити новий порожній реєстр МР із необхідними для заповнення подіями.

Після вибору одного з цих варіантів система автоматично перенаправляє користувача на сторінку «Реєстр ризиків» (рис. 4.8).

localhost:3000/risk-registry 3.0

Головна \ Реєстр ризиків

Пошук за іменем, ID, групою

Реєстр метрологічних ризиків

Додати ризик | Видалити ризик | Редагувати ризик | Зберегти зміни | Зберегти реєстр

Обрати	Ідентифікатор ризику	Група ризику	Ризик	Значущість наслідків	Ймовірність виникнення	Ймовірність виявлення
<input type="checkbox"/>	MP1	Соціально-економічні	Ризик 1	4	5	5
<input type="checkbox"/>	MP2	Технічні	Ризик 2	7	4	2
<input type="checkbox"/>	MP3	Науково-інноваційні	Ризик 3	3	3	3
<input type="checkbox"/>	MP4	Науково-інноваційні	Ризик 4	7	6	6
<input type="checkbox"/>	MP5	Науково-інноваційні	Ризик 5	5	5	6
<input type="checkbox"/>	MP6	Людський фактор	Ризик 6	4	5	2
<input type="checkbox"/>	MP7	Технічні	Ризик 7	7	4	2
<input type="checkbox"/>	MP8	Система МЗ	Ризик 8	9	1	3
<input type="checkbox"/>	MP9	Система МЗ	Ризик 9	5	4	6
<input type="checkbox"/>	MP10	Система МЗ	Ризик 10	2	3	4
<input type="checkbox"/>	MP11	Природньо-екологічні	Ризик 11	7	6	6
<input type="checkbox"/>	MP12	Природньо-екологічні	Ризик 12	5	2	8
<input type="checkbox"/>	MP13	Людський фактор	Ризик 13	5	4	2
<input type="checkbox"/>	MP14	Людський фактор	Ризик 14	2	4	6
<input type="checkbox"/>	MP15	Людський фактор	Ризик 15	6	8	8
<input type="checkbox"/>	MP16	Соціально-економічні	Ризик 16	2	3	3
<input type="checkbox"/>	MP17	Науково-інноваційні	Ризик 17	6	8	9
<input type="checkbox"/>	MP18	Соціально-економічні	Ризик 18	3	3	3
<input type="checkbox"/>	MP19	Людський фактор	Ризик 19	4	3	4

Рисунок 4.8. Сторінка створення та редагування реєстру МР

Ця сторінка призначена для перегляду та редагування завантаженої або сформованої таблиці ризиків. Користувач може додавати нові записи про МР, редагувати наявні дані (наприклад, змінювати групу МР або його ймовірність чи значущість), а також видаляти непотрібні чи застарілі МР. Також передбачено можливість зберегти оновлений реєстр у форматі CSV, що полегшує його подальше використання чи передачу.

Підготовлений реєстр МР є вхідною інформацією для наступного етапу оцінки на сторінці «Оцінка ризику» (рис. 4.9). Для аналізу МР на цій сторінці використовується діаграма Ішикави (діаграма причинно-наслідкових зв'язків) [94], оскільки вона наочно дозволяє дослідити та визначити найбільш суттєві МР і їх вплив на комплексне значення МР. Для оцінки значень МР, групових показників та комплексного показника, що відображаються на діаграмі Ішикави, використовуються математичні моделі (3.3) - (3.16). Кольорове кодування допомагає швидко оцінити критичність кожного МР: зелений означає низький рівень МР, жовтий – середній, а червоний – високий. Порогові значення, що

визначають перехід між рівнями, можуть бути змінені залежно від вимог конкретного виробництва та задаються на сторінці «Налаштування».

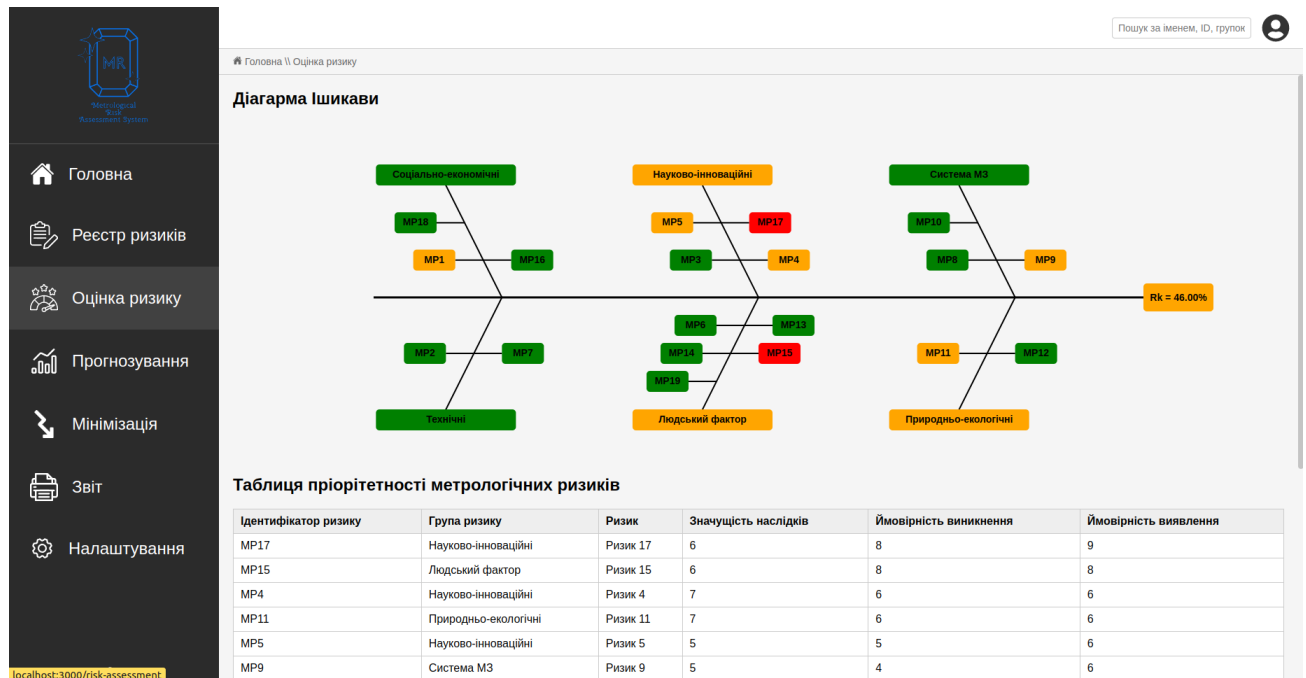


Рисунок 4.9. Сторінка програмного забезпечення для оцінки МР

Діаграма Ішикави, представлена на сторінці, є динамічною та адаптивною. Вона автоматично розширюється залежно від даних, внесених до реєстру МР. Нові ризики, додані до реєстру, інтегруються до відповідних гілок діаграми без необхідності ручного втручання, що забезпечує актуальність та зручність використання системи для користувачів.

Варто зазначити, що у «Реєстрі ризиків» значення параметрів S, O та D наведені як цілі числа у діапазоні від 1 до 10 (табл. 3.1-3.3). Однак під час розрахунків вони автоматично конвертуються у «вдосконалені» значення (табл. 3.5, 3.6). Такий підхід забезпечує рівномірніший розподіл значень МР у цілому діапазоні, а добуток середніх значень розташований ближче до середини діапазону у порівнянні із стандартними шкалами. За результатами розрахунків усі МР впорядковуються від найвищих значень до найнижчих і формують таблицю пріоритетності МР у нижній частині сторінки. Таким чином, користувач

може швидко оцінити значення S, O та D найбільш критичних МР та планувати подальші дії для їх усунення чи пом'якшення.

Сторінка «Прогнозування» (рис. 4.10) забезпечує функціонал визначення динаміки МР на основі сучасних методів машинного навчання. Прогнозування здійснюється за допомогою алгоритму для аналізу часових рядів, описаного в підрозділі 4.1. Вихідний код цього алгоритму розташовано на платформі GitHub [95], а також в додатку Г. Алгоритм використовує модель Facebook Prophet, яка була визначена як найбільш ефективна в попередніх дослідженнях. Проте користувач може змінити як саму модель, так і її параметри через сторінку «Налаштування».

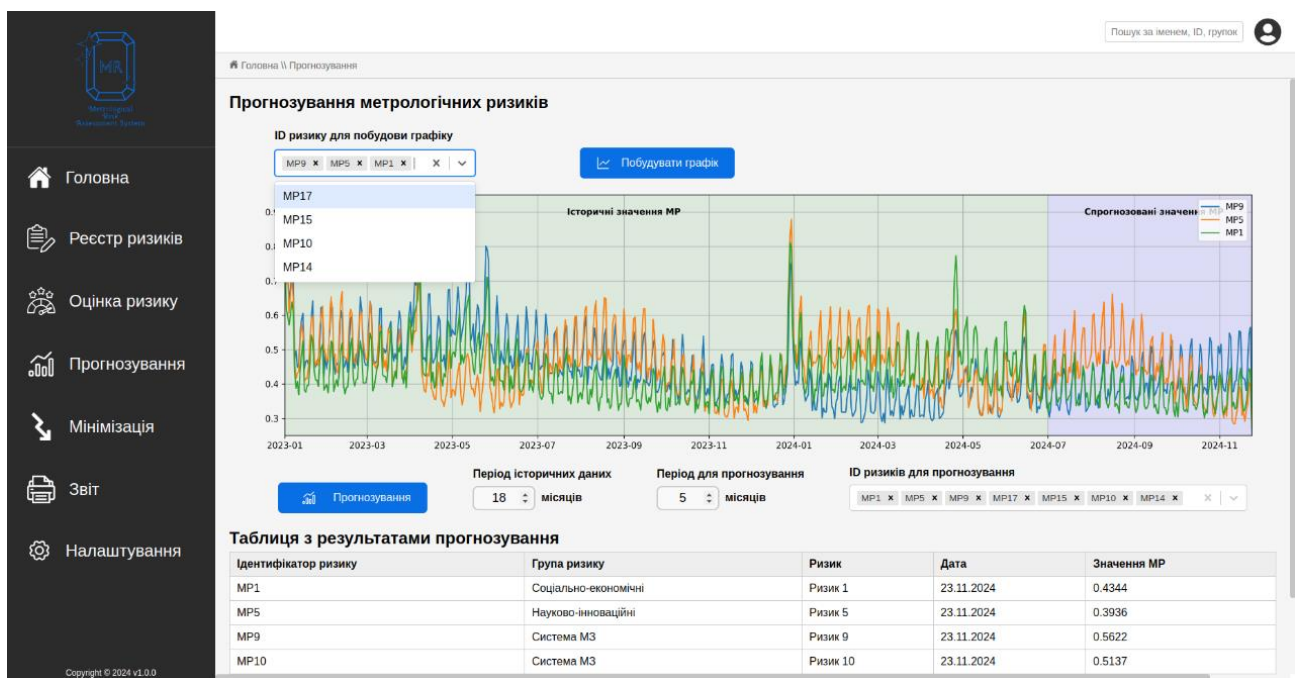


Рисунок 4.10. Сторінка програмного забезпечення для прогнозування МР

На самій сторінці передбачено можливість налаштування параметрів прогнозування, зокрема вибору періоду історичних даних, що використовуються для навчання моделі, та періоду для прогнозування. Дані періоди відраховуються від останньої дати внесення даних про МР. Наприклад, якщо останній запис МР датований 23.06.2024, а кількість місяців для навчання рівне 18, то інтервал для

навчання буде в межах від 23.12.2022 до 23.06.2024. Відповідно, якщо кількість місяців для прогнозування рівне 5, то інтервал для прогнозування буде в межах від 23.06.2024 до 23.11.2024.

Варто зазначити, що не обов'язково здійснювати прогнозування для всіх МР одночасно. Користувач може обрати конкретні ідентифікатори МР (наприклад, МР9, МР5, МР1 тощо) у відповідному полі та запустити процес за допомогою кнопки «Прогнозування». За результатами формується таблиця з прогнозованими значеннями МР, де відображаються дані для останньої дати прогнозу. Значення МР подаються у відносних одиницях (наприклад, 0.4344 відповідає 43.44 %).

Для детальнішого аналізу результатів є можливість їх візуалізації. Користувач може обрати ідентифікатори МР у відповідному полі та натиснути кнопку «Побудувати графік». На графіку відображаються результати прогнозування, виділені фіолетовим фоном, та історичні дані, використані для навчання моделі, представлені на зеленому фоні.

Сторінка «Мінімізація» (рис. 4.11) надає можливість створювати та редагувати заходи, спрямовані на зменшення комплексного показника МР (R_k). При додаванні чи коригуванні заходів необхідно вказати їх орієнтовний вплив на зниження R_k та витрати, потрібні для впровадження заходів.

Ці дані використовуються для побудови графіка ефективності, що визначається за математичними моделями (3.19) – (3.21). Графік, представлений у вигляді стовпчикової діаграми, дозволяє користувачу візуально оцінити, який із заходів є найбільш ефективним з точки зору зменшення метрологічних ризиків при мінімальних витратах. Ефективність кожного заходу оцінюється окремо.

Окрім того, для додаткового аналізу представлено діаграму Парето [96]. Вона демонструє внесок окремих МР у визначення комплексного показника МР та ілюструє «принцип 20/80», за яким відносно невелика кількість МР може забезпечити найбільшу частку збільшення R_k . Це дозволяє користувачу зосередити ресурси для мінімізації найбільш значущих МР.

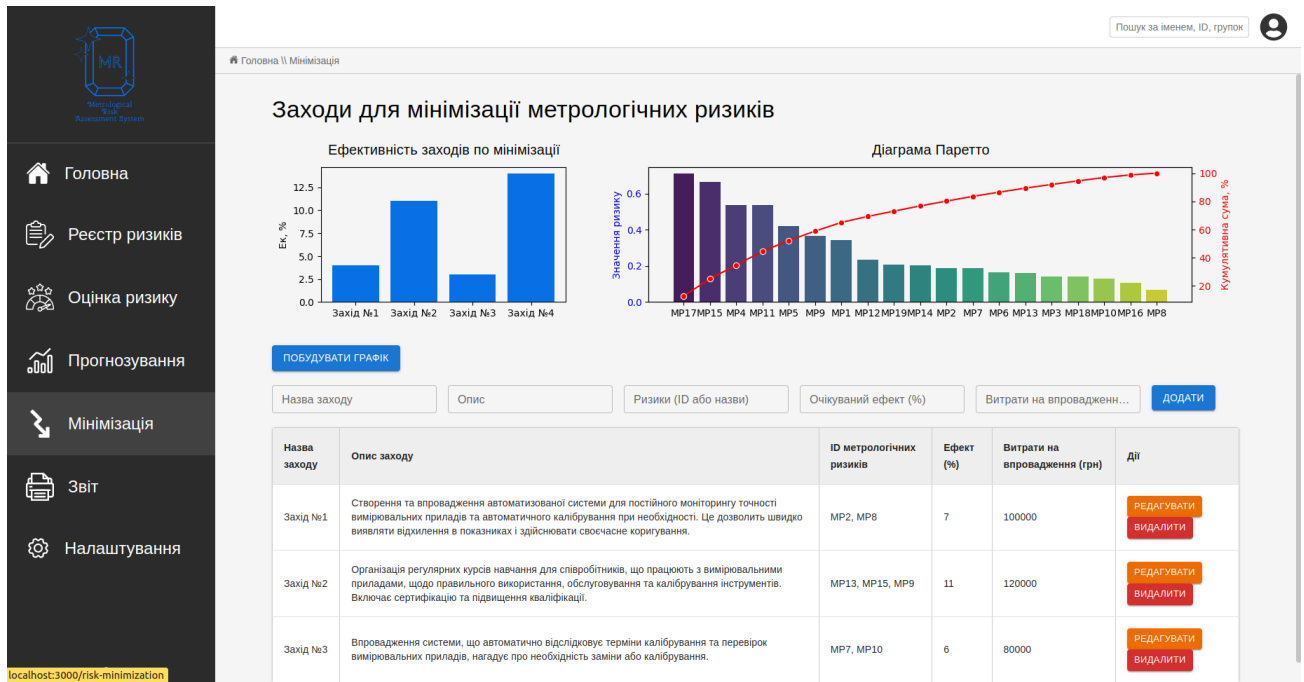


Рисунок 4.11. Сторінка програмного забезпечення для створення заходів для мінімізації МР

Сторінка «Звіт» (рис. 4.12) дозволяє автоматично сформувати детальний протокол аналізу МР за допомогою Python бібліотеки ReportLab [97], яка дозволяє створювати структуровані документи у форматі PDF з високим рівнем візуалізації та точності відображення даних. У фінальний документ вносяться всі ключові дані та результати, отримані на попередніх етапах роботи з ризиками: реєстр МР, підсумки оцінювання з відображенням найкритичніших МР, діаграма Ішикави, результати прогнозування, заходи з мінімізації та їх ефективність, а також підготовлені на основі цих даних висновки та рекомендації.

Функціонал підготовки тексту звіту реалізовано у двох режимах. Перший режим ручний/шаблонний. У цьому випадку використовується заготовлений шаблон із позначеними місцями (placeholders), які автоматично заповнюються актуальною інформацією, такою як найкритичніші МР, найефективніші заходи мінімізації тощо. Другий режим – автоматичний. Тут для генерації тексту застосовуються великі мовні моделі (LLM). Конкретніше мовна модель GPT-4o-mini від OpenAI [98], що генерує текстовий супровід і рекомендації на основі

спеціально підготовлених інструкцій (prompts). Ключ доступу до моделі та параметри її використання задаються на сторінці «Налаштування». Такий підхід дає змогу отримати більш гнучкий і варіативний результат, який враховує не лише суто формальні дані, а й контекст, важливий у прийнятті рішень щодо подальшого управління метрологічними ризиками.

The screenshot shows a web application for metrological risk assessment. The interface is in Ukrainian. On the left is a dark sidebar with navigation icons and labels: 'Головна' (Home), 'Реєстр ризиків' (Risk Register), 'Оцінка ризику' (Risk Assessment), 'Прогнозування' (Forecasting), 'Мінімізація' (Minimization), 'Звіт' (Report), and 'Налаштування' (Settings). The main content area is titled 'Звіт оцінювання метрологічних ризиків' (Risk Assessment Report). It features a table of contents, a flowchart, and a table of risk priorities. The flowchart shows a process flow from 'Мета оцінювання метрологічних ризиків' to 'Методика аналізу метрологічних ризиків'. The table of risk priorities is as follows:

Ідентифікатор ризику	Група ризику	Рівень ризику	Важливість виконання	Важливість ліквідації
MP17	Безпечність процесів	Рівень 17	6	8
MP15	Діагностика	Рівень 15	6	8

Рисунок 4.12. Сторінка програмного забезпечення для створення звіту

Таким чином, розроблений застосунок дає змогу комплексно виконувати всі основні етапи роботи з метрологічними ризиками: починаючи від формування реєстру та їх першочергової оцінки, і завершуючи глибокими аналітичними методами прогнозування та плануванням заходів для мінімізації. Завдяки використанню сучасних веб-технологій, інструментів машинного навчання та гнучкої системи підготовки звітів, його функціонал може бути легко адаптований до специфічних потреб кожного підприємства.

4.3. Апробація результатів дослідження

Апробація результатів дослідження проводилася на підприємстві розташованому в місті Городок Львівської області, яке спеціалізується на виготовленні соків із власної сировини. Апробація підтверджена відповідним актом (додаток А). Компанія вирізняється комплексним підходом до своєї роботи охоплюючи повний цикл виробництва, а саме: вирощування зерняткових і кісточкових фруктів, овочів та ягід; виробництво та пакування фруктових та овочевих соків; торгівля готовою продукцією, зокрема фруктами, овочами та напоями. Використання власної сировини забезпечує високий рівень контролю над якістю продукції на всіх етапах – від культивування до кінцевого споживача, що стало ключовим аспектом для вибору цього підприємства як бази для апробації результатів дослідження.

За результатами проведеного аналізу факторів, що впливають на технологічний процес виготовлення соків, було визначено ключові метрологічні ризики, які можуть впливати на показники та параметри сировини та готової продукції. На основі цього аналізу було сформовано реєстр МР (додаток Д), який систематизує виявлені чинники та їх потенційний вплив на процеси виробництва соків, вирощування сировини та пакування готової продукції.

Для кожного метрологічного ризику, включеного до реєстру, було розраховано значення ризику r за формулами (3.3) та (3.6). Результати представлено в таблиці 4.2. В цій таблиці значення S, O та D подано у вигляді вдосконалених нелінійних шкал, розроблених та досліджених у підрозділі 3.2. Під час розрахунку r значення S, O і D було нормалізовано відповідно до (3.3) для того, щоб значення ризику r було в діапазоні від 0 до 1.

Таблиця 4.2.

Реєстр метрологічних ризиків

Група МР	Ідентифікатор МР	Найменування МР	Значущість наслідків МР (S)	Ймовірність виникнення МР (O)	Ймовірність виявлення МР (D)	Значення МР (r)
1	2	3	4	5	6	7
Соціально-економічні	МР1	Зміна стандартів якості через законодавчі акти	4	4	3	0.2079
Соціально-економічні	МР2	Економічні санкції на постачальників калібрувального обладнання	5	5	3	0.2676
Соціально-економічні	МР3	Зростання цін на сертифікацію метрологічних засобів	5	5	3	0.2676
Соціально-економічні	МР4	Недостатня кількість кваліфікованого персоналу	7	6	3	0.3423
Науково-інноваційні	МР5	Відставання від нових методів вимірювання вмісту пестицидів у сировині	6	2	2	0.0957
Науково-інноваційні	МР6	Застарілі методи калібрування ваг для зважування сировини	6	4	5	0.3616
Науково-інноваційні	МР7	Невідповідність вимірювальних приладів міжнародним трендам	4	2	3	0.1146
Природньо-екологічні	МР8	Вплив сезонності на якість фруктів, овочів та ягід	6	5	4	0.3616
Природньо-екологічні	МР9	Забруднення природної сировини пестицидами та важкими металами	3	2	2	0.0664
Природньо-екологічні	МР10	Коливання температури та вологості під час зберігання сировини	4	3	2	0.1146
Природньо-екологічні	МР11	Неточні результати аналізу ґрунту через наповнення підводних річок	4	5	6	0.3754
Система МЗ	МР12	Порушення періодичності калібрування приладів для вимірювання кислотності соків	5	3	5	0.2676
Система МЗ	МР13	Неправильне зберігання еталонних зразків	4	2	3	0.1146
Система МЗ	МР14	Відсутність актуалізації метрологічних процедур	4	3	5	0.2388
Система МЗ	МР15	Відсутність документованої системи управління метрологічними ризиками	5	3	4	0.2330

Продовження таблиці 4.2.

1	2	3	4	5	6	7
Система МЗ	MP16	Некоректне ведення журналу перевірок	6	3	3	0.2037
Технічні	MP17	Зношення ваг для зважування сировини	6	4	5	0.3616
Технічні	MP18	Несправність сенсорів температури пастеризації	5	2	2	0.0881
Технічні	MP19	Використання застарілих рефрактометрів	5	3	5	0.2676
Технічні	MP20	Несправність фасувальних ліній	5	2	2	0.0881
Технічні	MP21	Перебої в електропостачанні	9	7	3	0.4071
Технічні	MP22	Неоптимізоване програмне забезпечення	5	6	7	0.4989
Людський фактор	MP23	Помилки операторів при зчитуванні показників рефрактометра	4	3	2	0.1146
Людський фактор	MP24	Неправильне налаштування обладнання для аналізу сировини	6	3	4	0.2533
Людський фактор	MP25	Порушення правил експлуатації вимірювальних приладів	5	2	2	0.0881
Людський фактор	MP26	Ігнорування сигналів про збої в системі	3	4	3	0.1756
Людський фактор	MP27	Недотримання планів калібрування та метрологічних перевірок	7	4	4	0.3367

Перед розрахунком групового значення R_j метрологічних ризиків необхідно визначити середнє зважене значення $R_{j,avg}$ МР у межах кожної групи за (3.13), а також максимальне значення $R_{j,max}$ МР із цієї групи за (3.14), що забезпечити комплексний підхід до аналізу. Середні значення для кожної з груп є наступними:

$$R_{1,avg} = w_{1,N} \cdot r_1 + w_{2,N} \cdot r_2 + w_{3,N} \cdot r_3 + w_{4,N} \cdot r_4 = 0.25 \cdot 0.2079 + 0.25 \cdot 0.2676 + 0.25 \cdot 0.2676 + 0.25 \cdot 0.3423 = 0.2714 \quad (4.5)$$

$$R_{2,avg} = w_{5,N} \cdot r_5 + w_{6,N} \cdot r_6 + w_{7,N} \cdot r_7 = 0.33 \cdot 0.0957 + 0.33 \cdot 0.3616 + 0.33 \cdot 0.1146 = 0.1887 \quad (4.6)$$

$$R_{3,avg} = w_{8,N} \cdot r_8 + w_{9,N} \cdot r_9 + w_{10,N} \cdot r_{10} + w_{11,N} \cdot r_{11} = 0.25 \cdot 0.3616 + 0.25 \cdot 0.0664 + 0.25 \cdot 0.1146 + 0.25 \cdot 0.3754 = 0.2295 \quad (4.7)$$

$$\begin{aligned}
R_{4,avg} &= w_{12,N} \cdot r_{12} + w_{13,N} \cdot r_{13} + w_{14,N} \cdot r_{14} + w_{15,N} \cdot r_{15} + w_{16,N} \cdot r_{16} \\
&= 0.2 * 0.2676 + 0.2 * 0.1146 + 0.2 * 0.2388 + \\
&\quad 0.2 * 0.2330 + 0.2 * 0.2037 = 0.2115
\end{aligned} \tag{4.8}$$

$$\begin{aligned}
R_{5,avg} &= w_{17,N} \cdot r_{17} + w_{18,N} \cdot r_{18} + w_{19,N} \cdot r_{19} + w_{20,N} \cdot r_{20} + w_{21,N} \cdot r_{21} + \\
w_{22,N} \cdot r_{22} &= 0.17 * 0.3616 + 0.17 * 0.0881 + 0.17 * 0.2676 + 0.17 * 0.0881 + \\
&\quad 0.17 * 0.4071 + 0.17 * 0.4989 = 0.2909
\end{aligned} \tag{4.9}$$

$$\begin{aligned}
R_{6,avg} &= w_{23,N} \cdot r_{23} + w_{24,N} \cdot r_{24} + w_{25,N} \cdot r_{25} + w_{26,N} \cdot r_{26} + w_{27,N} \cdot r_{27} = \\
&\quad 0.2 * 0.1146 + 0.2 * 0.2533 + 0.2 * 0.0881 + \\
&\quad 0.2 * 0.1756 + 0.2 * 0.3367 = 0.1937
\end{aligned} \tag{4.10}$$

де $R_{1,avg}$ – середнє зважене значення МР соціально-економічної групи, $R_{2,avg}$ – середнє зважене МР науково-інноваційної групи, $R_{3,avg}$ – середнє зважене значення МР природньо-екологічної групи, $R_{4,avg}$ – середнє зважене значення МР технічної групи, $R_{5,avg}$ – середнє зважене значення МР групи пов'язаної з людським фактором, $R_{6,avg}$ – середнє зважене значення МР групи системи МЗ.

Максимальні значення рівні:

$$R_{1,max} = \max(r_1, r_2, r_3, r_4) = 0.3423 \tag{4.11}$$

$$R_{2,max} = \max(r_5, r_6, r_7) = 0.3616 \tag{4.12}$$

$$R_{3,max} = \max(r_8, r_9, r_{10}, r_{11}) = 0.3754 \tag{4.13}$$

$$R_{4,max} = \max(r_{12}, r_{13}, r_{14}, r_{15}, r_{16}) = 0.2676 \tag{4.14}$$

$$R_{5,max} = \max(r_{17}, r_{18}, r_{19}, r_{20}, r_{21}, r_{22}) = 0.4989 \tag{4.15}$$

$$R_{6,max} = \max(r_{23}, r_{24}, r_{25}, r_{26}, r_{27}) = 0.3367 \tag{4.16}$$

де $R_{1,max}$ – максимальне значення МР соціально-економічної групи, $R_{2,max}$ – максимальне значення МР науково-інноваційної групи, $R_{3,max}$ – максимальне значення МР природньо-екологічної групи, $R_{4,max}$ – максимальне значення МР

технічної групи, $R_{5,max}$ – максимальне значення МР групи пов'язаної з людським фактором, $R_{6,max}$ – максимальне значення МР групи системи МЗ.

Для оцінки групових значень R_j метрологічних ризиків застосовано (3.15), яка дозволяє агрегувати дані та визначити вплив МР в межах окремих груп. Груповий показник R_j визначався як зважена сума, де 25% припадало на середнє значення, а 75% - на максимальне значення МР у групі ($\lambda = 0.75$). Тобто більша перевага надавалося максимальному значенню. За результатами проведених обчислень групові значення МР є наступними:

$$\begin{aligned} R_1 &= (1 - \lambda)R_{1,avg} + \lambda R_{1,max} = \\ 0.25 * 0.2714 + 0.75 * 0.3423 &= 0.3246 \end{aligned} \quad (4.17)$$

$$\begin{aligned} R_2 &= (1 - \lambda)R_{2,avg} + \lambda R_{2,max} = \\ 0.25 * 0.1887 + 0.75 * 0.3616 &= 0.3184 \end{aligned} \quad (4.18)$$

$$\begin{aligned} R_3 &= (1 - \lambda)R_{3,avg} + \lambda R_{3,max} = \\ 0.25 * 0.2295 + 0.75 * 0.3754 &= 0.3389 \end{aligned} \quad (4.19)$$

$$\begin{aligned} R_4 &= (1 - \lambda)R_{4,avg} + \lambda R_{4,max} = \\ 0.25 * 0.2115 + 0.75 * 0.2676 &= 0.2536 \end{aligned} \quad (4.20)$$

$$\begin{aligned} R_5 &= (1 - \lambda)R_{5,avg} + \lambda R_{5,max} = \\ 0.25 * 0.2909 + 0.75 * 0.4989 &= 0.4469 \end{aligned} \quad (4.21)$$

$$\begin{aligned} R_6 &= (1 - \lambda)R_{6,avg} + \lambda R_{6,max} = \\ 0.25 * 0.1937 + 0.75 * 0.3367 &= 0.3009 \end{aligned} \quad (4.22)$$

де R_1 – значення МР соціально-економічної групи, R_2 – значення МР науково-інноваційної групи, R_3 – значення МР природньо-екологічної групи, R_4 – значення МР технічної групи, R_5 – значення МР групи пов'язаної з людським фактором, R_6 – значення МР групи системи МЗ.

На основі отриманих групових показників МР розраховується комплексне значення R_k МР за (3.16) як:

$$R_k = \frac{R_1 \cdot n_1 + R_2 \cdot n_2 + R_3 \cdot n_3 + R_4 \cdot n_4 + R_5 \cdot n_5 + R_6 \cdot n_6}{n_1 + n_2 + n_3 + n_4 + n_5 + n_6} =$$

$$\frac{0.3246 \cdot 4 + 0.3184 \cdot 3 + 0.3389 \cdot 4 + 0.2536 \cdot 5 + 0.4469 \cdot 6 + 0.3009 \cdot 5}{27} =$$

$$= 0.3357 \quad (4.23)$$

де $n_1, n_2, n_3, n_4, n_5, n_6$ – кількість МР в групах $R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6$ відповідно.

Комплексний показник МР, розрахований для підприємства, на якому здійснювалася апробація, становить $R_k=0.3357$ (або 33.6%). Використовуючи (3.17) визначено допустиме значення цього показника, яке становить $R_{k,доп}=0.5315$ (або 53.15 %). Відповідно до алгоритму оцінювання МР (рис. 2.11), оскільки $R_k \leq R_{k,доп}$, комплексний показник вважається прийнятним. Водночас підприємству доцільно продовжувати регулярний моніторинг МР і періодично проводити повторну оцінку. У разі накопичення достатньої кількості відповідних даних виробництво зможе застосовувати запропонований в роботі метод прогнозування МР та ПЗ з для аналізу ефективності впроваджених заходів щодо мінімізації ризиків.

Апробація результатів дослідження на виробництві підтвердила ефективність запропонованої методики ідентифікації та кількісної оцінки метрологічних ризиків. Отримані значення свідчать про прийнятний рівень МР, однак вказують на потребу в постійному контролі та вдосконаленні процесів для підтримання високої якості соків і пов'язаних продуктів. Подальше впровадження методів прогнозування може сприяти підвищенню ефективності виробництва та зниженню ризиків, що є перспективним напрямом для розвитку підприємства.

4.4. Висновки до розділу 4

У даному розділі запропоновано метод прогнозування метрологічних ризиків на основі нейронних мереж для аналізу часових рядів. Детально описано процес

підготовки даних, навчання та перевірки нейронної мережі, що забезпечує можливість точного прогнозування ризиків на етапі виготовлення продукції. Цей підхід дозволяє ефективно враховувати динаміку метрологічних параметрів у виробничих процесах.

Проведено порівняльний аналіз шести нейронних мереж для прогнозування метрологічних ризиків. Найкращі результати продемонструвала модель Facebook Prophet з найнижчими значеннями MAE (0.019) та RMSE (0.024) і найвищим R^2 (0.861), що свідчить про її високу точність і здатність адаптуватися до змін даних. Statsmodels SARIMAX показала прийнятну точність (MAE = 0.022, R^2 = 0.799), тоді як моделі Forecaster Recursive, Forecaster Direct, LGBM Regressor та Linear Regression виявилися менш ефективними через вищі похибки (R^2 від 0.177 до 0.511).

Досліджено залежність точності прогнозування від співвідношення обсягу даних для навчання та горизонту прогнозу. Встановлено, що збільшення історичного періоду навчання при скороченні вікна прогнозування зменшує похибку, тоді як короткий період навчання та довгий горизонт прогнозу знижують точність. Це підкреслює необхідність оптимального балансу між цими параметрами для підвищення якості прогнозів, зокрема для моделі Facebook Prophet.

Розроблено програмне забезпечення на базі Python, React та спеціалізованих бібліотек для оцінки й прогнозування метрологічних ризиків. Воно включає функції створення реєстру ризиків, розрахунку комплексного показника, прогнозування, розробки заходів мінімізації та автоматичної генерації звітів. Основою ПЗ є математичні моделі, які забезпечують комплексний аналіз і оцінку ефективності впроваджених рішень. Програмне забезпечення надає змогу автоматизувати процес оцінювання метрологічних ризиків, забезпечуючи зручність у використанні та гнучкість у налаштуванні.

Апробація результатів на виробництві соків підтвердила практичну ефективність результатів дослідження. Комплексний показник метрологічного

ризиків склав $R_k = 0.3357$ (33.6%), що не перевищує допустимого значення $R_{k, \text{доп}} = 0.5315$ (53.15%). Це свідчить про прийнятний рівень метрологічних ризиків на виробництві. Для підвищення ефективності рекомендовано регулярний моніторинг, повторні оцінки та використання запропонованого методу прогнозування й ПЗ за наявності достатнього обсягу даних.

ВИСНОВКИ

У роботі, присвяченій дослідженню метрологічних ризиків забезпечення якості продукції на етапі виготовлення, проведено аналіз факторів, що впливають на ці ризики, розроблено методи їх оцінювання, прогнозування та управління, а також запропоновано практичні інструменти для мінімізації впливу ризиків на якість продукції.

1. Досліджено специфіку внутрішніх і зовнішніх факторів, що впливають на метрологічні ризики якості продукції, та показано їхній різний характер: зовнішні фактори (соціально-економічні, природньо-екологічні, науково-інноваційні) мають високу варіативність і обмежену керованість, тоді як внутрішні (технічні, людський фактор, метрологічне забезпечення) чітко пов'язані з діяльністю підприємства. Запропоновано класифікацію цих факторів що сприяє систематизації ризиків і визначенню пріоритетів їхньої мінімізації.

2. Проведено аналіз міжнародних стандартів ISO 9001, ISO 31000 та ISO 31010. За результатами сформульовано вимоги до побудови системи управління метрологічними ризиками, які враховують принципи системного підходу та забезпечують інтеграцію управління ризиками в процеси контролю якості продукції на етапі виготовлення.

3. Запропоновано концепцію системи управління метрологічними ризиками, яка включає три ключові етапи: планування, оцінювання та опрацювання ризиків. Система базується на взаємодії внутрішніх і зовнішніх факторів, що дозволяє комплексно враховувати їхній вплив на якість продукції.

4. Розроблено математичну модель комплексного показника розміру метрологічного ризику, який агрегує значущість наслідків, ймовірність виникнення та можливість виявлення ризиків у єдину величину. Математична модель цього показника враховує визначення вагових коефіцієнтів взаємовпливу метрологічних ризиків, а також визначення допустимого значення комплексного

показника на основі порогових значень або статистичного аналізу, що забезпечує об'єктивне оцінювання ризиків.

5. Запропоновано нелінійні шкали оцінювання метрологічних ризиків, які підвищують точність аналізу завдяки рівномірному розподілу значення ризику в діапазоні можливих значень. Добуток середніх значень одиничних показників при цьому розташований ближче до середини діапазону.

6. Розроблено математичну модель оцінки ефективності заходів мінімізації метрологічних ризиків, яка враховує відносне зменшення ризиків і співвідношення витрат до можливих втрат. Модель дозволяє порівнювати різні варіанти заходів і обирати оптимальні рішення для підвищення надійності виробничих процесів.

7. Запропоновано метод прогнозування метрологічних ризиків на основі нейронних мереж для аналізу часових рядів. Проведено порівняльний аналіз шести моделей, де найкращі результати показала модель Facebook Prophet ($MAE = 0.019$, $RMSE = 0.024$, $R^2 = 0.861$), що підтверджує її точність і адаптивність. За результатами дослідження встановлено, що зі збільшенням обсягу історичних даних і скороченням вікна прогнозування похибка зменшується, що підкреслює необхідність оптимізації цих параметрів для покращення системи прогнозування ризиків.

8. Розроблено програмне забезпечення на базі Python, React та спеціалізованих бібліотек для автоматизації оцінки й прогнозування метрологічних ризиків, що підвищує зручність і гнучкість управління ризиками.

9. Проведено апробацію результатів на виробництві соків, де комплексний показник метрологічного ризику склав $R_k = 0.3357$ (33.6%), що не перевищує допустимого значення $R_{k, доп} = 0.5315$ (53.15%) та підтверджує практичну ефективність запропонованих методів і моделей. Регулярний моніторинг, повторні оцінки та використання розробленого методу прогнозування й програмного забезпечення дозволять підтримувати та підвищувати стабільність якості продукції.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Федорович В. О., Пупань Л. І., Островерх Є. В. «Метрологічне забезпечення якості продукції», навч. посібник. Харків: НТУ «ХПІ», 2022. с.104.
2. ISO 9001:2015. Quality Management Systems - Requirements. ISO, 2015. URL: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:9001:ed-5:v1:en>.
3. ДСТУ ISO 9000:2015. Системи управління якістю. Основні положення та словник термінів (ISO 9000:2015, IDT). Київ: Національний стандарт України, 2015.
4. ДСТУ ISO 9004:2018. Управління якістю. Якість організації. Настанови щодо досягнення сталого успіху (ISO 9004:2018, IDT). Київ: Національний стандарт України, 2018.
5. ДСТУ ISO 19011:2019. Настанови щодо проведення аудитів систем управління (ISO 19011:2018, IDT). Київ: Національний стандарт України, 2019.
6. ДСТУ ISO/TS 9002:2017. Системи управління якістю. Настанови щодо застосування ISO 9001:2015 (ISO/TS 9002:2016, IDT). Київ: Національний стандарт України, 2017.
7. ISO 9000:2015. Quality management systems - Fundamentals and vocabulary. Geneva: International Organization for Standardization, 2015.
8. Robinson M R., Anderson K., Browning B. «Risk & Reliability: An Introductory Text». 5th ed. Melbourne: Printed and bound by Imscam Pty Ltd, April 2004. ISBN 0-9585241-3-0.
9. Слюз А. Я. «Ризик-менеджмент як дієвий інструмент забезпечення стабільності діяльності підприємства». *Академічні візії*, вип. 20, 2023. DOI: 10.5281/zenodo.10244294.
10. Мостенська Т. Л., Скопенко Н. С. «Ризик-менеджмент як інструмент управління господарським ризиком підприємства». *Вісник Запорізького національного університету*, № 3 (7), 2010. URL: https://web.znu.edu.ua/herald/issues/2010/Vest_Ek7-3-2010-PDF/072-79.pdf.

11. Денисенко А. М., Грінченко Г. С., Бурдейна В. М., Лис Ю. С. «Методика управління ризиками для системи управління якістю при виготовленні виробів медичного призначення». *Системи управління навігації та зв'язку*, 3(55), 2019. DOI: 10.26906/SUNZ.2019.3.025.

12. Мороз В. М., Мороз С. А. «Ризик-менеджмент». Навчальний посібник. Харків: НТУ «ХПИ», 2018. 140с. ISBN. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/f3be8995-acd3-4ab8-928f-1c5ff30f3584/content>.

13. Hopkin P. «Fundamentals of Risk Management: Understanding, Evaluating and Implementing Effective Risk Management». 5th ed. London: Kogan Page, July 31, 2018. 480 p. ISBN 10: 0749483075.

14. Федулова І. В. «Стратегія ризик-менеджменту». *Менеджмент та підприємництво в Україні: етапи становлення та проблеми розвитку*, т. 1, № 1, 2019. URL: <https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2019/dec/20453/fedulova.pdf>.

15. Колосова К. А. «Управління комерційними ризиками виробничих підприємств». *Економічний вісник Донбасу*, № 2(40), 2015. URL: [https://www.evd-journal.org/download/2015/2\(40\)/pdf/13-Kolosova.pdf](https://www.evd-journal.org/download/2015/2(40)/pdf/13-Kolosova.pdf).

16. Савельєв М. С. «Стратегічне управління ризиками на малих та середніх підприємствах в кризових умовах: концептуальна модель». *Економіка: час реалій*, № 2 (72), 2024. DOI: 10.15276/ETR.02.2024.7. URL: <https://economics.net.ua/files/archive/2024/No2/55.pdf>.

17. Микийчук М. М. «Метрологічне забезпечення якості продукції на стадії виготовлення». Монографія. *Вижниця: Черемош*, 2014. 264 с. ISBN 978-966-181-138-5.

18. Sutton I. «Process Risk and Reliability Management: Operational Integrity Management». 1st ed. *Elsevier Inc.* 2010. ISBN 978-1-4377-7805-2.

19. Hopkin P. «Fundamentals of Risk Management: Understanding, Evaluating and Implementing Effective Risk Management». 4th ed. London: Kogan Page, 2017. 489p. ISBN 978 0 7494 7961 9.

20. ISO 31000:2018. Risk management - Guidelines. Geneva: International Organization for Standardization, 2018. Access mode: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:31000:ed-2:v1:en>.

21. ISO 10012:2003. Measurement management systems – Requirements for measurement processes and measuring equipment. Geneva: International Organization for Standardization, 2003. Access mode: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:10012:ed-1:v1:en>.

22. García B., Cespón M., Castro R.. «Indexes to evaluate risk-based metrological performance in companies in the energy sector». *Scientific Journal Visión De Futuro*, 26(1), 2021. URL: <https://visiondefuturo.fce.unam.edu.ar/index.php/visiondefuturo/article/view/506>.

23. Fuentes C., Lizarzaburu E. R., Vivanco E. Norms and international standards related to reduce risk management: A literature review. *Risk Governance & Control: Financial Markets & Institutions*, vol.1, Issue 3, 2011.

24. Aven T., Thekdi S. «Enterprise risk management: Advances on its foundation and practice». First published. 2020. ISBN: 978-1-138-38623-5.

25. Приказюк Н., Мендрик Д. «Модель управління ризиками COSO: еволюція та трансформація». *Економіка та суспільство*, №22, 2020. <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2020-22-63>.

26. Committee of Sponsoring Organizations of the Treadway Commission [COSO], Internal Control – Integrated Framework – Executive Summary / Committee of Sponsoring Organizations of the Treadway Commission [COSO]. 2013.

27. Jankensgård H., Kapstad P. «Empowered enterprise risk management: theory and practice». Wiley, 2021. ISBN 9781119700180.

28. ДСТУ ІЕС/ISO 31010:2013. Керування ризиком. Методи загального оцінювання ризику (ІЕС/ISO 31010:2009, IDT). Київ: Національний стандарт

України, 2013. Access mode:
<https://khoda.gov.ua/image/catalog/files/dstu%2031010.pdf>.

29. Allen G., Derr. R., «Threat assessment and risk analysis an applied approach». Elsevier Inc. 2016. ISBN: 978-0-12-802224-5.

30. ДСТУ ISO 9001:2018. Системи управління якістю. Вимоги (ISO 9001:2015, IDT; EN ISO 9001:2015, IDT;). Київ: Національний стандарт України, 2018.

31. ДСТУ ISO 31000:2018. Менеджмент ризиків. Принципи та настанови. (ISO 31000:2018, IDT). Geneva: International Organization for Standardization, 2018.

32. Enterprise Risk Management Committee. Casualty Actuarial Society. «Overview of enterprise risk management». 2003.

33. ICH harmonised tripartite guideline. ICH Q9: Quality risk management 9 November 2005 IFPMA; ICH harmonised Q8/9/10 Training material, November 2010, ICH-webpage publishing; ICH harmonised points to consider for ICH Q8/Q9/Q10 implementation, 6 December 2011 (FIP, AM and IFPMA). Access mode:
https://www.ema.europa.eu/en/documents/scientific-guideline/international-conference-harmonisation-technical-requirements-registration-pharmaceuticals-human-use-ich-guideline-q9-quality-risk-management-step-5-first-version_en.pdf.

34. WHO Expert Committee on Specifications for Pharmaceutical Preparations Forty-seventh report, Forty-seventh report, No. 981, 2013. Access mode:
<https://www.who.int/docs/default-source/medicines/norms-and-standards/guidelines/production/trs981-annex2-who-quality-risk-management.pdf>.

35. Lark J., Nikonov V. «ISO 31000 risk management a practical guide for SMEs». Geneva: International Organization for Standardization, 2015. ISBN 978926710645-8.

36. Crispin G. «The Essence of Risk Identification in Project Risk Management: An Overview». *International Journal of Science and Research (IJSR)*, 2020. DOI:10.21275/SR20215023033.

37. Бойко Т., Корчинська О.-С. «Оцінка ризиків процесів життєвого циклу продукції постачальників на основі результатів їх аудиту відповідно до стандарту VDA 6.3». *Міжвідомчий науково-технічний збірник «Вимірювальна техніка та*

метрологія», № 78, с. 93–100. 2017. Access mode: <https://science.lpnu.ua/uk/istcmtm/vsi-vypusky/volume-78-2017/ocinyuvannya-ryzykiv-procesiv-zhyttyevogo-tyklu-produkciyi>.

38. Yong B. «Marine structural design». UK: Elsevier Inc., 2003. 634 p. First Edition. ISBN: 0-08-043921-7.

39. Sosnovska O., Dedenko L. «Ризик-менеджмент як інструмент забезпечення стійкого функціонування підприємства в умовах невизначеності». *Європейський науковий журнал Економічних та Фінансових інновацій*, 1(3), с.70-79. 2019. DOI: <https://doi.org/10.32750/2019-0106>.

40. Корчинська О-С., Гут Т., «Система управління метрологічними ризиками якості продукції на етапі виготовлення», *Вимірювальна техніка та метрологія*, vol. 83, no. 1, pp. 29-34, 2022. Access mode: <https://doi.org/10.23939/istcmtm2022.01.029>.

41. ДСТУ ISO/TR 31004:2018 «Менеджмент ризиків. Настанова з впровадження ISO 31000» (ISO/TR 31004:2013, IDT). Access mode: <https://parsegroup.ir/wp-content/uploads/2023/10/ISO-31004-2013-min.pdf>.

42. Imtiaz M., Osman A. «The Essence of Enterprise Risk Management in Today's Business Enterprises in Developed and Developing Nations». *Enterprise Risk Management in developed and developing nations*. 2011. Access mode: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=1818862.

43. Петрова В.Ф., «Методичне забезпечення оцінки ризиків підприємства». *Соціальна економіка*, випуск 50, с. 148-153, 2015, №2.

44. Куртов А.І., Полікашин О.В., Потіхенський А.І., Александров В.М. «Експертні оцінки. Метод «Делфі» як технологія прийняття управлінських рішень». *Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил. Моделювання в економіці та управління проектами*, № 1 (50). с. 118-122. 2017.

45. James L. Worrell, Paul M. Di Gangi, Ashley A. Bush, «Exploring the use of the Delphi method in accounting information systems research», *International Journal of*

Accounting Information Systems, vol. 14 (3), 2013, p. 193-208, ISSN 1467-0895, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.accinf.2012.03.003>.

46. Шурда К. Е. «Методи якісного та кількісного аналізу ризиків». *Збалансоване природокористування. Економіка*, № 4. с. 64-72. 2020. DOI: <https://doi.org/10.33730/2310-4678.4.2020.226622>.

47. Matthew R., Hallowell J., Gambatese A. «Qualitative Research: Application of the Delphi Method to CEM Research». *Journal of Construction Engineering and Management*. Vol. 136, №. 1, January 1, 2010. pp. 99-107. DOI:10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000137.

48. Балджи М. Д. «Економічний ризик та методи його вимірювання». Навчальний посібник. Харків: Промарт, 300 с. 2015.

49. Bhattacharjee A. «Quality Risk Management: Basic Principle». Access mode: https://www.academia.edu/35364229/Quality_Risk_Management_Basic_Principle.

50. Yong Bai, Wei-Liang Jin, «Marine Structural Design (Second Edition), 2nd ed.», Butterworth-Heinemann, p. 977, 2015. Access mode: <https://doi.org/10.1016/C2013-0-13664-1>.

51. ДСТУ EN IEC 60812:2022. Аналіз видів відмов і наслідків (FMEA і FMESCA) (EN IEC 60812:2018, IDT; IEC 60812:2018, IDT). Київ: Національний стандарт України, 2022.

52. Sayed A. «Basics of Risk Management Compiled by Project Risk Team Member». 2005. Access mode: https://www.academia.edu/29700431/Basics_of_Risk_Management_article_guide.

53. Saif Ullah. «Creation and Implementation of Process FMEA with Focus on Risk Reduction for Packaging Process». *Culminating Projects in Mechanical and Manufacturing Engineering*. 2015. Access mode: https://repository.stcloudstate.edu/mme_etds/9.

54. US Department of Health and Human Services Food and Drug Administration Center for Drug Evaluation and Research (CDER)/Center for Biologics Evaluation and Research (CBER)/Center for Veterinary Medicine (CVM) guidance for industry –

process validation: general principles and practices. Silver Spring, MD, IFPMA, 2011. Access mode: <http://www.fda.gov/downloads/Drugs/GuidanceComplianceRegulatoryInformation/Guidances/UCM070336.pdf>.

55. Stamatis DH. «Failure mode and effect analysis. FMEA from theory to execution», 2nd ed. Milwaukee, American Society for Quality, Quality Press, 2003.

56. Press D. «Guidelines for failure modes and effects analysis (FMEA) for medical devices». Ontario, Canada, 2003.

57. McDermott R. «The basics of FMEA. Portland, OR, Productivity», 1996. IEC 61882 - Hazard operability analysis (HAZOP). Geneva, International Electrotechnical Commission, Headquarters (IEC 61882 Ed.1, b:2001).

58. «IEC 60812: Управління ризиками та аналіз режимів і наслідків відмов (FMEA)». Access mode: <https://visuresolutions.com/uk/blog/automotive/iec60812/>.

59. Dasgupta S. «FMEA: Effective Approach for Risk Management». 2022. Access mode: <https://www.linkedin.com/pulse/fmea-effective-approach-risk-management-shreya-dasgupta>.

60. Mortimer S., Mortimer D. «Quality and Risk Management in the IVF Laboratory». 2 ed. Cambridge University Press. 2015. ISBN 978-1-107-42128-8.

61. World Health Organization. «Application of hazard analysis and critical control point (HACCP) methodology to pharmaceuticals». In: Quality assurance of pharmaceuticals. A compendium of guidelines and related materials. Vol. 2, 2nd updated ed. 2011. Access mode: http://www.who.int/medicines/areas/quality_safety/quality_assurance/guidelines/en/index.html.

62. EC 61882. Hazard operability analysis (HAZOP). Geneva: International Electrotechnical Commission, Headquarters, 2001. Access mode: <https://www.iec.ch/>.

63. Ковтуненко Ю., Олексійчук А., Васалатій Т., «Фактори зовнішнього середовища, які впливають на вибір стратегії виробничого підприємства», *Інвестиції: практика та досвід*, vol. 11, pp. 55-58, 2016. Access mode: http://www.investplan.com.ua/pdf/11_2016/13.pdf

64. Khan, Firdouse, «Socio-Economic Factors Influencing Entrepreneurship Development: An Empirical Study Across the Small and Medium Enterprises of Chennai», *International Journal of Students Research in Technology & Management*, vol. 2, no. 3, pp. 89-94, State of Tamil Nadu, India, May 2014.

65. Метрологія. Терміни та визначення, ДСТУ 2681:1994, Київ, Україна, 1 січня, 1995. Access mode: https://dtp.lg.ua/Dokumentacija%20i%20oformlenie/DSTU_2681-94_metrologiya_terminy_i_opredeleniya.pdf.

66. Standard temperature and pressure (STP), NIST. Access mode: https://en.wikipedia.org/wiki/Standard_temperature_and_pressure.

67. Микийчук М., «Метрологічне забезпечення якості продукції на стадії виготовлення», Дис. докт. техн. наук, Національний університет «Львівська політехніка», Львів, с. 292, 2012.

68. Микийчук М., Столярчук П., Бубела Т., «Основні завдання та ознаки метрологічного забезпечення якості продукції», *Вимірювальна техніка та метрологія*, Volume 74, 2013.

69. Лейко С., «Поняття компетенція та компетентність: теоретичний аналіз», *Педагогічний процес: теорія і практика*, vol. 4, pp.128-135, 2013.

70. Baayen H., Vasishth S., Kliegl R., Bates D., «The cave of shadows: Addressing the human factor with generalized additive mixed models», *Journal of Memory and Language*, vol. 94, pp. 206–234, 2017.

71. Anuar N., Kim J., «A direct methodology to establish design requirements for human–system interface (HSI) of automatic systems in nuclear power plants», *Annals of Nuclear Energy*, vol. 63, pp. 326–338, 2014.

72. Stamatis, D. H. «Risk Management Using Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)». Wiley.2019.

73. Mannan, M. S. «Lees' Loss Prevention in the Process Industries: Hazard Identification, Assessment, and Control». Elsevier Science. 2012.

74. Szczyrba A., Ingaldi M. «Implementation of the fmea method as a support for the haccp system in the polish food industry». Vol. 32, Iss. 3, pp. 357-371 2024. DOI: 10.2478/mspe-2024-0034.

75. Артемук О.-С., Микийчук М. «Метод прогнозування метрологічних ризиків якості продукції». *Measuring and computing devices in technological processes*, (4), с. 179–186. 2024. DOI: <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-80-22>.

76. Faber M. H. «Risk Assessment in Engineering. Principles, System Representation & Risk Criteria». *Joint Committee on Structural Safety*. June, 2008. Access mode: https://www.jcss-lc.org/publications/raie/01_jcss_riskassessment.pdf.

77. SAE J1739:2000 Potential Failure Mode and Effects Analysis in Design (Design FMEA) and Potential Failure Mode and Effects Analysis in Manufacturing and Assembly Processes (Process FMEA), and Potential Failure Mode and Effects Analysis for Machinery.

78. AIAG Potential Failure Mode and Effects Analysis, Third Edition, 2001.

79. Бойко Т., Корчинська О.-С. «Вдосконалення експертних шкал в методі ФМЕСА з використанням Fuzzy Logic». Управління якістю в освіті та промисловості: досвід, проблеми та перспективи: тези доповідей III Міжнародної науково-практичної конференції пам'яті професора Петра Столярчука, 11–12 травня 2017 року, Львів. Національний університет «Львівська політехніка» [та інші]. 2017. 241 с.

80. «Prophet: Automatic Forecasting Procedure», Facebook. [Online]. Available: https://facebook.github.io/prophet/docs/quick_start.html.

81. «SARIMAX: Introduction», Statsmodels [Online]. Available: https://www.statsmodels.org/stable/examples/notebooks/generated/statespace_sarimax_stata.html.

82. «Forecaster Recursive», Skforecast [Online]. Available: <https://skforecast.org/0.14.0/api/forecasterrecursive>.

83. «Forecaster Direct», Skforecast [Online]. Available: <https://skforecast.org/0.14.0/api/forecasterdirect>.
84. «Scalable machine learning for time series forecasting», Mlforecast [Online]. Available: <https://nixtlaverse.nixtla.io/mlforecast/index.html>.
85. «Mean absolute error», Scikit-learn, Machine Learning in Python [Online]. Available: https://scikit-learn.org/1.5/modules/generated/sklearn.metrics.mean_absolute_error.html.
86. «Mean absolute percentage error», Scikit-learn, Machine Learning in Python [Online]. Available: https://scikit-learn.org/1.5/modules/generated/sklearn.metrics.mean_absolute_percentage_error.html.
87. «Root mean squared error», Scikit-learn, Machine Learning in Python [Online]. Available: https://scikit-learn.org/1.5/modules/generated/sklearn.metrics.root_mean_squared_error.html.
88. «R2 score», Scikit-learn, Machine Learning in Python [Online]. Available: https://scikit-learn.org/1.5/modules/generated/sklearn.metrics.r2_score.html.
89. React. "The library for web and native user interfaces". [Online]. Available: <https://react.dev/>.
90. React. JSX: Putting markup into JavaScript. [Online]. Available: <https://react.dev/learn/writing-markup-with-jsx>
91. Python official documentation. [Online]. Available: <https://www.python.org/>.
92. FastAPI official documentation. [Online]. Available: <https://fastapi.tiangolo.com/>.
93. Metrological risk assessment. GitHub. [Online]. Available: <https://github.com/SolomiiaArtemuk/metrological-risk-assessment>.
94. Dr. Kaoru Ishikawa. «Guide To Quality Control». Industrial Engineering and Technology. Asian Productivity Organization TOKYO. 1976. [Online]. Available: <https://www.scribd.com/document/737206220/Guide-to-Quality-Control>.

95. Metrological risk forecasting. GitHub. [Online]. Available:
<https://github.com/SolomiiaArtemuk/metrological-risk-forecasting>.
96. Pareto principle. [Online]. Available:
https://en.wikipedia.org/wiki/Pareto_principle.
97. Report Lab official documentation. [Online]. Available:
<https://www.reportlab.com/>.
98. OpenAI API official documentation. [Online]. Available:
<https://platform.openai.com/docs/models#gpt-4o-mini>.

ДОДАТКИ

Додаток А. Акт про апробацію результатів дисертаційної роботи

ЗАТВЕРДЖУЮ

Голова фермерського господарства
«ЕЛІТФРУКТ»
м. Горбодок, Львівська обл.
Мар'яна БАДЯК



АКТ

про апробацію результатів дисертаційної роботи

Артемук Ольги-Соломії Іванівни

«Метрологічні ризики забезпечення якості продукції на етапі виготовлення» представленої на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 152 «Метрологія та інформаційно-вимірвальна техніка»

Цим актом підтверджується апробація результатів наукових досліджень отриманих у дисертаційній роботі аспірантки Артемук Ольги-Соломії Іванівни «Метрологічні ризики забезпечення якості продукції на етапі виготовлення», зокрема: математична модель для оцінки комплексного показника метрологічного ризику, що дозволяє визначати його узагальнений рівень та приймати обґрунтовані управлінські рішення; математична модель ефективності мінімізації комплексного показника, що надає можливість отримати оптимальне співвідношення між витратами на мінімізації та рівнем його зменшення; метод прогнозування метрологічних ризиків на основі нейронної мережі, що забезпечує своєчасне виявлення потенційних небезпек та підвищує адаптивність до змін на виробництві; програмне забезпечення, що значно спрощує процес аналізу та оцінювання, скорочуючи час на опрацювання даних та підвищуючи доступність інструментів для спеціалістів.

Аспірантка Артемук О.-С.І. також надавала консультативну допомогу під час аналізу та оцінки факторів впливу на технологічний процес, а результат дисертаційного дослідження взято до уваги під час аналізу та планування заходів із управління метрологічними ризиками на виробництві.

Даний акт не є підставою для взаємних фінансових розрахунків.

Голова фермерського господарства
«ЕЛІТФРУКТ»



Мар'яна БАДЯК

Додаток Б. Акт впровадження в навчальний процес



ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з науково-педагогічної роботи

Національного університету

«Львівська політехніка»

Олег ДАВИДЧАК

“ 05 ” 03 2025р.

про впровадження в навчальний процес результатів дисертаційної роботи

Артемук Ольги-Соломії Іванівни

«Метрологічні ризики забезпечення якості продукції на етапі виготовлення»

представленої на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 152 –

Метрологія та інформаційно-вимірвальна техніка

Комісія в складі: голови науково-методичної ради Інституту комп'ютерних технологій, автоматички та метрології Національного університету «Львівська політехніка», д.т.н., проф. Байцара Р.І. та членів – завідувача кафедри «Інформаційно-вимірвальних технологій», д.т.н., проф. Бубели Т.З., професора кафедри «Інформаційно-вимірвальних технологій», лектора дисципліни «Метрологічне забезпечення виробництва», д.т.н., проф. Микийчука М.М. даним актом підтверджує, що проведені дисертантом наукові дослідження виконувалися нею на кафедрі «Інформаційно-вимірвальних технологій» Національного університету «Львівська політехніка». Основні положення та результати дисертаційної роботи впроваджені у навчальний процес кафедри «Інформаційно-вимірвальних технологій» Національного університету «Львівська політехніка» при вивченні дисципліни «Метрологічне забезпечення виробництва» для магістрів спеціальності 175 – Інформаційно-вимірвальні технології.

Зокрема, у навчальному процесі застосовуються такі результати дисертаційної роботи Артемук О-С.І., як:

- класифікація факторів впливу на технологічний процес виробництва та концепція управління метрологічними ризиками (дисципліни «Метрологічне забезпечення виробництва», тема 6 «Концептуальна модель системи метрологічного забезпечення виробництва»);
- метод прогнозування значення ризику із застосуванням нейронних мереж для аналізу часових рядів;
- математична модель визначення комплексного показника метрологічних ризиків та ефективності їх мінімізації (дисципліни «Метрологічне забезпечення виробництва», тема 9 «Метрологічні ризики якості продукції»).

Голова комісії:

голова науково-методичної ради ІКТА
д.т.н., проф.

Роман БАЙЦАР

Члени комісії:

зав. каф. ІВТ, д.т.н., проф.

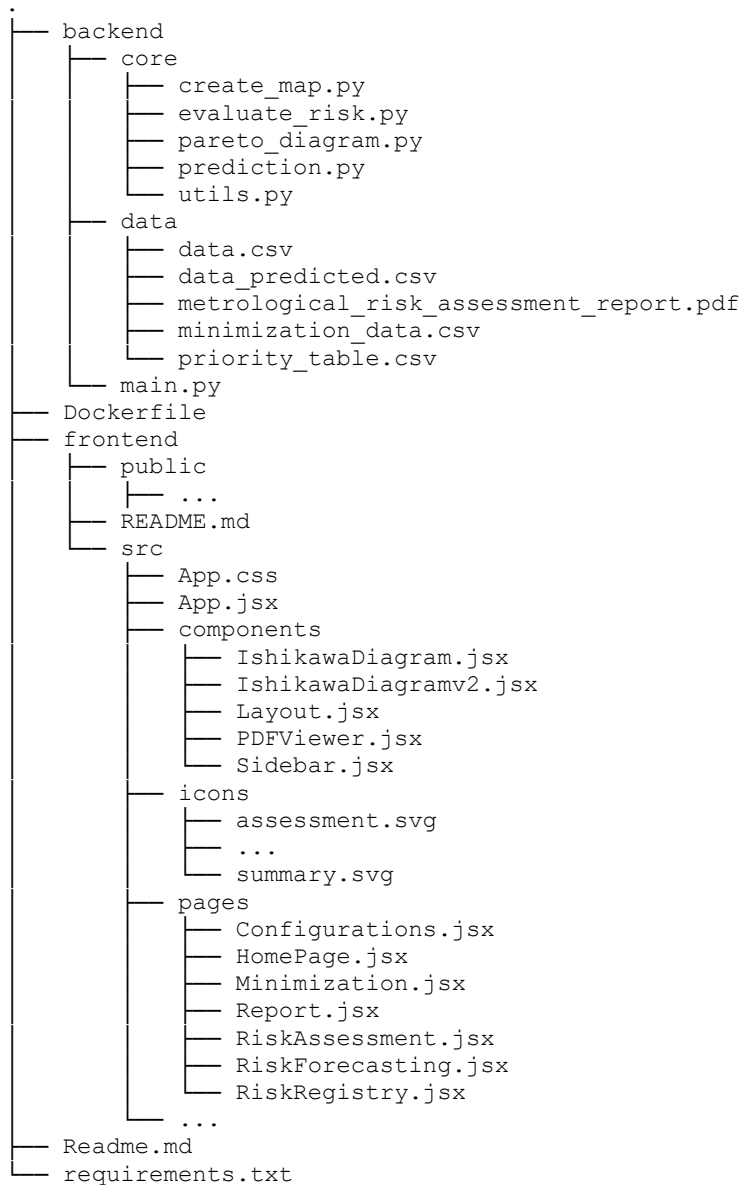
Тетяна БУБЕЛА

проф. каф. ІВТ, д.т.н., проф.

Микола МИКИЙЧУК

Додаток В. Програмний код для оцінювання метрологічних ризиків

Структура програми для оцінювання метрологічних ризиків



Клієнтська частина

Короткий опис: головний компонент, що містить структуру додатка та маршрутизацію

Вихідний код:

```

// frontend/src/App.jsx
import React from "react";
import { BrowserRouter as Router, Routes, Route } from "react-router-dom";
import HomePage from "../pages/HomePage";
import RiskRegistry from "../pages/RiskRegistry";
  
```

```

import RiskAssessment from "./pages/RiskAssessment";
import RiskForecasting from "./pages/RiskForecasting";
import Minimization from "./pages/Minimization";
import Report from "./pages/Report";
import Configurations from "./pages/Configurations";
import "./App.css"; // Підключаємо загальні стилі

function App() {
  return (
    <Router>
      <Routes>
        <Route path="/" element={<HomePage />} />
        <Route path="/risk-registry" element={<RiskRegistry />} />
        <Route path="/risk-assessment" element={<RiskAssessment />} />
        <Route path="/risk-forecasting" element={<RiskForecasting />} />
        <Route path="/risk-minimization" element={<Minimization />} />
        <Route path="/risk-report" element={<Report />}/>
        <Route path="/configurations" element={<Configurations />} />
      </Routes>
    </Router>
  );
}

export default App;

```

Короткий опис: вихідний код для побудови адаптивної діаграми Ішикави

Вихідний код:

```

import React, { useEffect, useRef } from "react";
import * as d3 from "d3";

const getRiskColor = (value) => {
  return value < 0.33 ? "green" : value < 0.66 ? "orange" : "red";
};

const Ishikawa = ({ data }) => {
  const svgRef = useRef();
  useEffect(() => {
    if (!data || data.length === 0) return;
    const svg = d3.select(svgRef.current);
    svg.selectAll("*").remove();
    const width = 1300;
    const height = 500;
    svg.attr("viewBox", `0 0 ${width} ${height}`);
    const spineY = height / 2;
    const spineXStart = 100;
    const spineXEnd = width - 100;
    svg.append("line")

```

```

    .attr("x1", spineXStart)
    .attr("y1", spineY)
    .attr("x2", spineXEnd)
    .attr("y2", spineY)
    .attr("stroke", "black")
    .attr("stroke-width", 3);
svg.append("rect")
.attr("x", spineXEnd)
.attr("y", spineY - 20)
.attr("width", 100)
.attr("height", 40)
.attr("fill", getRiskColor(data.complex_val))
.attr("rx", 5);
svg.append("text")
    .attr("x", spineXEnd + 50)
    .attr("y", spineY + 5)
    .attr("text-anchor", "middle")
    .attr("fill", "black")
    .attr("font-size", "14px")
    .attr("font-weight", "bold")
    .text(`Rk = ${Math.round(data.complex_val * 100).toFixed(2)}%`);
const riskGroups = data.groups
riskGroups.forEach((group, i) => {
    const isTop = i % 2 === 0;
    const multGroup = isTop ? i + 1 : i;
    const categoryXStart = spineXStart + multGroup * ((spineXEnd - spineXStart) /
(riskGroups.length));
    const categoryXEnd = categoryXStart - 80;
    const categoryYStart = spineY;
    const categoryYEnd = isTop ? spineY - 160 : spineY + 160 ;
    svg.append("line")
        .attr("x1", categoryXStart)
        .attr("y1", categoryYStart)
        .attr("x2", categoryXEnd)
        .attr("y2", categoryYEnd)
        .attr("stroke", "black")
        .attr("stroke-width", 2);
    const catBoxWidth = 200;
    const catBoxHeight = 30;
    const catBoxY = isTop ? categoryYEnd : categoryYEnd + catBoxHeight;
    svg.append("rect")
        .attr("x", categoryXEnd - catBoxWidth / 2)
        .attr("y", catBoxY - catBoxHeight)
        .attr("width", catBoxWidth)
        .attr("height", catBoxHeight)
        .attr("fill", getRiskColor(group.value))
        .attr("rx", 5);
    svg.append("text")
        .attr("x", categoryXEnd)

```

```

.attr("y", catBoxY - catBoxHeight / 2 + 4)
.attr("text-anchor", "middle")
.attr("font-size", "14px")
.attr("fill", "black")
.attr("font-weight", "bold")
.text(group.name);
const risks = group.risks
risks.forEach((risk, j) => {
  const isLeft = j % 2 === 0;
  const multRisk = Math.floor(j / 2) + 1;
  const riskElemNum = Math.ceil(risks.length / 2) + 1;
  const riskXStart = categoryXStart - multRisk * ((categoryXStart -
categoryXEnd) / riskElemNum);
  const riskXEnd = isLeft ? riskXStart - 40 : riskXStart + 40;
  const riskYStart = categoryYStart - multRisk * ((categoryYStart -
categoryYEnd) / riskElemNum);
  const riskYEnd = riskYStart;
  svg.append("line")
  .attr("x1", riskXStart)
  .attr("y1", riskYStart)
  .attr("x2", riskXEnd)
  .attr("y2", riskYEnd)
  .attr("stroke", "black")
  .attr("stroke-width", 2);
  const riskBoxWidth = 60;
  const riskBoxHeight = 30;
  const riskBoxX = isLeft ? riskXEnd - riskBoxWidth : riskXEnd;
  svg.append("rect")
  .attr("x", riskBoxX)
  .attr("y", riskYEnd - riskBoxHeight / 2)
  .attr("width", riskBoxWidth)
  .attr("height", riskBoxHeight)
  .attr("fill", getRiskColor(risk.value))
  .attr("rx", 5);
  svg.append("text")
  .attr("x", riskBoxX + riskBoxWidth/2)
  .attr("y", riskYEnd + 4)
  .attr("text-anchor", "middle")
  .attr("font-size", "14px")
  .attr("fill", "black")
  .attr("font-weight", "bold")
  .text(risk.id);
});
});
}, [data]);
return <svg ref={svgRef} width="100%" height="500px"></svg>;
};
export default Ishikawa;

```

Короткий опис: відображення згенерованого PDF звіту

Вихідний код:

```
import React from 'react';
import { Viewer, Worker } from '@react-pdf-viewer/core';
import { defaultLayoutPlugin } from '@react-pdf-viewer/default-layout';
import '@react-pdf-viewer/core/lib/styles/index.css';
import '@react-pdf-viewer/default-layout/lib/styles/index.css';
import { GlobalWorkerOptions } from "pdfjs-dist/build/pdf";
import pdfWorker from "pdfjs-dist/build/pdf.worker.min.js";
GlobalWorkerOptions.workerSrc = pdfWorker;
const PDFViewer = ({ fileUrl }) => {
  const defaultLayoutPluginInstance = defaultLayoutPlugin();
  return (
    <div style={{ height: '1080px', border: '1px solid rgba(0, 0, 0, 0.3)' }}>
      </* Load Worker with Correct Version */>
      <Worker workerUrl={`https://unpkg.com/pdfjs-dist@3.9.172/build/pdf.worker.min.js`}>
        <Viewer
          fileUrl={fileUrl}
          plugins={[defaultLayoutPluginInstance]}
          onDocumentLoadFailure={(error) => {
            console.error('PDF Load Error:', error.name, error.message);
            alert(`Error loading PDF: ${error.name} - ${error.message}`);
          }}
        />
      </Worker>
    </div>
  );
};
export default PDFViewer;
```

Короткий опис: сторінка для оцінювання ризиків на клієнтській частині

Вихідний код:

```
import IshikawaDiagram from "../components/IshikawaDiagramv2";
import { useEffect, useState } from "react";
import Layout from "../components/Layout";

const RiskAssessment = () => {
  const [riskData, setRiskData] = useState([]); // For IshikawaDiagram
  const [tableData, setTableData] = useState([]); // For Table
  const [tableColumns, setTableColumns] = useState([]); // Dynamic Table Columns

  // Fetch risk data for Ishikawa Diagram
  useEffect(() => {
    fetch("http://127.0.0.1:8000/risk_assesment") // Запит на бекенд
```



```

.then((res) => {
  if (!res.ok) {
    throw new Error('Network response was not ok');
  }
  return res.json();
})
.then((data) => setRiskData(data))
.catch((error) => {
  console.error('There was a problem with the fetch operation:', error);
});
}, []);

// Fetch table data for Priority Table
useEffect(() => {
  fetch("http://127.0.0.1:8000/priority_table")
    .then((res) => {
      if (!res.ok) throw new Error('Network response was not ok');
      return res.json();
    })
    .then((data) => {
      setTableData(data);
      // Dynamically extract table columns
      if (data.length > 0) {
        setTableColumns(Object.keys(data[0]));
      }
    })
    .catch((error) => console.error('Error fetching table data:', error));
}, []);

return (
  <Layout breadcrumb="Головна \ Оцінка ризику">
    <h2 style={{ marginBottom: "20px" }}>Діаграма Ішикави</h2>
    { /* Ishikawa Diagram */ }
    <IshikawaDiagram data={riskData} />

    <h2 style={{ marginBottom: "20px", textAlign: "left" }}>Таблиця пріорітетності
метрологічних ризиків</h2>
    <div className="p-4 mt-8 flex flex-col items-center justify-center">
      <div className="border rounded-lg shadow-md w-full">
        <table className="min-w-full border-collapse">
          <thead className="bg-gray-200">
            <tr>
              {tableColumns.map((col) => (
                <th key={col} className="p-2 border capitalize">
                  {col}
                </th>
              ))}
            </tr>
          </thead>

```

```

    <tbody>
      {tableData.map((row, idx) => (
        <tr key={idx} className="hover:bg-gray-100">
          {tableColumns.map((col) => (
            <td key={col} className="p-2 border">
              {row[col]}
            </td>
          ))}
        </tr>
      ))}
    </tbody>
  </table>
</div>
</div>

</Layout>
);

};

export default RiskAssessment;

```

Короткий опис: сторінка створення звіту на клієнтській частині

Вихідний код:

```

import { useState } from "react";
import Layout from "../components/Layout";
import { MdDownload } from "react-icons/md";
import { IoMdAddCircle } from "react-icons/io";
import PDFViewer from "../components/PDFViewer";
import { BsArrowsFullscreen } from "react-icons/bs";

const Report = () => {
  const [pdfUrl, setPdfUrl] = useState(null);
  const [loading, setLoading] = useState(false);
  const generateReport = async () => {
    setLoading(true);
    try {
      const response = await fetch("http://localhost:8000/generate_report", {
        method: "GET",
      });
    }
    if (!response.ok) {
      throw new Error("Failed to fetch PDF");
    }
    // Convert response to Blob and create a URL
    const blob = await response.blob();
    const fileURL = URL.createObjectURL(blob);
    // Set the PDF URL to render it

```

```

    setPdfUrl(fileURL);
  } catch (error) {
    console.error("Error generating report:", error);
    alert("Помилка створення звіту. Спробуйте пізніше.");
  } finally {
    setLoading(false);
  }
};

const downloadReport = () => {
  if (!pdfUrl) return;
  const link = document.createElement("a");
  link.href = pdfUrl;
  link.download = "generated_report.pdf";
  document.body.appendChild(link);
  link.click();
  document.body.removeChild(link);
};

return (
  <Layout breadcrumb="Головна \ \ Звіт">
    { /* Кнопки керування */ }
    <div style={{
      marginTop: "40px",
      marginBottom: "20px",
      marginLeft: "10px",
      display: "flex",
      justifyContent: "left"
    }}>
      <div>
        <button className="btn-primary" onClick={generateReport} disabled={loading}>
          <IoMdAddCircle size={20} />
          {loading ? "Генерація..." : "Сформувати звіт"}
        </button>
      </div>
      <button className="btn-primary" onClick={() => window.open(pdfUrl, "_blank")}
        disabled={!pdfUrl}>
        <BsArrowsFullscreen size={20} />
        На повний екран
      </button>
      <button className="btn-primary" onClick={downloadReport} disabled={!pdfUrl}>
        <MdDownload size={20} />
        Зберегти звіт
      </button>
    </div>
    <div>
      <h2 style={{ marginBottom: "10px" }}>Звіт оцінювання метрологічних
        ризиків</h2>
      {pdfUrl ? (
        <PDFViewer fileUrl={pdfUrl} />
      ) : (

```

```

        <p>Натисніть "Сформувати звіт", щоб згенерувати PDF.</p>
    })
</div>
</Layout>));
export default Report;

```

Серверна частина

Короткий опис:

Вихідний код:

```

# backend/main.py
import os
import csv
import pandas as pd
from fastapi import FastAPI, UploadFile, File, HTTPException
from fastapi.responses import JSONResponse, FileResponse
from fastapi.middleware.cors import CORSMiddleware
from typing import List
from pydantic import BaseModel
from core.evaluate_risk import risk_eval
from core.utils import get_graph, prepare_risk_report, get_minimization_graph,
prepare_pareto_graph
from core.prediction import make_predict

app = FastAPI()
origins = ["http://localhost:3000"]
app.add_middleware(
    CORSMiddleware,
    allow_origins=origins,
    allow_credentials=True,
    allow_methods=["*"],
    allow_headers=["*"],)

class CSVData(BaseModel):
    headers: List[str]
    rows: List[List[str]]

class GraphRequest(BaseModel):
    selectedAnalysisOption: object

class MinimizationGraphRequest(BaseModel):
    measures: object

class PredictRequest(BaseModel):
    historyPeriod: int
    forecastingPeriod: int

```

```

        selectedForecastingOption: object

@app.get("/risk_assesment")
async def risk_assesment():
    res = risk_eval()
    return res

@app.get('/priority_table')
async def priority_table():
    df = pd.read_csv('data/priority_table.csv')
    return df.to_dict(orient='records')

@app.post("/get_graph")
async def prepare_graph(request: GraphRequest):
    graph = get_graph(request.selectedAnalysisOption)
    return FileResponse(graph, media_type="image/png")

@app.post("/get_minimization_graph")
async def prepare_minimization_graph(request: MinimizationGraphRequest):
    measures = request.measures
    ids = []
    effect_precent = []
    effect_value = []
    for elem in measures:
        ids.append(elem["name"])
        effect_precent.append(elem["effectPercent"])
        effect_value.append(elem["effectValue"])
    minimization_graph = get_minimization_graph(ids, effect_precent, effect_value)
    pareto_graph = prepare_pareto_graph()
    return JsonResponse(content={"minimization_graph": minimization_graph,
"pareto_graph": pareto_graph})

@app.get('/get_risk_ids')
async def get_risk_ids():
    df = pd.read_csv('data/data.csv')
    risk_ids = [{"value": row[1]["Ідентифікатор ризику"], "label":
row[1]["Ідентифікатор ризику"]} for row in df.iterrows()]
    return risk_ids

@app.post("/prediction")
async def make_prediction(request: PredictRequest):
    history = request.historyPeriod
    forecast_period = request.forecastingPeriod
    ids = request.selectedForecastingOption
    prediction_table = make_predict(history=history,
forecast_period=forecast_period, ids=ids)
    return prediction_table

@app.post("/upload_csv")

```

```

async def upload_csv(file: UploadFile = File(...)):
    data_folder = "data"
    os.makedirs(data_folder, exist_ok=True)
    file_location = os.path.join(data_folder, 'data.csv')
    with open(file_location, "wb") as f:
        content = await file.read()
        f.write(content)
    return {"filename": file.filename, "detail": "Файл успішно завантажено."}

@app.get("/get_csv_data")
def get_csv_data(file_name: str):
    file_location = os.path.join("data", file_name)
    if not os.path.exists(file_location):
        return JSONResponse(status_code=404, content={"error": "Файл не знайдено."})
    rows = []
    with open(file_location, "r", encoding="utf-8") as csvfile:
        csv_reader = csv.reader(csvfile)
        headers = next(csv_reader, None)
        for row in csv_reader:
            rows.append(row)
    return {"headers": headers, "rows": rows}

@app.get("/generate_report")
async def generate_report():
    report = prepare_risk_report()
    print(f'Get report request')
    return FileResponse(path=report, media_type='application/pdf')

@app.post("/save_csv_data")
def save_csv_data(file_name: str, data: CSVData):
    file_location = os.path.join("data", file_name)
    os.makedirs("data", exist_ok=True)
    with open(file_location, "w", encoding="utf-8", newline="") as csvfile:
        writer = csv.writer(csvfile)
        writer.writerow(data.headers)
        for row in data.rows:
            writer.writerow(row)
    return {"detail": "Дані успішно збережено."}

@app.post("/create_empty_csv")
def create_empty_csv():
    file_location = os.path.join("data", "data.csv")
    os.makedirs("data", exist_ok=True)
    with open(file_location, "w", newline="", encoding="utf-8") as csvfile:
        writer = csv.writer(csvfile)
        writer.writerow(["Ідентифікатор ризику", "Група ризику", "Ризик",
"Значущість наслідків", "Ймовірність виникнення", "Ймовірність виявлення", "Ваговий коефіцієнт"])

```

```

    return {"detail": "Порожня таблиця створена."}

@app.get("/download_csv")
def download_csv(filename: str = "data.csv"):
    file_location = os.path.join("data", filename)
    if not os.path.exists(file_location):
        raise HTTPException(status_code=404, detail="Файл не знайдено")
    return FileResponse(
        file_location,
        media_type="text/csv",
        filename=filename)

```

Короткий опис: прогамна імплементація математичної моделі визначення комплексного показника метрологічного ризику

Вихідний код:

```

import pandas as pd

def read_data(data_path):
    return pd.read_csv(data_path)

def map_risk_values(df):
    map_table = {
        'S': {1: 1.73, 2: 4.31, 3: 5.81, 4: 6.88, 5: 7.71, 6: 8.38, 7: 8.96, 8: 9.45,
9: 9.89, 10: 10.00},
        'D': {1: 1.37, 2: 3.38, 3: 4.93, 4: 6.13, 5: 7.04, 6: 7.75, 7: 8.35, 8: 8.91,
9: 9.53, 10: 10.00},
        'O': {1: 1.37, 2: 3.38, 3: 4.93, 4: 6.13, 5: 7.04, 6: 7.75, 7: 8.35, 8: 8.91,
9: 9.53, 10: 10.00}}
    col_map = {'S': "Значущість наслідків", "D": "Ймовірність виявлення", "O":
"Ймовірність виникнення"}
    for col in ['S', 'D', 'O']:
        df_col = col_map[col]
        df[df_col] = df[df_col].map(map_table[col])
    return df

def risk_eval():
    # Read data
    original_df = read_data('data/data.csv')
    data_df = original_df.copy()
    data_df = map_risk_values(data_df)
    risk_group = data_df.groupby(['Група ризику'], sort=False)
    groups_list = []
    for group in risk_group:
        group_name = group[0][0]
        group_items = group[1]
        risk_value_list = []
        max_val = 10

```

```

max_risk_value = 0
for row in group_items.iterrows():
    row = row[1]
    S = row['Значущість наслідків'] / max_val
    O = row['Ймовірність виникнення'] / max_val
    D = row['Ймовірність виявлення'] / max_val
    risk_value = S * O * D
    risk_items = {
        "id": row["Ідентифікатор ризику"],
        "value": risk_value}
    risk_value_list.append(risk_items)
    if risk_value > max_risk_value:
        max_risk_value = risk_value
    risk_weight = 1 / len(risk_value_list)
    weighted_risk_sum = sum([risk_weight * risk['value'] for risk in
risk_value_list])
    # Calculate group values
    lambda_val = 0.75
    group_value = (1 - lambda_val) * weighted_risk_sum + lambda_val *
max_risk_value
    group_items = {
        "name": group_name,
        "value": group_value,
        "risks": risk_value_list
    }
    groups_list.append(group_items)
    complex_val = ((sum([group['value'] * len(group['risks']) for group in
groups_list]) / data_df.shape[0]))
    eval_res = {
        "complex_val": complex_val,
        "groups": groups_list
    }
}
original_df['Значення ризику'] = data_df['Значущість наслідків'] *
data_df['Ймовірність виникнення'] * data_df['Ймовірність виявлення'] / 1000 * 100
original_df = original_df.round({'Значення ризику': 2})
original_df = original_df.sort_values(by=['Значення ризику'], ascending=False)
original_df = original_df.drop('Значення ризику', axis=1)
original_df.to_csv('data/priority_table.csv', index=False)
return eval_res

```


Додаток Г. Програмний код для прогнозування ризиків

Короткий опис: функція для оцінки результатів прогнозування нейронної мережі

Вихідний код:

```
def estimate_res(true, predicted, model_name):
    mae = mean_absolute_error(true, predicted)
    mape = mean_absolute_percentage_error(true, predicted) * 100
    r2 = r2_score(true, predicted)
    rmse = root_mean_squared_error(true, predicted)
    metric_dict = {
        "mae": mae,
        "mape": mape,
        "R2": r2,
        "rmse": rmse
    }
    print_metric(metric_dict=metric_dict, model_name=model_name)
    return metric_dict
```

Короткий опис: функція для поділу даних на набори для навчання та перевірки

Вихідний код:

```
def split_dataframe(df, split_col):
    df[split_col] = pd.to_datetime(df[split_col])
    train_start = '2023-01-01'
    train_end = '2024-09-30'
    test_start = '2024-10-01'
    test_end = '2024-11-24'
    train_df = df[(df[split_col] >= train_start) & (df[split_col] <= train_end)]
    test_df = df[(df[split_col] >= test_start) & (df[split_col] <= test_end)]
    return train_df, test_df
```

Короткий опис: функція для навчання Facebook Prophet моделі

Вихідний код:

```
def train_fbprophet(df_train, periods):
    m = Prophet(
        growth='flat',
        weekly_seasonality=True,
        daily_seasonality=False,
        seasonality_prior_scale=10,
        seasonality_mode='multiplicative',
        n_changepoints=1000,
        changepoint_range=0.2,
        changepoint_prior_scale=2,
        interval_width=0.1)
    m.fit(df_train)
    future = m.make_future_dataframe(periods=periods)
    forecast = m.predict(future)
    return forecast
```

Короткий опис: функція для навчання Statsmodels SARIMAX моделі

Вихідний код:

```
def train_arma(endog, steps):
    m = SARIMAX(
        endog,
        order=(1,1,5),
        seasonal_order=(1,1,2,7),
        trend_offset=3.5,
        trend='c')
    res = m.fit(dispatch=0)
    forecast = res.get_forecast(steps=steps).predicted_mean
    prediction = res.get_prediction(steps=steps).predicted_mean
    return forecast, prediction
```

Короткий опис: функція для навчання Forecaster Recursive моделі

Вихідний код:

```
def forecaster_recursive(df, steps):
    regressor = RandomForestRegressor(n_estimators=400, max_depth=18,
    random_state=123)
    forecaster = ForecasterRecursive(
        regressor = regressor,
        lags= 6)
    forecaster.fit(y=df['y'])
    predictions = forecaster.predict(steps=steps)
    return predictions
```

Короткий опис: функція для навчання Forecaster Direct моделі

Вихідний код:

```
def forecaster_direct(df, steps):
    forecaster = ForecasterDirect(
        regressor=Ridge(alpha=0.2, random_state=123),
        steps=55,
        lags=3,
        transformer_y = StandardScaler())
    forecaster.fit(df['y'])
    predictions = forecaster.predict(steps=steps)
    return predictions
```

Короткий опис: функція для навчання LGBM Regressor моделі

Вихідний код:

```
def mlforecast_LGBMRegressor(df, steps):
    df['unique_id'] = 'id_00'
    df['static_0'] = 72
    models = [lgb.LGBMRegressor(random_state=0, verbosity=-1)]
    fcst = MLForecast(
```

```

        models=models,
        freq='D',
        lags=[7, 9], # 7,9
        date_features=['dayofweek'],
        target_transforms=[Differences([1]),)
    fcst.fit(df)
    predictions = fcst.predict(steps)
    return predictions

```

Короткий опис: функція для навчання Linear Regression моделі

Вихідний код:

```

def mlforecast_LinearRegression(df, steps):
    df['unique_id'] = 'id_00'
    df['static_0'] = 72
    models = [LinearRegression()]
    fcst = MLForecast(
        models=models,
        freq='D',
        lags=[7, 9],
        date_features=['dayofweek'],)
    fcst.fit(df)
    predictions = fcst.predict(steps)
    return predictions

```

Короткий опис: головна функція для навчання нейронної мережі

Вихідний код:

```

import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import matplotlib.patches as patches
import itertools
from sklearn.metrics import mean_absolute_error, mean_absolute_percentage_error,
r2_score, root_mean_squared_error
from sklearn.linear_model import Ridge, LinearRegression
from sklearn.ensemble import RandomForestRegressor
from sklearn.preprocessing import StandardScaler
from prophet import Prophet
from statsmodels.tsa.statespace.sarimax import SARIMAX
from skforecast.recursive import ForecasterRecursive
from skforecast.direct import ForecasterDirect
from skforecast.model_selection import grid_search_forecaster, TimeSeriesFold
import lightgbm as lgb
from mlforecast import MLForecast
from mlforecast.lag_transforms import ExpandingMean, RollingMean
from mlforecast.target_transforms import Differences

```

```

def main():
    risks_data_df = pd.read_csv('risks_data.csv')
    df = pd.DataFrame()
    df['y'] = risks_data_df['value']
    df['ds'] = risks_data_df['date']
    train_df, test_df = split_dataframe(df, split_col='ds')

    # Відображення даних
    fig, ax = plt.subplots(figsize=(9, 5))
    train_df.set_index('ds').plot(ax=ax, label='train')
    test_df.set_index('ds').plot(ax=ax, label='test')
    ax.legend(['Набір для навчання', 'Набір для перевірки'])
    ax.set_xlabel('Проміжок часу')
    ax.set_ylabel('Значення МР')
    plt.grid()
    plt.show()
    steps_size = test_df.shape[0]

    # FB Prophet train and prediction
    forecast_prophet = train_fbprophet(train_df, steps_size)
    forecast_prophet = forecast_prophet[-steps_size:]

    # ARIMA train and prediction
    forecast_arma, prediction = train_arma(train_df['y'], steps_size)
    df_arma = pd.DataFrame()
    df_arma['ds'] = test_df['ds']
    df_arma['yhat'] = forecast_arma.values

    # ForecasterRecursive
    recursive_prediction = forecaster_recursive(train_df, steps_size)
    df_recursive = pd.DataFrame()
    df_recursive['ds'] = test_df['ds']
    df_recursive['yhat'] = recursive_prediction.values

    # SKFORECASTER SARIMAX
    sarimax_skforecast_prediction = skforecast_sarimax(train_df, steps_size)
    df_sarimax_skforecast = pd.DataFrame()
    df_sarimax_skforecast['ds'] = test_df['ds']
    df_sarimax_skforecast['yhat'] = sarimax_skforecast_prediction.values

    # FORECASTER DIRECT
    direct_prediction = forecaster_direct(train_df, steps_size)
    df_direct = pd.DataFrame()
    df_direct['ds'] = test_df['ds']
    df_direct['yhat'] = direct_prediction.values

    # ML forecaster
    LinearRegression_ml = mlforecast_LinearRegression(train_df, steps_size)

```

```
LGBMRegressor_ml = mlforecast_LGBMRegressor(train_df, steps_size)

# Plot results
plot_prediction(test_df, forecast_prophet, "FBProphet")
plot_prediction(test_df, df_arima, "Statsmodels Sarimax")
plot_prediction(test_df, df_recursive, "Forecaster Recursive")
plot_prediction(test_df, df_direct, "Forecaster Direct")
plot_prediction(test_df, LGBMRegressor_ml, "LGBMRegressor")
plot_prediction(test_df, LinearRegression_ml, "LinearRegression")

# Metric estimate
estimate_res(test_df['y'], forecast_prophet['yhat'], "FBProphet")
estimate_res(test_df['y'], df_arima['yhat'], "Statsmodels Sarimax")
estimate_res(test_df['y'], df_recursive['yhat'], "Forecaster Recursive")
estimate_res(test_df['y'], df_direct['yhat'], "Forecaster Direct")
estimate_res(test_df['y'], LGBMRegressor_ml['LGBMRegressor'], "LGBMRegressor")
estimate_res(test_df['y'], LinearRegression_ml['LinearRegression'],
"LinearRegression")
```

Додаток Д. Реєстр метрологічних ризиків

Група ризику	Ідентифікатор ризику	Найменування ризикової події	Причини появи ризикової події	Можливі наслідки ризикової події на діяльність виробництва	Наявні заходи по попередженню/мінімізації ризику	Значущість наслідків (S)*	Ймовірність виникнення (O)*	Ймовірність виявлення (D)*	Значення Ризику (r)*	Допустимі значення		
										Значущість наслідків (S)	Ймовірність виникнення (O)	Ймовірність виявлення (D)
1	2	3	4	5	6	7	8	10	11	12	13	14
Соціально-економічні	MP1	Зміна стандартів якості через законодавчі акти	Введення нових національних чи міжнародних стандартів на вміст цукру, кислотності чи консервантів у соках	Невідповідність готової продукції новим вимогам, зупинка виробництва для перенаштування	Моніторинг законодавчих змін у сфері стандартизації; адаптація обладнання та процедур до нових стандартів	4	4	3	0.2079	6	6	5
Соціально-економічні	MP2	Економічні санкції на постачальників калібрувального обладнання	Обмеження імпорту через політичні рішення	Неможливість калібрування вимірювальних приладів, зниження точності вимірювань	Пошук альтернативних постачальників у нейтральних країнах; диверсифікація джерел постачання обладнання	5	5	3	0.2676	6	7	5
Соціально-економічні	MP3	Зростання цін на сертифікацію метрологічних засобів	Інфляція або підвищення тарифів акредитованих організацій	Затримка в сертифікації приладів, порушення графіку виробництва	Оптимізація витрат на сертифікацію; укладання довгострокових контрактів із фіксованою ціною	5	5	3	0.2676	7	7	5
Соціально-економічні	MP4	Недостатня кількість кваліфікованого персоналу	Відтік кадрів через еміграцію	Зниження якості метрологічних перевірок, помилки у вимірюваннях	Перерозподіл обов'язків серед наявного персоналу, залучення тимчасових фахівців	7	6	3	0.3423	7	7	5
Науково-інноваційні	MP5	Відставання від нових методів вимірювання вмісту пестицидів у сировині	Повільне впровадження інноваційних технологій аналізу	Використання застарілих методів, що не виявляють нові види забруднень	Закупівля сучасного обладнання для аналізу; участь у наукових конференціях та виставках	6	2	2	0.0957	6	4	4
Науково-інноваційні	MP6	Застарілі методи калібрування ваг для зважування сировини	Ігнорування нових стандартів калібрування	Неточність у визначенні маси сировини, порушення рецептури соків	Оновлення калібрувальних процедур; регулярне навчання персоналу новим стандартам	6	4	5	0.3616	7	5	7
Науково-інноваційні	MP7	Невідповідність вимірювальних приладів міжнародним трендам	Відсутність доступу до передових технологій через ізоляцію ринку	Зниження конкурентоспроможності через низку точність вимірювань	Співпраця з іноземними партнерами для обміну технологіями; інвестиції в R&D у сфері метрології	4	2	3	0.1146	5	6	6

Група ризику	Ідентифікатор ризику	Найменування ризикової події	Причини появи ризикової події	Можливі наслідки ризикової події на діяльність виробництва	Наявні заходи по попередженню/мінімізації ризику	Значущість наслідків (S)*	Ймовірність виникнення (O)*	Ймовірність виявлення (D)*	Значення Ризику (r)*	Допустимі значення		
										Значущість наслідків (S)	Ймовірність виникнення (O)	Ймовірність виявлення (D)
Природньо-екологічні	MP8	Вплив сезонності на якість фруктів, овочів та ягід	Зміна вмісту кислот і цукрів у сировині	Відхилення смакових характеристик продукції	Гнучке регулювання рецептури; аналіз показників кожної партії	6	5	4	0.3616	7	7	7
Природньо-екологічні	MP9	Забруднення природної сировини пестицидами та важкими металами	Неконтрольоване використання агрохімікатів чи промислові викиди	Виникнення шкідливих домішок у кінцевому продукті	Використання додаткових методів очищення сировини	3	2	2	0.0664	5	4	4
Природньо-екологічні	MP10	Коливання температури та вологості під час зберігання сировини	Нестабільні умови у складах через погодні зміни	Зміна хімічного складу фруктів, вплив на смакові характеристики соків	Використання клімат-контролю на складах; регулярний моніторинг умов зберігання	4	3	2	0.1146	6	5	5
Природньо-екологічні	MP11	Неточні результати аналізу ґрунту через наповнення підводних річок	Зміна рівня ґрунтових вод через природні фактори	Помилки у визначенні вмісту поживних речовин у ґрунтів, вплив на якість сировини	Повторні вимірювання з корекцією умов; моніторинг гідрологічних змін у регіоні	4	5	6	0.3754	5	5	6
Система МЗ	MP12	Порушення періодичності калібрування приладів для вимірювання кислотності соків	Недотримання графіку обслуговування	Неточність показників, відхилення від стандартів якості	Використання резервних приладів; автоматизація нагадувань про калібрування	5	3	5	0.2676	6	7	6
Система МЗ	MP13	Неправильне зберігання еталонних зразків	Порушення умов температури чи вологості	Зміна характеристик еталонів, помилки у вимірюваннях	Перевірка умов зберігання; встановлення клімат-контролю в сховищах	4	2	3	0.1146	5	4	5
Система МЗ	MP14	Відсутність актуалізації метрологічних процедур	Ігнорування оновлень нормативних документів	Невідповідність вимірювань сучасним вимогам	Проведення аудиту процедур; регулярне оновлення документації	4	3	5	0.2388	6	6	7

Група ризику	Ідентифікатор ризику	Найменування ризикової події	Причини появи ризикової події	Можливі наслідки ризикової події на діяльність виробництва	Наявні заходи по попередженню/мінімізації ризику	Значущість наслідків (S)*	Ймовірність виникнення (O)*	Ймовірність виявлення (D)*	Значення Ризику (r)*	Допустимі значення		
										Значущість наслідків (S)	Ймовірність виникнення (O)	Ймовірність виявлення (D)
Система МЗ	MP15	Відсутність документованої системи управління метрологічними ризиками	Низький рівень організації метрологічного контролю	Відсутність системного підходу до контролю якості	Розробка та впровадження внутрішніх регламентів; внутрішні перевірки системи управління якістю	5	3	4	0.2330	6	5	6
Система МЗ	MP16	Некоректне ведення журналу перевірок	Помилки в записах персоналу	Неможливість довести відповідність стандартам при перевірках	Перехід на електронний облік; навчання персоналу правильному документуванню	6	3	3	0.2037	7	4	5
Технічні	MP17	Зношення ваг для зважування сировини	Тривале використання без заміни	Неточність у визначенні кількості сировини, порушення пропорцій	Заміна зношеного обладнання; регулярне технічне обслуговування	6	4	5	0.3616	7	7	6
Технічні	MP18	Несправність сенсорів температури пастеризації	Збої в роботі через перенавантаження	Неправильна температури обробки, зниження якості соку	Використання дублюючих сенсорів; планові перевірки стану сенсорів	5	2	2	0.0881	6	5	5
Технічні	MP19	Використання застарілих рефрактометрів	Відсутність оновлення обладнання	Помилки у вимірюванні цукристості сировини	Закупівля сучасних приладів; моніторинг стану обладнання	5	3	5	0.2676	5	5	5
Технічні	MP20	Несправність фасувальних ліній	Збої в автоматизації	Неточність об'єму фасовки, порушення стандартів	Ремонт або заміна ліній; проведення профілактичних оглядів	5	2	2	0.0881	7	5	5
Технічні	MP21	Перебої в електропостачанні	Аварійні відключення	Збої в роботі вимірювальних систем, зупинка виробництва	Встановлення генераторів; перевірка електромереж	9	7	3	0.4071	8	7	6
Технічні	MP22	Неоптимізоване програмне забезпечення	Відсутність актуальних оновлень	Некоректне опрацювання результатів вимірювань, зниження точності	Моніторинг версій ПЗ; перевірка алгоритмів опрацювання даних	5	6	7	0.4989	7	7	7

Група ризику	Ідентифікатор ризику	Найменування ризикової події	Причини появи ризикової події	Можливі наслідки ризикової події на діяльність виробництва	Наявні заходи по попередженню/мінімізації ризику	Значущість наслідків (S)*	Ймовірність виникнення (O)*	Ймовірність виявлення (D)*	Значення Ризику (r)*	Допустимі значення		
										Значущість наслідків (S)	Ймовірність виникнення (O)	Ймовірність виявлення (D)
Людський фактор	MP23	Помилки операторів при зчитуванні показників рефрактометра	Низька кваліфікація або втома	Неправильне визначення цукристості, порушення рецептури	Перевірка даних дублюючим персоналом; регулярне навчання та атестація	4	3	2	0.1146	6	6	5
Людський фактор	MP24	Неправильне налаштування обладнання для аналізу сировини	Недостатній досвід персоналу	Помилки у вимірювання якості сировини	Автоматизація налаштувань; проведення інструктажів	6	3	4	0.2533	7	5	5
Людський фактор	MP25	Порушення правил експлуатації вимірювальних приладів	Недбалість або неухважність	Зниження точності вимірювань, поломка приладів	Посилення контролю за персоналом; розробка чітких інструкцій	5	2	2	0.0881	6	5	5
Людський фактор	MP26	Ігнорування сигналів про збої в системі	Відсутність реакції на аварійні повідомлення	Зупинка виробництва через поломку	Впровадження автоматичних сповіщень; тренінги з реагування на аварійні ситуації	3	4	3	0.1756	6	5	6
Людський фактор	MP27	Недотримання планів калібрування та метрологічних перевірок	Відсутність контролю за графіками	Використання неповіреного обладнання	Автоматизація планування метрологічних перевірок; внутрішні перевірки метрологічної служби	7	4	4	0.3367	6	6	5

Додаток Е. Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації

1. Артемук О.-С., Микийчук М., "Метод прогнозування метрологічних ризиків якості продукції", *Measuring and computing devices in technological processes*, vol. 4, pp. 179–186, 2024, doi: <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-80-22>. *Особисти внесок: дослідження нейронних мереж для прогнозування метрологічних ризиків. Підготовлено дані та вихідний код для навчання нейронних мереж. Здійснено оцінку точності прогнозування шести моделей.*

2. Корчинська О.-С., Микийчук М., "Джерела метрологічних ризиків як фактори впливу на технологічний процес", *«Вісник Черкаського державного технологічного університету»*, vol. 28, no. 1, pp. 61-71, 2023, doi: <https://doi.org/10.24025/2306-4412.1.2023.273708>. *Особистий внесок: здійснено класифікацію факторів впливу на технологічний процес.*

3. Korchynska O.-S., Hut T., "Metrological risks in management system of product quality at the manufacturing stage", *Міжвідомчий науково-технічний збірник «Вимірювальна техніка та метрологія»*, том 83, випуск 1, с. 29-34, 2022, doi: <https://doi.org/10.23939/istcmtm2022.01.029>. *Особистий внесок: розроблено математичну модель для оцінки комплексного показника метрологічного ризику.*

4. Бойко Т., Корчинська О.-С. «Оцінка ризиків процесів життєвого циклу продукції постачальників на основі результатів їх аудиту відповідно до стандарту VDA 6.3». *Міжвідомчий науково-технічний збірник «Вимірювальна техніка та метрологія»*, № 78, с. 93–100. 2017 DOI: <https://doi.org/10.23939/istcmtm2017.78.093>. *Особистий внесок: проаналізовано трактування терміну «ризик» та суміжних понять у різних нормативних документах.*

Праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

1. Artemuk O.-S., Mykyuchuk M. «Specifics of the metrological risk assessment system». The 6th International scientific and practical conference “Current trends in scientific research development”. Boston, USA, 2025. *Особистий внесок:*

проаналізовано особливості процесу управління ризиками на основі стандартів ISO 9001:2018, ISO 31000:2018 та ISO 31010:2013.

2. Artemuk O.-S., Mykyuchuk M. «Determining metrological risks minimization efficiency». The 6th International scientific and practical conference “Scientific research: modern challenges and future prospects”. Munich, Germany, 2025. *Особистий внесок: розроблено математичну модель для визначення ефективності мінімізації метрологічних ризиків враховуючи відносне зменшення комплексного показника ризику та співвідношення витрат на реалізацію заходів до можливих втрат, яких вдалося уникнути.*

3. Артемук О-С., Микийчук М. «Одиничні показники системи визначення комплексного показника розміру метрологічного ризику», VI МНПК "Управління якістю в освіті та промисловості: досвід, проблеми та перспективи", Львів, Україна, 2023. *Особистий внесок: розроблено граф-модель складових комплексного показника ризику.*

4. Korchynska O-S.I., Mykyuchuk M.M. «Identification of metrological risks sources», II International Scientific and Practical Conference «Current questions of modern science, Tallin, Estonia, (January 12-13, 2023). *Особистий внесок: здійснено дослідження та ідентифікацію метрологічних ризиків.*

5. Корчинська О-С., Микийчук М. «Оцінювання розміру метрологічного ризику на етапі виготовлення продукції», V Міжнародна науково-практична конференція управління якістю в освіті та промисловості: досвід, проблеми та перспективи, Львів, Україна, 2021. *Особистий внесок: розроблено схему показника розміру метрологічного ризику та розглянуто особливості системи управління метрологічними ризиками.*

6. Бойко Т., Корчинська О-С. «Ризик-орієнтований підхід в новому стандарті IATF 16949:2016». IV Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих вчених у царині метрології «Technical Using of Measurement-2018». Славське, Україна. 2018. *Особистий внесок: здійснено аналіз вимог IATF 16949:2016, запропоновано інструменти для зниження негативного впливу ризиків.*

7. Бойко Т., Корчинська О.-С. «Оцінювання ризиків процесів життєвого циклу продукції постачальників за результатами їх аудиту». Восьма міжнародна науково-технічна конференція пам'яті професора Ігоря Кісіля. Івано-Франківськ, Україна. 2017. *Особистий внесок: запропоновано спосіб для виявлення процесів, які можуть бути предметом підвищеної уваги для аудитора, досліджено проблематику неузгодженості тлумачення термінології щодо ризиків.*

8. Бойко Т., Корчинська О.-С. «Вдосконалення експертних шкал в методі FMESA з використанням Fuzzy Logic». Управління якістю в освіті та промисловості: досвід, проблеми та перспективи: тези доповідей III Міжнародної науково-практичної конференції пам'яті професора Петра Столярчука, 11–12 травня 2017 року, Львів. *Особистий внесок: вдосконалено шкали значущості наслідків, ймовірності виявлення та ймовірності виникнення метрологічних ризиків із використанням методу нечіткої логіки та нелінійних шкал.*

9. Boyko T., Kochan R., Korghynska O-S. «The risks of supplier processes according to the requirements of the process audit standard». SGEM International Multidisciplinary Scientific GeoConference EXPO Proceedings (Albena, Bulgaria, 2-8 July, 2018). Vol. 18. Issue 5.3. 2018. P. 943–949. <http://dx.doi.org/10.5593/sgem2018/5.3/s28.120>. *Особистий внесок: проведено аналіз стандарту VDA 6.3, представлено схему зв'язків між термінологією ризиків та отримання його оцінки.*