МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ЕКОНОМІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ КАФЕДРА
ЕКОНОМІЧНОЇ КІБЕРНЕТИКИ

Кваліфікаційна робота

магістра

на тему МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ УПРАВЛІННЯ ЗАПАСАМИ В ЕНЕРГОЗБУТОВИХ КОМПАНІЯХ

Виконав: студент II курсу, групи 8.0514-ек спеціальності 051«Економіка» освітньої програми «Економічна кібернетика»
Пшеничний Олександр Валерійович
Керівник проф. каф. ек. кіб., д.ф.-м.н., професор Козін І.В.
Рецензент зав. каф. ек. кіб., д.е.н, професор Максишко Н.К.

Запоріжжя

2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет економічний
Кафедра економічної кібернетики
Рівень вищої освіти магістр
Спеціальність 051 «Економіка»

Освітня програма «Економічна кібернетика»
Спеціалізація _____

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри _____
(підпис)
«____»_____2025 року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Пшеничний Олександр Валерійович

1. Тема роботи Моделювання процесів управління запасами в енергозбутових компаніях
керівник роботи – Козін Ігорь Вікторович, д.ф.-м.н., професор
затверджені наказом ЗНУ від «25» березня 2025 року №439–с
2. Строк подання студентом роботи: 8 грудня 2025 року
3. Вихідні дані до роботи: постановка завдання, наукова література за темою роботи, офіційні статистичні дані
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): аналіз класичних і сучасних моделей управління запасами; обґрунтування застосування метаевристичних методів (еволюційних алгоритмів) для оптимізації багатокритеріальних задач; дослідження специфіки діяльності, структури та факторів ризику; побудова гібридної моделі (генетичний алгоритм + метод Монте-Карло); проведення імітаційного експерименту та порівняльна оцінка ефективності розробленого підходу.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) рисунки, таблиці, формули, додатки, презентація

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1	к.е.н., доцент Макаренко О.І.	07.04.2025	24.05.2025
Розділ 2	к.е.н., доцент Макаренко О.І.	26.05.2025	06.07.2025
Розділ 3	к.е.н., доцент Макаренко О.І.	01.09.2025	22.11.2025

7. Дата видачі завдання _13.01.2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Формування мети, об'єкту, предмету та завдань кваліфікаційної роботи	27.01.2025 – 02.02.2025	Виконано
2.	Узгодження плану роботи, підготовка вступу	03.02.2025 – 09.02.2025	Виконано
3.	Формування основних гіпотез та огляд наукових джерел	10.02.2025 – 05.04.2025	Виконано
4.	Підготовка 1–го розділу кваліфікаційної роботи	07.04.2025 – 24.05.2025	Виконано
5.	Підготовка 2–го розділу кваліфікаційної роботи	26.05.2025 – 06.07.2025	Виконано
6.	Підготовка 3–го розділу кваліфікаційної роботи	01.09.2025 – 22.11.2025	Виконано
7.	Аналіз та інтерпретація отриманих результатів, оформлення висновків кваліфікаційної роботи, оформлення вступу та реферату	24.11.2025 – 29.11.2025	Виконано
8.	Нормоконтроль, перевірка на доброчесність, підготовка до захисту	01.12.2025 – 13.12.2025	Виконано

Студент _____ Пшеничний О.В.
(підпис)

Керівник роботи (проекту) _____ Козін І.В.
(підпис)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер _____ Лось В.О

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота магістра містить три розділи, 96 с., 6 рис., 10 табл., 21 формулу, 8 додатків, 52 джерела.

Об’єкт дослідження – процеси управління запасами в енергозбутових компаніях.

Предметом дослідження – математичні моделі та методи оптимізації управління запасами енергозбутових компаній.

Мета роботи – побудова математичних моделей та відповідних методів розв’язання задачі управління запасами в енергозбутових компаніях для підвищення економічної ефективності їх використання.

Методи дослідження – системного аналізу, математичного моделювання, стохастичної оптимізації (метод Монте-Карло, генетичний алгоритм), теорії ризиків (CVaR), імітаційного моделювання.

У роботі досліджено теоретичні основи, еволюцію та класичні підходи до управління запасами; проаналізовано систему філії енергозбутової компанії як складну кібернетичну систему з використанням декомпозиційного та морфологічного аналізу; на базі застосування методу Монте-Карло побудовано стохастичні сценарії попиту на МТР, що враховують знос обладнання, сезонність та зовнішні шокові фактори; шляхом інтеграції генетичного алгоритму та критерію умовної вартості під ризиком (CVaR) розроблено гібридну оптимізаційну модель; на основі вхідних даних компанії RTE було створено функціональний прототип системи підтримки прийняття рішень у середовищі Microsoft Access.

ЕНЕРГОЗБУТОВА КОМПАНІЯ, УПРАВЛІННЯ ЗАПАСАМИ, СТОХАСТИЧНА ОПТИМІЗАЦІЯ, ЕВОЛЮЦІЙНИЙ АЛГОРИТМ, МЕТОД МОНТЕ-КАРЛО, CVaR, СИСТЕМА ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ

SUMMARY

The master's qualification work contains three chapters, 96 pages, 6 figures, 10 tables, 22 formulas, 8 appendices, 52 sources.

The object of the research is inventory management processes in energy sales companies.

The subject of the research is mathematical models and methods for optimizing inventory management in energy sales companies.

The purpose of the work is to build mathematical models and develop corresponding methods for solving inventory management problems in energy sales companies to improve the economic efficiency of the management process.

Research methods include system analysis, mathematical modeling, stochastic optimization (Monte Carlo method, genetic algorithm), risk theory (CVaR), and simulation modeling.

The work investigates theoretical foundations, evolution, and classical approaches to inventory management; analyzes the system of an energy sales company branch as a complex cybernetic system using decompositional and morphological analysis. Based on the application of the Monte Carlo method, stochastic scenarios of MTR demand are constructed, taking into account equipment wear, seasonality, and external shock factors. Through the integration of the genetic algorithm and the Conditional Value at Risk (CVaR) criterion, a hybrid optimization model was developed, which allowed formulating an inventory management plan for critical equipment groups (transformers, power cables). Also, based on the developed model, a functional prototype of a decision support system was created in the Microsoft Access environment.

INVENTORY MANAGEMENT, ENERGY SALES COMPANY, STOCHASTIC OPTIMIZATION, GENETIC ALGORITHM, MONTE CARLO METHOD, CVaR, DECISION SUPPORT SYSTEM

ЗМІСТ

РЕФЕРАТ 4
SUMMARY 5
ЗМІСТ 6
ВСТУП 8
РОЗДІЛ 1 ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ УПРАВЛІННЯ ЗАПАСАМИ В ЕНЕРГОЗБУТОВИХ КОМПАНІЯХ 11
1.1 Поняття та класифікація запасів 11
1.2 Функції управління запасами в енергозбутових компаніях 13
1.3 Еволюція теорії управління запасами 15
1.4 Класичні підходи та моделі управління запасами 17
1.5 Періодичний та динамічний метод управління запасами та механізми їх профілактики 20
1.6 Метаевристичні методи: сутність, класифікація та еволюція їх розвитку 26
РОЗДІЛ 2 ЕКОНОСИСТЕМА ФІЛІЯ ЕНЕРГОЗБУТУ 34
2.1 Сфера діяльності філії енергозбутової компанії 34
2.2 Структура системи «Філія Енергозбуту» 38
2.3 Вид системи «Філія Енергозбуту» 41
2.4 Дані, інформація та знання системи «Філія Енергозбуту» 43
2.5 Ступінь невизначеності системи «Філія Енергозбуту» та фактори, що її обумовлюють 44
2.6 Методологія управління філією Енергозбуту 46
2.7 Декомпозиційний аналіз економічної системи «Філія Енергозбуту» 50
2.8 Морфологічний аналіз економічної системи «Філія Енергозбуту» 52
РОЗДІЛ 3 ПРОГНОЗУВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ УПРАВЛІННЯ ЗАПАСАМИ 56
3.1 Постановка задачі моделювання з урахуванням специфіки енергозбутових компаній 56
3.2 Побудова блокової архітектури системи управління запасами 57
3.3 Формалізація еволюційної моделі 59
3.4 Опис прототипу системи підтримки прийняття рішень на платформі Microsoft Access 74
ВИСНОВКИ 84

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ 86
ДОДАТОК А Структура розподілу станції Запоріжжя-2 на рівні РП..... 91
ДОДАТОК Б Структура розподілу станції Запоріжжя-2 на рівні ТП..... 92
ДОДАТОК В Фази існування системи Енергозбут 93
ДОДАТОК Г Прототип СППР на платформі Microsoft Access 94

ВСТУП

У сучасних умовах ефективне управління запасами є одним з важливих елементів успішної діяльності будь-якого підприємства. Особливо актуальним це питання стає для підприємств, що займаються постачанням енергетичних послуг, таких як Енергозбут, де від надійності постачання залежить життєдіяльність цілих регіонів. Для філії енергозбутової компанії, яка функціонує в умовах підвищених ризиків та невизначеності, оптимізація системи управління запасами матеріально-технічних ресурсів (МТР) набуває критичного значення.

Ефективна система управління запасами дозволяє досягати наступних ключових переваг:

а) ефективне управління дозволяє оптимізувати витрати на зберігання, закупівлю та утилізацію запасів, що безпосередньо впливає на зниження загальних витрат компанії;

б) правильне управління запасами гарантує наявність достатнього запасу необхідних матеріалів та обладнання для аварійно-відновлювальних робіт, що забезпечує стабільність енергопостачання регіону;

в) управління запасами дозволяє компанії своєчасно та якісно відновлювати пошкоджену інфраструктуру, мінімізуючи час перерв у постачанні енергії для кінцевих споживачів;

г) створення збалансованої системи управління забезпечує точний облік матеріальних цінностей, дозволяє уникнути як зайвих витрат на утримання наднормативних запасів, так і ризиків їхньої нестачі в критичний момент[1].

Проте досягнення цих цілей ускладнюється високим рівнем невизначеності, характерним для енергетичного сектора: стохастичністю попиту на МТР (обумовленою аварійністю та зношеністю мереж), коливаннями цін на матеріали, а також специфічними умовами воєнного стану, що вносять додаткові обмеження на логістичні ланцюги. Класичні

моделі управління запасами (на кшталт моделі EOQ) часто виявляються недостатньо гнучкими для адекватного врахування всіх цих факторів.

Це обумовлює необхідність пошуку нових підходів, серед яких перспективними є метаевристичні методи, зокрема еволюційні алгоритми (ЕА). Їхня здатність ефективно знаходити близькі до оптимальних рішення в умовах багатокритеріальності, нелінійності та наявності складних обмежень робить їх ідеальним інструментом для оптимізації системи управління запасами в таких складних умовах, як діяльність енергозбутової компанії.

Метою даної магістерської роботи є розробка та імітаційне тестування моделі управління запасами МТР для філій Енергозбуту з використанням еволюційних алгоритмів, спрямованої на досягнення вищезазначених переваг.

Основні завдання дослідження:

а) проаналізувати специфіку діяльності та виклики в управлінні запасами для енергозбутової компанії;

б) дослідити теоретичні основи та можливості застосування еволюційних алгоритмів для задач оптимізації управління запасами;

в) розробити економіко-математичну модель, що формалізує процес управління запасами МТР з цільовою функцією мінімізації сукупних витрат за умови дотримання високого рівня оперативної готовності;

г) реалізувати модель у програмному середовищі Microsoft Access та провести серію експериментів для оцінки її ефективності порівняно з традиційними підходами;

д) сформулювати практичні рекомендації щодо впровадження розробленої моделі в діяльність.

Об'єктом дослідження є система управління запасами матеріально-технічних ресурсів філії енергозбутової компанії

Предметом дослідження є методи та моделі оптимізації системи управління запасами на основі еволюційних алгоритмів.

Наукова новизна та практична значущість кваліфікаційної роботи полягає у розробці та апробації гібридної ризик-орієнтованої моделі

управління запасами на основі інтеграції генетичного алгоритму, методу Монте-Карло та критерію CVaR для енергозбутових компаній, що дозволяє оптимізувати сукупні логістичні витрати при гарантованому дотриманні високого рівня надійності енергопостачання. Впровадження розробленої моделі в формі прототипу системи підтримки прийняття рішень у середовищі Microsoft Access дозволяє ухвалювати обґрунтованіші рішення щодо обсягів запасів порівняно з класичними підходами (такими як детермінована модель EOQ Уілсона або періодична (s, S)-система) та ефективно управляти ризиками в умовах високої невизначеності, зумовленої зносом інфраструктури, сезонністю та наслідками воєнного стану. Оцінка ефективності цього підходу здійснюється за допомогою порівняння ключових показників – очікуваних сукупних витрат (ETC), рівня страхового запасу, тривалості критичного дефіциту та умовного значення під ризиком (CVaR), – що дає змогу науково обґрунтувати доцільність переходу від традиційних детермінованих моделей до адаптивної стохастичної оптимізації та кількісно оцінити її вплив на економічну ефективність і операційну стійкість підприємства.

РОЗДІЛ 1

ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ УПРАВЛІННЯ ЗАПАСАМИ В ЕНЕРГОЗБУТОВИХ КОМПАНІЯХ

1.1 Поняття та класифікація запасів

У сучасній економіці запаси є одним з найважливіших активів будь-якого підприємства, що забезпечує безперервність виробничих і операційних процесів. Запаси – це оборотні активи у матеріальній формі, які належать підприємству, забезпечують його функціонування та будуть використані протягом одного року або одного операційного циклу [2]. Для енергозбутових компаній, які відповідають за стабільне постачання електроенергії, управління запасами набуває особливого стратегічного значення, оскільки безпосередньо впливає на надійність інфраструктури, якість послуг і фінансові результати.

Управління запасами – це комплексний процес планування, організації, контролю та аналізу матеріальних ресурсів, спрямований на забезпечення безперервності діяльності підприємства при мінімізації сукупних витрат, пов'язаних із їх формуванням і утриманням [3]. У контексті енергетики цей процес охоплює управління як фізичними запасами (обладнання, матеріали, запчастини), так і "віртуальними" – балансами електроенергії в мережі.

Роль управління запасами в енергозбутових компаніях визначається низкою критичних факторів:

а) Забезпечення безперебійності постачання. Наявність аварійного резерву кабелю, трансформаторів, комутаційної апаратури дозволяє в найкоротші терміни ліквідувати наслідки аварій, мінімізуючи час перерв у електропостачанні споживачів;

б) Оптимізація фінансових потоків. Грамотне управління дозволяє зменшити обсяг "замороженого" капіталу в запасах, скоротити витрати на їх зберігання (оренда складів, страхування, охорона) та уникнути закупівель за завищеними цінами в умовах дефіциту;

в) Підвищення адаптивності до ризиків. В умовах воєнного стану, погодних аномалій та зносу мережевого господарства система управління запасами стає основним буфером, що поглинає зовнішні шоки, запобігаючи системним кризам;

г) Сприяння технічному розвитку. Стратегічне планування запасів для модернізації мереж дозволяє ефективно впроваджувати нові технології та виконувати капітальні ремонти без критичного впливу на поточну експлуатацію.

Таблиця 1.1 Класифікація виробничих запасів енергозбутової компанії

Рахунок (група)	Назва категорії	Призначення та ключові складові для енергозбуту
201	Сировина та матеріали	Основні – електроенергія, куплена для перепродажу (оптова генерація). Допоміжні – матеріали для експлуатації мереж (ізолятори, кріплення, хімікати).
203	Паливо	Паливо для резервних генераторів, котелень та службового транспорту (дизель, мазут, бензин).
205	Будівельні матеріали	Матеріали для капітального будівництва, реконструкції та ремонту мереж (опалубка, металовироби, бетон).
206	Запасні частини	Критичне обладнання та вузли для ремонту та відновлення мереж (трансформатори, вимикачі, кабельні муфти, релейний захист).
209	Інші матеріали	Виробничі відходи (металобрухт), браковані деталі, що підлягають утилізації, та інші господарські матеріали.

Джерело: побудовано автором на основі аналізу джерел

Таким чином, система управління запасами перетворюється з суто логістичної функції на стратегічний інструмент забезпечення енергетичної безпеки та економічної стійкості регіону.

1.2 Функції управління запасами в енергозбутових компаніях

Для енергозбутових компаній ефективне управління запасами становить стратегічну важливість, оскільки безпосередньо впливає на надійність енергопостачання регіону. Воно включає контроль за запасами палива для генераційних потужностей, запасними частинами для обладнання підстанцій, трансформаторів, кабельної продукції, електрозахисних засобів та інших матеріалів, необхідних для експлуатації та відновлення енергетичних мереж.

Ключові функції управління запасами відображають основні напрями діяльності підприємства у сфері матеріально-технічного забезпечення, оскільки саме вони визначають, наскільки ефективно організація здатна підтримувати безперервність своєї роботи та раціонально використовувати ресурси [5].

Перша функція – накопичення та розподіл – полягає у створенні таких запасів, які здатні згладжувати коливання між постачанням і споживанням ресурсів. У реальній практиці енергетичних компаній ця функція має особливе значення, адже попит на енергоносії або матеріали для ремонтних робіт змінюється сезонно, а поставки не завжди відбуваються ритмічно [6]. Завдяки накопиченим запасам підприємство може забезпечити стабільність процесів навіть у разі затримок із боку постачальників або непередбачуваних змін у графіках робіт. Наприклад, наявність резервних кабелів чи комплектів ізоляції дозволяє негайно розпочати ремонт після аварії на лінії електропередач, не чекаючи нових поставок. Крім того, створення буферних запасів сприяє синхронізації внутрішніх виробничих процесів, коли робота ремонтних чи монтажних бригад не залежить від точності постачання матеріалів.

Друга функція стосується оптимізації витрат через визначення оптимальних обсягів замовлення. Цей аспект тісно пов’язаний із логістичними розрахунками, адже правильне планування дозволяє мінімізувати сумарні витрати підприємства. Ефективне управління передбачає знаходження такого обсягу закупівлі, при якому знижки постачальників максимально

компенсують витрати на зберігання. Наприклад, якщо компанія купує велику партію кабельної продукції за нижчою ціною, вона може суттєво зменшити собівартість робіт, проте водночас «заморожує» частину оборотних коштів і потребує додаткових площ для зберігання. Таким чином, економічна вигода від великих партій повинна оцінюватися з урахуванням усіх супутніх витрат і ризиків, щоб уникнути нераціонального використання ресурсів.

Третя функція пов’язана із захистом від інфляції та коливань цін. У періоди економічної нестабільності підприємства нерідко використовують запаси як своєрідний фінансовий інструмент. Закупівля матеріалів або обладнання наперед може виявитися вигіднішою, ніж зберігання коштів, які швидко знецінюються через інфляційні процеси. Для енергетичних компаній це особливо актуально при закупівлі імпортних компонентів, вартість яких залежить від валютних коливань. Проте така стратегія не позбавлена ризиків, адже великі обсяги запасів вимагають додаткових витрат на зберігання, охорону, страхування та супроводжуються загрозою морального старіння продукції [7]. Тому управління запасами має базуватися на чітко визначеній політиці, що дозволяє балансувати між вигодою від завчасних закупівель і ризиками надлишкового нагромадження матеріалів.

Остання, але не менш важлива функція управління запасами – забезпечення якості та гнучкості. Вона передбачає проведення ретельного контролю на етапі приймання матеріалів, що гарантує відповідність стандартам і вимогам безпеки. Для енергетики це питання критичне, адже навіть незначні відхилення в якості ізоляційних матеріалів або електрозахисних засобів можуть призвести до аварій чи втрат електроенергії. Крім того, підтримання певного рівня страхового запасу забезпечує підприємству оперативну реакцію на позаштатні ситуації, зокрема аварії, затримки постачань або раптове збільшення попиту. Така гнучкість дозволяє компанії діяти швидко, не втрачаючи часу на додаткові закупівлі, і водночас підвищує її здатність підтримувати стабільність енергопостачання [8].

Таким чином, кожна з функцій управління запасами виконує власну роль у загальній системі ресурсного забезпечення підприємства. Разом вони утворюють комплексний механізм, що поєднує фінансову ефективність, виробничу безперервність і стратегічну стійкість організації, перетворюючи запаси з простої складської категорії на активний інструмент управління стабільністю та конкурентоспроможністю.

1.3 Еволюція теорії управління запасами

Управління запасами є критично важливим елементом діяльності підприємств, який безпосередньо впливає на їхню прибутковість, операційну ефективність та довгострокову конкурентоспроможність. Історія розвитку теорії управління запасами демонструє постійну еволюцію концептуальних підходів – від простих емпіричних правил до складних математичних моделей та комп'ютерних алгоритмів, що дозволяють враховувати все більшу кількість факторів реального бізнес-середовища.

Історичний розвиток концепцій управління запасами відображає поступове ускладнення підходів до планування матеріальних ресурсів у відповідь на зміну виробничих, економічних та технологічних умов. Якщо на початку XX століття запаси сприймалися радше як гарантія стабільності виробництва, то сьогодні вони є об’єктом складного аналітичного управління, в якому поєднуються математичні моделі, штучний інтелект і великі масиви даних [9].

Перший вагомий поштовх до формування системного підходу до управління запасами пов’язаний із діяльністю Генрі Форда, який у 1913 році започаткував епоху масового виробництва. Його виробнича система вимагала точного планування матеріальних потоків, що стимулювало розвиток перших механізмів раціонального управління запасами. У той час підприємства прагнули зменшити ризики збоїв у постачанні, що зумовило появу концепції максимізації запасів. Цей підхід базувався на прагненні накопичувати великі

обсяги матеріалів, аби забезпечити безперервність виробництва навіть за умов нестабільних поставок або непередбачуваного попиту. Така стратегія, однак, мала зворотний бік – значні витрати на зберігання, заморожування капіталу і ризик морального старіння матеріалів, що з часом зробило її економічно неефективною.

Поступово на зміну підходу накопичення прийшла концепція оптимізації запасів, що сформувалася завдяки розвитку наукового менеджменту і математичного моделювання. Ключовим інструментом цієї епохи стала модель економічного розміру замовлення (EOQ), розроблена Фордом В. Гаррісом [10]. Вона дозволяла визначати оптимальний обсяг закупівлі, який мінімізує сумарні витрати на замовлення і зберігання. У середині XX століття з’явилися її модифікації, що враховували стохастичний попит, змінні терміни поставок і точку повторного замовлення. Концепція оптимізації заклала основу для управління запасами як системного процесу, де прийняття рішень ґрунтується не на інтуїції, а на розрахунках.

Друга половина XX століття принесла якісно нове бачення ролі запасів у виробничому процесі. Японська філософія "бережливого виробництва" та система Just-in-Time перевернули уявлення про ефективність, висунувши тезу, що надлишки – це не актив, а ознака недосконалості процесів. Підприємства почали орієнтуватися на мінімізацію запасів, поставляючи матеріали точно в потрібний момент і в необхідній кількості. Ця концепція стала революційною, оскільки дозволила значно скоротити витрати і підвищити швидкість обороту ресурсів. Проте вона виявилася надто вразливою до порушень у ланцюгах постачання, що особливо проявилося під час глобальних криз, коли навіть незначні перебої могли паралізувати виробництво [11].

Сучасний етап розвитку концепцій управління запасами характеризується переходом до адаптивних і гібридних моделей, які поєднують елементи класичних підходів із використанням штучного інтелекту, метаевристичних алгоритмів та аналітики великих даних. На рубежі століть стало зрозуміло, що реальні логістичні системи надто складні для

традиційних формул і вимагають гнучких методів оптимізації. Метаевристики – генетичні алгоритми, метод рою частинок, імунні системи, симульоване відпалювання – дозволяють знаходити ефективні рішення навіть тоді, коли кількість змінних величезна, а система має безліч обмежень. Ці алгоритми імітують процеси еволюції, навчання або колективної поведінки, завдяки чому здатні адаптуватися до динамічних умов [13].

Для енергозбутових компаній впровадження адаптивного управління запасами є життєво необхідним. Попит на матеріали тут має стохастичний характер, оскільки аварійність електромереж важко передбачити. Крім того, існують обмеження щодо складських потужностей, бюджетів, термінів придатності матеріалів та мінімальних партій закупівель. У таких умовах традиційні моделі не дають стабільних результатів, а більш складні моделі не мають відомих алгоритмів пошуку оптимальних розв’язків. В цих випадках підходи засновані на використанні метаевристичних алгоритмів дозволяють досить ефективно знаходити баланс між витратами, швидкістю реагування та рівнем надійності постачань.

Отже, розвиток концепцій управління запасами пройшов шлях від накопичення до гнучкої адаптації, від простих розрахункових формул до інтелектуальних алгоритмів. Сучасне управління запасами вже не обмежується контролем складів – це складна система прийняття рішень, здатна навчатися, прогнозувати і самостійно реагувати на зміни середовища. Саме така трансформація робить можливим ефективне функціонування енергетичних підприємств у мінливому світі, де швидкість, точність і стійкість мають однакову вагу.

1.4 Класичні підходи та моделі управління запасами

Концепція максимізації, сформувався ще в XIX столітті, коли промислові підприємства прагнули накопичити якомога більші обсяги матеріалів і готової продукції. Така стратегія вважалася безпечною, адже

дефіцит товарів або сировини міг призвести до зупинки виробництва чи втрати ринку. Особливо актуальним цей підхід ставав у військовий час, коли стабільність постачання була критично важливою, а ризики перебоїв надто високими.

Згодом із розвитком технологій, транспортної інфраструктури та інформаційних систем набув поширення протилежний підхід – концепція мінімізації. Вона ґрунтується на принципі закупівель і виробництва лише тоді, коли виникає реальна потреба. Така логіка стала основою систем «точно в термін» і «бережливого виробництва», що дозволили суттєво зменшити обсяги запасів, скоротити витрати на їх зберігання та підвищити гнучкість бізнесу.

Модель Уілсона є класичним методом розрахунку оптимального розміру замовлення з обмеженнями, який з'явився на початку 20 століття. Цей метод досі використовується в управлінні запасами, враховуючи основні фактори, такі як вартість розміщення замовлення, витрати зберігання одиниці товарного запасу та потребу у запасі в розрахунковому періоді. Формула припускає, що замовлення припадає на склад, коли попередні запаси дорівнювали нулю.

Отже, формула Уілсона має вигляд [14]:

$$Qopt = \sqrt{\left(\frac{2*F*S}{C}\right)}. \qquad (1.1)$$

де Qопт – оптимальний розмір замовлення в натуральних чи грошових одиницях виміру;

C — витрати/витрати зберігання одиниці товарного запасу в розрахунковому періоді (у грошових одиницях виміру/одиницю запасу);

F – вартість розміщення/обробки одного замовлення (у грошових одиницях);

S – потреба (величина попиту) у запасі в розрахунковому періоді (у грошових чи натуральних одиницях).

Перелік припущень, необхідних для роботи цієї моделі:

а) розрахунок виконується лише одного виду продукції;

б) сталість попиту протягом розрахункового періоду;

в) середнє значення запасу дорівнює половині обсягу замовлення;

г) тимчасовий інтервал від постачання до постачання не змінюється; витрати на зберігання запасу розраховуються виходячи з його середнього обсягу;

д) витрати розміщення замовлення та вартість закупівлі постійні;

е) кожне замовлення – це окреме постачання, яке припадає одночасно (миттєве постачання) у той момент, коли запас нульовий;

ж) відсутність транспортного, сезонного, підготовчого та страхового запасу;

з) потужності складу необмежені і немає втрат від дефіциту продукції;

На практиці кожну умову виконати або дуже складно або неможливо, тому це буде особливо показовий варіант користі оптимізації управління запасами.

Класичні моделі управління запасами, зокрема відома модель економічного розміру замовлення (EOQ), довгий час вважалися базовими інструментами оптимізації у виробництві та торгівлі. Проте їхнє практичне застосування суттєво обмежується рядом спрощених припущень, що роблять ці моделі радше теоретичними орієнтирами, ніж універсальними рішеннями. Одним із головних таких припущень є сталість попиту. У класичному підході вважається, що підприємство чітко знає, скільки продукції споживатиметься у певний період, і цей обсяг не змінюється з часом. На практиці ж попит рідко буває детермінованим, особливо в умовах конкурентного ринку або сезонних коливань.

Іншим спрощенням є твердження, що закупівельні ціни не залежать від обсягу замовлення. Реальні постачальники часто пропонують системи знижок за великі партії, що одразу змінює структуру оптимального рішення і робить

класичну модель недостатньо гнучкою. Також у традиційній EOQ-моделі не враховуються обмеження щодо складських площ, маси чи бюджету, а дефіцит запасів узагалі розглядається як неприйнятний, без урахування можливості його часткової компенсації.

У сучасних умовах, особливо для підприємств на кшталт філії Енергозбуту, де доводиться працювати з багатономенклатурними запасами і непередбачуваним попитом, подібні спрощення є неприйнятними. Тут вступають у дію моделі з обмеженнями та стохастичні підходи, які дозволяють враховувати невизначеність у попиті, змінність цін, логістичні бар'єри та фінансові рамки. Завдання управління запасами в такому середовищі швидко перетворюється на складну багатовимірну задачу комбінаторної оптимізації, де кожен вид продукції, параметр часу чи ресурс додає новий вимір складності. Саме тому сучасна практика використовує методи математичного програмування, стохастичні симуляції та алгоритми машинного навчання, які здатні адаптуватися до реальних умов і приймати рішення в режимі невизначеності, виходячи за межі класичних, надто ідеалізованих моделей.

1.5 Періодичний та динамічний метод управління запасами та механізми їх профілактики

В умовах функціонування сучасних енергозбутових компаній, які характеризуються високим ступенем невизначеності попиту на матеріально-технічні ресурси (МТР) та необхідністю забезпечення безперебійності постачання електроенергії, вибір адекватної стратегії управління запасами стає критичним фактором економічної ефективності. Існує два фундаментальних підходи до контролю запасів: система з періодичною перевіркою (періодична) та система з безперервною перевіркою (динамічна). Кожен із цих методів має свою специфіку застосування, математичний апарат та вплив на логістичні витрати підприємства.

Система управління запасами з фіксованим інтервалом часу перевірки (періодична система, або Р-система) базується на контролі рівня запасів через суворо визначені, рівні проміжки часу Т (тиждень, декада, місяць).

У цій моделі момент замовлення є детермінованою величиною, зафіксованою у графіку роботи відділу постачання. Розмір замовлення (Q_i), на відміну від часу, є змінною величиною. Він розраховується таким чином, щоб поповнити запас до встановленого максимального бажаного рівня (S).

Алгоритм дії менеджера з управління запасами у Р-системі виглядає наступним чином: настає контрольний момент часу Т; визначається поточний залишок на складі (I_{fact}) та обсяг продукції в дорозі ($I_{transit}$), який вже замовлений, але ще не надійшов; розраховується розмір замовлення за формулою:

$$Q_{\text{i}} = S - \left(I_{fact} + I_{transit}\right). \quad (1.2)$$

де S – цільовий рівень запасу.

Цільовий рівень S розраховується таким чином, щоб покрити попит протягом інтервалу перевірки Т та часу виконання замовлення (Lead Time – L), а також врахувати страховий запас для компенсації коливань попиту протягом усього цього періоду (T+L).

$$S = \bar{D} \times (T + L) + SS_{per}\ . \quad (1.3)$$

де $\bar{D}$ – середньодобовий попит на певний вид МТР

T – інтервал між перевірками (днів)

L – час доставки від постачальника (днів)

SS_{per} – страховий запас для періодичної системи

Важливо зазначити, що страховий запас у Р-системі завжди повинен бути більшим, ніж у динамічній, оскільки система «сліпа» до коливань попиту в проміжку між перевірками. Стандартне відхилення попиту протягом періоду захисту (T+L) розраховується як:

$$\sigma_T + L = \sigma_D \times \sqrt{(T + L)}. \qquad (1.4)$$

де σ_D – середньоквадратичне відхилення добового попиту.

Для філії енергозбуту періодичний метод є доцільним для управління такими категоріями запасів: матеріали для планових ремонтів, дешеві витратні матеріали (Група С за АВС-аналізом), паливо для генераторів [15].

До переваг такого підходу включають зниження адміністративних витрат на обробку замовлень, можливість консолідації замовлень різних товарів в одну поставку, прогнозованість навантаження на складський персонал. Недоліками є високий ризик дефіциту всередині періоду, необхідність утримання значного страхового запасу, що заморожує обігові кошти, низька гнучкість реакції на форс-мажорні обставини.

Динамічний метод, або система з фіксованим розміром замовлення (Continuous Review System), базується на постійному моніторингу стану запасів. У цій системі час замовлення є змінною величиною, а розмір замовлення (Q) – фіксованою, оптимально розрахованою величиною.

Ключовим параметром цієї системи є точка перезамовлення (Reorder Point – ROP). Система автоматично генерує замовлення в той момент, коли рівень запасу (Inventory Position) опускається до значення ROP.

Умова ініціації замовлення: IP ≤ ROP, де IP (Inventory Position) = Запас у наявності + Запас у дорозі - Резерв під замовлення.

Оптимальний розмір замовлення (Q_{opt}) визначається за формулою Уілсона для мінімізації сукупних витрат на замовлення (F) та зберігання (C):

$$Q_{opt} = \sqrt{(2 \times F \times S/C)}. \quad (1.5)$$

де S – річна потреба в натуральних одиницях.

Точка перезамовлення (ROP) розраховується як очікуване споживання за час доставки плюс страховий запас:

$$ROP = (\bar{D} \times L) + SS_{dyn}. \quad (1.6)$$

Страховий запас (SS_dyn) у динамічній системі період ризику обмежується лише часом виконання замовлення (L):

$$SS_{dyn} = Z \times \sigma_D \times \sqrt{L}. \quad (1.7)$$

де Z – коефіцієнт надійності (значення нормального розподілу), що відповідає обраному рівню сервісу.

Для енергозбутової компанії Q-система є критично важливою для управління аварійним запасом та критичними компонентами (трансформатори, кабельна продукція великого перерізу, автоматичні вимикачі).

Переваги такого підходу включають мінімізацію рівня страхових запасів, високу надійність забезпечення, автоматичну адаптацію до зростання попиту. Недоліками є необхідність впровадження автоматизованих систем обліку для моніторингу в реальному часі, «хаотичність» поставок, втрата оптових знижок через дробові замовлення.

Вибір між періодичним та динамічним методами не є взаємовиключним. Ефективна система управління запасами філії Енергозбуту повинна бути гібридною.

Таблиця 1.2 Порівняльна характеристика методів управління запасами для енергозбутової компанії

Критерій	P-система (Періодичний перегляд)	Q-система (Безперервний перегляд)	Гібридний підхід
Основна мета	Мінімізація витрат на замовлення	Мінімізація ризику дефіциту	Оптимізація за критерієм "вартість-надійність"
Об'єкт застосування	Група С (масовані, дешеві МТР)	Група А (критичні МТР), Група В	Диференціація за АВС-аналізом
Рівень страхового запасу	Високий (захищає на період T+L)	Нижчий (захищає на період L)	Змінний, залежить від категорії та ризику
Гнучкість	Низька	Висока	Адаптивна
Вимоги до ІТ	Мінімальні	Високі (системи моніторингу в реальному часі)	Інтегровані платформи

Джерело: побудовано автором на основі аналізу джерел

Механізми профілактики в системі управління запасами.

Саме застосування математичних моделей поповнення запасів не може гарантувати ефективності системи, якщо вона позбавлена превентивних, тобто профілактичних, механізмів. У сфері управління запасами профілактика покликана одночасно вирішувати дві протилежні проблеми: запобігати як дефіциту, що призводить до зупинок і зривів операцій, так і надмірному накопиченню запасів, яке створює неліквіди та заморожує капітал.

У воєнних умовах класичні формули розрахунку страхового запасу втрачають свою надійність, оскільки вони передбачають стабільність

середовища, якої більше не існує. Сам страховий запас перестає бути фіксованою величиною й перетворюється на динамічний параметр, який постійно переглядається залежно від зовнішніх ризиків, перебоїв логістики, зміни попиту та швидкості відновлення постачання. Одним із ключових інструментів профілактики зривів є багаторівнева система постачальників: диверсифікація джерел постачання зменшує залежність від окремих вузьких ланок і підвищує стійкість усієї моделі забезпечення. Додаткової гнучкості надає ешелонування запасів, коли компанія створює ієрархічну структуру зберігання – від центральних складів до проміжних пунктів – що дозволяє швидше реагувати на зміни середовища та перерозподіляти ресурси [12].

Запобігання утворенню неліквідів також потребує системного підходу. Одним із базових індикаторів стає постійний моніторинг коефіцієнта оборотності, який дає змогу відстежувати, наскільки швидко запаси перетворюються на реалізовану продукцію. Його обчислюють як відношення собівартості реалізованих запасів до середнього їх залишку, що дозволяє своєчасно побачити тенденцію до накопичення надлишків. Ефективним методом профілактики є й цілеспрямоване скорочення номенклатури шляхом уніфікації обладнання та комплектувальних матеріалів: коли різні підрозділи використовують максимально сумісні елементи, потреба у великому різноманітті складських позицій зменшується природним чином. Далі важливу роль відіграє прогнозна аналітика. Перехід від аварійних ремонтів до обслуговування за станом дозволяє точніше планувати потребу в запасних частинах і уникати як раптових нестач, так і зайвого накопичення.

Окремим профілактичним інструментом стає інтеграція політики управління запасами з фінансовою політикою компанії. Коли процес закупівель узгоджено з бюджетними рамками, з’являється можливість запровадити механізм лімітування обсягів закупівель, відомий як Open-to-Buy. Завдяки цьому запаси не перевищують фінансово виправданого рівня, а структура витрат залишається контрольованою.Таким чином, для забезпечення стабільності енергопостачання в умовах невизначеності філія

енергозбутової компанії повинна застосовувати диференційований підхід. Динамічний метод (Q-система) є безальтернативним для управління аварійним запасом та критичним обладнанням, забезпечуючи швидку реакцію та високу надійність. Періодичний метод (P-система) дозволяє оптимізувати логістичні витрати для планових та маловартісних матеріалів. Ефективність обох систем значно підвищується за умови впровадження механізмів профілактики [16].

1.6 Метаевристичні методи: сутність, класифікація та еволюція їх розвитку

У сфері управління запасами в енергетичному секторі, особливо в середовищі високої невизначеності, оптимізаційні задачі здебільшого належать до класу NP-складних комбінаторних проблем. Традиційні точні методи – такі як цілочислове та динамічне програмування – теоретично забезпечують пошук глобального оптимуму, однак їхня обчислювальна складність зростає експоненційно зі збільшенням кількості змінних, періодів планування та обмежень. У реальних умовах, коли управлінські рішення мають прийматися швидко, застосування таких методів часто втрачає практичний сенс.

Метаевристики являють собою високорівневі алгоритмічні стратегії, що спрямовують пошук у великому та складному просторі рішень. Їхня концептуальна основа полягає у відмові від гарантії пошуку абсолютно оптимального результату на користь отримання високоякісного, близького до оптимального рішення в обмежені терміни. Такий підхід робить метаевристичні методи надзвичайно придатними для задач управління запасами енергетичних підприємств, які характеризуються нелінійністю, стохастичністю, наявністю численних обмежень та високою розмірністю.

Філософію метаевристичного підходу формують два ключові, взаємодоповнюючі принципи:

Інтенсифікація (Intensification) – глибокий локальний пошук у тих областях простору рішень, які продемонстрували найкращий потенціал. Це дозволяє вдосконалювати вже знайдені перспективні рішення та підвищувати їх якість.

Диверсифікація (Diversification) – систематичне дослідження нових ділянок простору рішень з метою уникнення локальних оптимумів та виявлення потенційних глобально кращих рішень.

Ефективність будь-якої метаевристики визначається балансом між цими двома аспектами: надмірна інтенсифікація веде до «застрягання» у локальних мінімумів, тоді як надмірна диверсифікація уповільнює збіжність алгоритму.

Метаевристики, як універсальні стратегії високого рівня для дослідження простору рішень, допускають систематичну класифікацію за низкою ознак. Таке категоризування допомагає краще зрозуміти їхню внутрішню логіку, принципи роботи та визначити найбільш ефективні сфери застосування для вирішення специфічних оптимізаційних задач, зокрема в контексті складних систем, таких як управління запасами енергокомпаній [17].

Однією з основних класифікацій є поділ за джерелом натхнення, яке лягло в основу їхнього алгоритмічного механізму. Цей підхід дозволяє простежити зв'язок між природними явищами та обчислювальними методами.

Таблиця 1.3 Класифікація метаевристик за джерелом натхнення

Категорія	Принцип дії	Типові представники
Еволюційні	Імітують процес біологічної еволюції (природний відбір, мутацію, схрещування).	Генетичні алгоритми (GA), Еволюційні стратегії (ES).
Фізичні	Засновані на моделюванні фізичних процесів і законів.	Імітація відпалу (SA – Simulated Annealing), Алгоритм гравітаційного пошуку (GSA).

Продовження таблиці 1.3

Категорія	Принцип дії	Типові представники
Роєві (Swarm Intelligence)	Моделюють колективну поведінку соціальних тварин та їхню здатність до самоорганізації.	Алгоритм рою частинок (PSO), Мурашиний алгоритм (ACO), Алгоритм зграї птахів (BFA).
Біологічні (інші)	Запозичують інші біологічні принципи, не пов'язані безпосередньо з еволюцією або роєвою поведінкою.	Алгоритм штучної імунної системи (AIS), Алгоритм бджолиної колонії (ABC).

Джерело: побудовано автором на основі аналізу джерел

Іншим важливим критерієм є характер пошуку в просторі рішень. За цим ознакою метаевристики поділяються на одиночні (траєкторні) та популяційні. Одиночні методи, такі як імітація відпалу (SA) або пошук із заборонами (Tabu Search), працюють з однією поточною точкою-рішенням, послідовно переміщуючи та покращуючи її, формуючи траєкторію пошуку. На противагу цьому, популяційні методи, до яких належать генетичні алгоритми (GA) та алгоритм рою частинок (PSO), ведуть пошук паралельно, використовуючи цілу популяцію кандидатних рішень. Ці рішення взаємодіють між собою, обмінюючись інформацією, що дозволяє одночасно досліджувати широкі області простору пошуку та ефективно уникати «застрягання» в локальних оптимумах [18].

Також метаевристики розрізняються за використанням пам'яті про попередні кроки пошуку. Методи з пам'яттю, класичним прикладом яких є пошук із заборонами (Tabu Search), спеціально зберігають інформацію про недавно відвідані рішення або здійснені переходи. Ця пам'ять використовується для керування майбутніми кроками, наприклад, для тимчасової заборони повернення до вже відвіданих станів, що сприяє більш різноманітному дослідженню простору. На відміну від них, методи без пам'яті, як стандартна імітація відпалу (SA), приймають рішення на кожному кроці

виключно на основі поточного стану та рандомізованих правил, не аналізуючи історію своїх переміщень.

Покоління метаевристик: від простоти до гібридизації.

Еволюція метаевристик як інструментів оптимізації може бути умовно поділена на чотири хвилі або покоління, кожне з яких знаменувало собою новий етап у підвищенні їх потужності та адаптивності до складних реальних завдань, таких як управління запасами в енергокомпаніях.

Перше покоління (1970-1980-ті роки) представлене класичними методами, заснованими на простих, але глибоких аналогіях. Імітація відпалу (Simulated Annealing, 1983), натхненна технологічним процесом обробки металів, запровадила ідею контрольованого випадкового пошуку. Алгоритм імітує процес охолодження, де «температура» параметр, що поступово знижується. На ранніх етапах (висока температура) система може з певною ймовірністю прийняти рішення гірше за поточне, що дозволяє вийти з області локального оптимуму.

Іншим фундаментальним методом цього періоду став пошук із заборонами (Tabu Search, 1986). Його ключовою інновацією було використання короткострокової пам'яті («списку заборон») для запобігання поверненню до нещодавно відвіданих рішень або циклічному повторенню, що суттєво покращує диверсифікацію пошуку.

Друге покоління (1990-2000-ні роки) характеризується розквітом біо-натхненних та роєвих алгоритмів, що запозичили принципи з живих систем. Генетичні алгоритми (Genetic Algorithms), засновані на теорії еволюції, стали одним із найпопулярніших інструментів. Вони оперують популяцією «хромосом» (кодованих рішень), які зазнають ітеративних змін через операції селекції, схрещування (кросинговер) та мутації, що дозволяє ефективно досліджувати великі простори. Алгоритм рою частинок (Particle Swarm Optimization, 1995) змоделював соціальну поведінку зграї, де кожна «частинка» (кандидатне рішення) корегує свою траєкторію руху, орієнтуючись на власний найкращий досвід та найкращий досвід усього рою.

Мурашиний алгоритм (Ant Colony Optimization, 1992) використовує механізм непрямої комунікації через «феромонні» сліди для пошуку оптимальних шляхів у графах, будучи особливо ефективним для задач маршрутизації.

Третє покоління (2000-2010-ні роки) принесло ще більш спеціалізовані біо-натхненні методи, що деталізували окремі природні явища. До них належать, наприклад, Алгоритм бджолиної колонії (ABC), що моделює поведінку збору нектару, Алгоритм кажана (Bat Algorithm), що використовує принцип ехолокації, та Алгоритм гравітаційного пошуку (GSA), заснований на законі всесвітнього тяжіння. Хоча ці алгоритми часто показують високу ефективність на стандартних тестових наборах, їхня практична перевага перед більш універсальними методами другого покоління для специфічних прикладних задач часто потребує індивідуального дослідження та налаштування.

Четверте покоління (2010-ті роки – дотепер) ознаменувалося переходом до гібридизації та адаптивності. Сучасний тренд полягає не в створенні нового ізольованого біологічного аналога, а в інтелектуальному поєднанні існуючих методів. Гібридні метаевристики інтегрують сильні сторони різних підходів, наприклад, поєднують швидку збіжність алгоритму рою частинок (PSO) з точністю локального пошуку методу відпалу (SA). Окремим напрямком стали гіпер-евристики – методи, які керують низкою простих евристик, динамічно вибираючи або комбінуючи їх у процесі роботи. Також розвиваються самоналаштовуючі алгоритми, де ключові параметри (розмір популяції, ймовірність мутації) динамічно змінюються на основі зворотного зв'язку про якість пошуку [19, 20, 21, 22, 23].

Порівняльний аналіз та обґрунтування вибору методу оптимізації.

Оцінка придатності різних метаевристичних підходів для конкретних класів задач є критичною для успішного моделювання. У контексті управління запасами енергокомпанії зі стохастичним попитом та складними обмеженнями, порівняльний аналіз дозволяє виявити найбільш збалансований

інструмент. Ключові порівняльні характеристики основних метаевристик наведено в таблиці 1.4.

Таблиця 1.4 – Порівняльні характеристики метаевристичних методів для задач управління запасами

Критерій	Генетичний алгоритм (ГА)	Алгоритм рою частинок (PSO)	Імітація відпалу (SA)	Мурашиний алгоритм (ACO)
Тип простору рішень	Дискретний, комбінаторний, мішаний	Переважно безперервний, мішаний	Дискретний, безперервний	Дискретний, графові структури
Сильна сторона	Ефективний глобальний пошук у великих просторах, паралелізм, природна робота з обмеженнями	Швидка збіжність на початкових етапах, простота реалізації	Можливість уникнення локальних оптимумів, проста структура	Ефективність для задач маршрутизації та вибору шляху
Слабка сторона	Високі обчислювальні витрати, чутливість до вибору параметрів	Схильність до передчасної збіжності в локальний оптимум	Повільна збіжність на фінальній стадії, критична залежність від графіку охолодження	Високі вимоги до пам'яті, повільна збіжність для великих задач
Застосування в УЗ	Оптимізація багатономенклатурних планів, ризик-орієнтована оптимізація (CVaR)	Калібрування параметрів моделей (EOQ, ROP)	Розв'язання окремих складних підзадач	Маршрутизація транспорту, оптимізація логістичних мереж

Джерело: побудовано автором на основі аналізу джерел

Проведений аналіз чітко демонструє, що для ключових задач даного дослідження генетичний алгоритм є найбільш збалансованим та придатним вибором.Це обґрунтовується низкою вирішальних переваг.

По-перше, ГА демонструє природню відповідність задачі, ефективно працюючи з дискретними та мішаними просторами рішень, що точно відповідає необхідності визначати цілочисельні обсяги замовлень для сотень позицій номенклатури. Його архітектура дозволяє елегантно інтегрувати складні системні обмеження через механізми штрафних функцій або спеціально розроблених генетичних операторів.

По-друге, популяційна природа ГА забезпечує потужний глобальний пошук, дозволяючи паралельно досліджувати різні області простору рішень, що значно знижує ризик «застрягання» в локальних оптимумах, який властивий, наприклад, алгоритму рою частинок. Ця властивість критично важлива для нелінійних задач з багатьма мінімумами.

По-третє, генетичний алгоритм володіє винятковою адаптивністю до стохастичності, що є визначальною вимогою в умовах невизначеності. Він ідеально поєднується з методом Монте-Карло для оцінки якості рішень: кожна хромосома, що кодує певну стратегію запасів, може бути оцінена шляхом імітації тисяч сценаріїв реалізації попиту та ризиків. На основі цих симуляцій цільова фітнес-функція може бути сформована з урахуванням умовного значення під ризиком (CVaR), роблячи весь алгоритм суттєво ризик-орієнтованим. Нарешті, ГА відрізняється гнучкістю та слугує відмінною базою для гібридизації. Знайдені в результаті еволюційного пошуку рішення можуть бути додатково точно налаштовані за допомогою методів локальної оптимізації, що підвищує ефективність в цілому.

Таким чином, на основі комплексного порівняння, гено-симуляційний алгоритм (ГА + Монте-Карло + CVaR) обирається як основний інструмент для побудови оптимізаційної моделі в практичній частині даної роботи. Такий гібридний підхід дозволить знайти робастні, стійкі до ризиків та економічно

ефективні стратегії управління запасами, що є головною метою дослідження в умовах глибокої невизначеності ринкового та операційного середовища.

РОЗДІЛ 2
ЕКОНОСИСТЕМА ФІЛІЯ ЕНЕРГОЗБУТУ

2.1 Сфера діяльності філії енергозбутової компанії

Філія енергозбутової компанії є ключовою ланкою в енергетичному ланцюжку створення вартості, що безпосередньо займається реалізацією електричної енергії кінцевим споживачам. Основна функція філії полягає в організації та забезпеченні надійного постачання електроенергії домогосподарствам, промисловим підприємствам, комерційним установам та об'єктам соціальної інфраструктури, розташованим на закріпленій за нею території.

Діяльність філії здійснюється на підставі ліцензії, виданої національним регулюючим органом у енергетичній галузі (Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг) [24, 25].

У межах своєї компетенції філія енергозбутової компанії виконує низку взаємопов’язаних функцій, що охоплюють як технічний, так і комерційний аспекти діяльності. Основою її роботи є комплексне забезпечення надійного енергопостачання регіону, де кожен напрям виконує власну роль у загальній системі управління. Комерційна діяльність філії зосереджена на роботі зі споживачами: укладенні договорів, прийомі платежів, виставленні рахунків, а також веденні точного обліку спожитої електроенергії на основі показників лічильників. Цей напрям забезпечує фінансову стабільність підприємства та прозорість взаєморозрахунків із клієнтами.

Технологічне забезпечення є другим ключовим блоком, що охоплює експлуатацію, обслуговування й ремонт мережевого господарства. Саме на цьому рівні філія відповідає за технічний стан високовольтних, середньовольтних і низьковольтних ліній електропередач, трансформаторних підстанцій, розподільчих пристроїв та іншого електротехнічного обладнання.

Від ефективності цих процесів безпосередньо залежить стабільність енергопостачання споживачів.

Не менш важливою є функція диспетчеризації та моніторингу, що забезпечує цілодобове спостереження за параметрами мережі, керування режимами споживання та оперативне реагування на аварійні ситуації. Завдяки сучасним системам моніторингу, зокрема SCADA, фахівці філії можуть відстежувати навантаження в реальному часі й швидко ухвалювати рішення для запобігання збоям.

Діяльність на енергетичному ринку становить ще одну важливу складову. Філія бере участь у закупівлі електроенергії на оптовому ринку, взаємодіє з генеруючими компаніями та Системним оператором, формує баланс між обсягами закупівлі та фактичним споживанням. Це складний процес, який вимагає постійного прогнозування попиту та аналізу динаміки споживання [26].

Клієнтський сервіс завершує цю систему, створюючи зв’язок між компанією та споживачем. Йдеться не лише про консультації з питань розрахунків чи обліку, а й про інформування клієнтів щодо безпечного користування електроенергією, підвищення енергоефективності та впровадження сучасних технологій споживання.

У контексті управління запасами важливо розмежовувати два принципово різні типи ресурсів. Перший – це так звані віртуальні запаси, якими в даному випадку є електроенергія. Її неможливо накопичувати у фізичному вигляді, тому управління «запасами» електроенергії фактично означає управління балансом між генерацією, закупівлею та споживанням. Це завдання реалізується через інформаційно-аналітичні системи, які прогнозують навантаження і дозволяють підтримувати стійкість енергосистеми в реальному часі.

Другий тип – матеріально-технічні запаси, або МТР, які й становлять основний об’єкт управління для філії. Саме вони визначають здатність компанії оперативно реагувати на технічні виклики, проводити планові

ремонти та ліквідовувати аварії. До таких запасів належать кабельна продукція різних перерізів, трансформатори, вимикачі, роз'єднувачі, розрядники, релейний захист та автоматика, ізолятори, опори, провідники, арматура й інші допоміжні матеріали. Особливе місце займає аварійний запас, який включає комплекти для швидкого відновлення електропостачання та мобільні трансформаторні підстанції.

Людські ресурси філії енергозбутової компанії формують активну ядрову ланку кібернетичної системи, адже саме вони забезпечують ухвалення рішень, здатність організації адаптуватися до змін зовнішнього середовища та безпосереднє виконання технологічних процесів. У сфері управління запасами персонал відіграє роль перетворювача пасивних матеріальних цінностей на дієвий інструмент підтримки безперервності та надійності енергопостачання, тож ефективність роботи із запасами невіддільна від компетентності та злагодженості фахівців.

Кадровий склад філії охоплює кілька функціональних груп, кожна з яких виконує важливу та унікальну роль у загальній структурі управління. У верхньому ешелоні перебуває адміністративно-управлінський персонал, що виступає суб'єктом управління й генерує керуючі впливи. Це керівники, які відповідають за стратегічні рішення, бюджетування, затвердження нормативів запасів і вибір постачальників, а також за те, наскільки ефективно компанія використовує свої фінансові ресурси. Їхня участь визначає рамки, у яких розгортається операційна діяльність інших підрозділів.

Поруч із ними функціонує інженерно-технічний персонал разом з оперативними бригадами, які є основними споживачами матеріально-технічних ресурсів і водночас носіями технічної відповідальності за стабільність електромережі. До їхньої компетенції входить робота диспетчерських служб, що здійснюють цілодобовий моніторинг і координацію дій, а також діяльність ремонтних та аварійно-відновлювальних бригад, на плечі яких лягає ліквідація пошкоджень і відновлення подачі електроенергії. Саме вони формують фактичний попит на матеріали,

контролюють якість отриманих ресурсів і забезпечують коректне списання використаних запасів. Від їхньої кваліфікації, технічної підготовки та здатності швидко діяти залежить тривалість відновлення енергопостачання, особливо в умовах, коли характер аварій стає непередбачуваним.

У структурі філії працює також комерційний та обслуговуючий персонал, який забезпечує взаємодію зі споживачами. Хоча їхній зв'язок із матеріальними запасами менш прямий, ефективність їхньої роботи визначає обсяги фінансових надходжень і тим самим впливає на платоспроможність підприємства при закупівлі нових партій матеріалів. Таким чином, навіть ті працівники, які фізично не торкаються запасів, опосередковано формують можливості для поповнення складів [27].

Людські ресурси в енергетичній галузі мають свою специфіку. Робота з обладнанням під високою напругою вимагає значного рівня кваліфікації, наявності відповідних допусків і регулярного проходження навчання з техніки безпеки. Це робить персонал складним у заміні та дорогим у підготовці, а тому управління людським потенціалом стає не менш важливою складовою, ніж управління обладнанням чи матеріальними запасами. Разом із високою професійністю люди приносять у систему й невизначеність – як у вигляді корисної адаптивності, що дозволяє знаходити рішення під час нестандартних аварійних ситуацій, так і у вигляді стохастичних помилок, які можуть проявлятися у неточностях обліку чи прогнозування. Зменшити негативний вплив таких помилок допомагає автоматизація та цифровізація процесів.

Варто враховувати й психофізіологічні обмеження. Під час воєнного стану, коли аварії можуть траплятися частіше, а умови роботи стають більш напруженими, навантаження на ремонтні бригади суттєво зростає. У таких обставинах стресостійкість, мотивація, командний дух і психологічна підтримка стають ключовими факторами надійності всієї системи. Філія використовує як соціально-психологічні методи підтримки персоналу, так і економічні стимули, що заохочують якісне та безаварійне виконання робіт.

Ефективне управління цими матеріальними ресурсами має стратегічне значення. Воно дозволяє не лише забезпечувати поточну експлуатацію мереж, а й бути готовим до позаштатних ситуацій, коли швидкість реакції визначає масштаб наслідків аварії. Для українських філій, яка працюють в умовах підвищеного навантаження на енергетичну інфраструктуру, система управління запасами є тим фундаментом, на якому тримається надійність усього енергозабезпечення регіону.

2.2 Структура системи «Філія Енергозбуту»

Структура запорізької філії енергозбутової компанії являє собою складну, багаторівневу систему управління, що побудована за функціонально-територіальним принципом. Така організаційна модель поєднує технологічні та економічні процеси в єдине ціле, забезпечуючи безперервність постачання електроенергії та фінансову стабільність підприємства. Її архітектура вибудувана навколо двох головних напрямів діяльності – розподільчо-технологічного та економічно-комерційного, які взаємодіють між собою, утворюючи збалансовану систему енергозбутового управління.

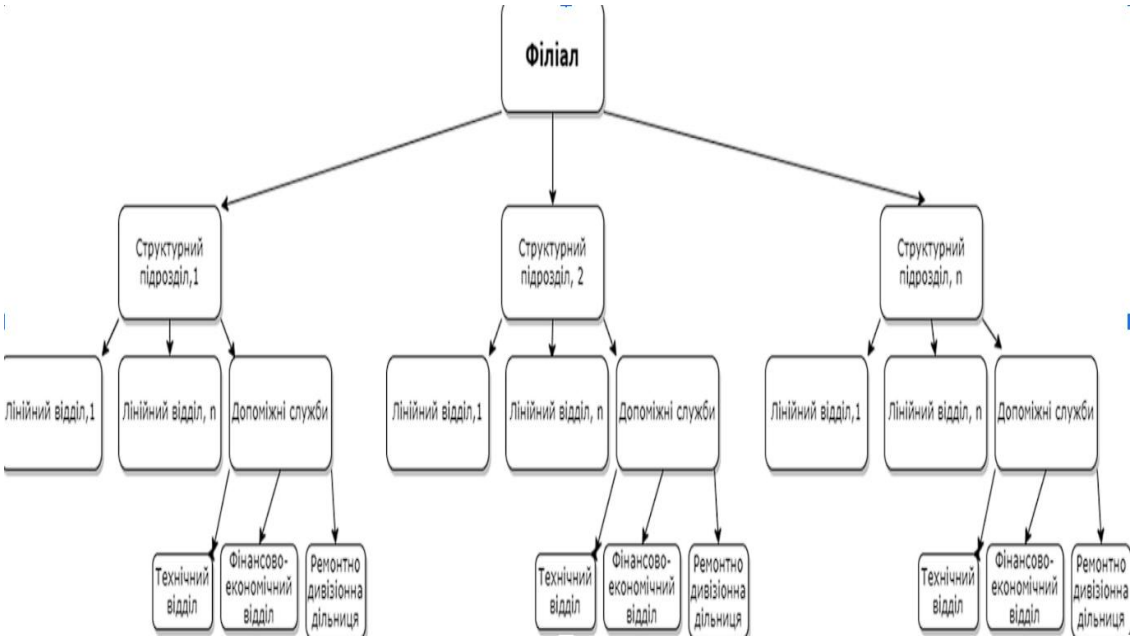


Рисунок 2.1 – Структура філії Енергозбуту.

Головна мета функціонування такої структури полягає у забезпеченні надійного, якісного та безпечного електропостачання споживачів Запорізької області через ефективну експлуатацію розподільчих мереж і належну організацію комерційної діяльності. Ці дві складові – технічна та економічна – формують основу стабільності як енергосистеми, так і фінансової діяльності філії [28].

Перший напрям, розподільчо-технологічний, охоплює весь комплекс завдань, пов’язаних із технічною експлуатацією електромережевої інфраструктури. Його сутність полягає в тому, щоб підтримувати мережі у справному стані, забезпечувати своєчасне обслуговування та ремонт обладнання, проводити профілактичні заходи й оперативно реагувати на аварійні ситуації. Тут функціонують диспетчерські служби, які здійснюють цілодобовий моніторинг мережевих параметрів, а також оперативні бригади, що виїжджають на ліквідацію пошкоджень. Цей напрям також включає технічне приєднання нових споживачів, реконструкцію підстанцій, модернізацію ліній електропередач і розвиток інфраструктури, що забезпечує зростання пропускної здатності мереж. Уся ця діяльність спрямована на збереження технологічної надійності, дотримання вимог енергетичної безпеки й стабільну якість електроенергії.

Другий напрям – економічно-комерційний – формує фінансовий фундамент роботи філії. Його завдання полягають у забезпеченні закупівлі електроенергії на оптовому ринку, подальшому продажі споживачам, веденні розрахунків і контролі платежів. Саме цей підрозділ відповідає за договірну роботу, збір даних із приладів обліку, виставлення рахунків, нарахування пені за прострочення, роботу з дебіторською заборгованістю та фінансово-бухгалтерське супроводження діяльності підприємства. Крім того, у межах комерційного напрямку здійснюється взаємодія з ринковими операторами, системним оператором і генеруючими компаніями, що забезпечує баланс між купленими та спожитими обсягами електроенергії.

Таким чином, розподільчо-технологічний напрям гарантує фізичну надійність електропостачання, тоді як економічно-комерційний забезпечує його фінансову сталість. Разом вони створюють інтегровану систему, у якій технічна ефективність і економічна доцільність взаємно підсилюють одна одну [29]. Саме така структура дозволяє філії оперативно реагувати на зміни в ринкових умовах, підтримувати високий рівень обслуговування споживачів і забезпечувати стабільне функціонування енергетичної інфраструктури регіону.

Таблиця 2.1 – Системні характеристики філії енергозбутової компанії

Класифікаційна ознака	Клас системи	Обґрунтування для енергозбутової компанії
Природа елементів	Фізична	Складається з матеріальних об'єктів: мережева інфраструктура (підстанції, лінії), обладнання, будівлі, матеріально-технічні ресурси.
Походження елементів	Штучна	Створена та функціонує в результаті цілеспрямованої діяльності людини для задоволення суспільних потреб у електроенергії.
Тривалість існування	Тимчасова	Філія створена на певний період для виконання конкретних функцій; її існування обмежене термінами ліцензії, економічною доцільністю.
Мінливість властивостей та поведінки	Стохастична	Поведінка системи має ймовірнісний характер через вплив випадкових факторів: коливання попиту, погодні умови, аварії, зміни в законодавстві.
Ступінь складності	Складна (велика)	Має значну кількість різнорідних взаємопов'язаних елементів (технічних, технологічних, соціальних, інформаційних), що утворюють ієрархічну структуру.
Ступінь стійкості	Нерівноважна	Система постійно розвивається та адаптується до змін зовнішнього середовища (ринкові умови, технологічні інновації, політична ситуація).

Продовження таблиці 2.1

Класифікаційна ознака	Клас системи	Обґрунтування для енергозбутової компанії
Реакція на збурювальні впливи	Активна	Система не лише реагує на зовнішні впливи, але й здійснює проактивні дії для запобігання негативних наслідків (планове обслуговування, стратегічне планування).
Характер поведінки	Керована	Функціонування системи забезпечується за рахунок наявності спеціального управлінського підсистеми, що формує цілі, плани та здійснює контроль.
Ступінь участі людей	Ергатична	У функціонуванні та управлінні системою беруть безпосередню участь люди (персонал), що формують ключові ланки управлінського контуру.
Ступінь зв'язку із зовнішнім середовищем	Відкрита	Система інтенсивно обмінюється з середовищем енергією, матеріями, інформацією, фінансами; знаходиться під постійним впливом зовнішніх факторів.

Джерело: побудовано автором на основі аналізу джерел

2.3 Вид системи «Філія Енергозбуту»

Система філії демонструє здатність до постійної взаємодії з навколишнім середовищем, оскільки працює в складних і мінливих умовах. Її зовнішнє середовище включає дії ринкових операторів, постачальників, споживачів, регуляторні впливи, а також погодні та соціально-економічні фактори. Особливе значення для Запорізького регіону мають ризики, пов’язані з воєнним станом, що створює додаткові стохастичні збурення. Водночас внутрішнє середовище представлено технічною, матеріальною та фінансовою підсистемами філії – станом мережевого обладнання, рівнем запасів, кваліфікацією персоналу та бюджетними обмеженнями. Взаємодія між цими двома середовищами є безперервною, а сама система залишається відкритою, що є однією з визначальних рис кібернетичних структур.

Другим важливим аспектом є наявність зворотних зв’язків, які забезпечують стабільність і саморегулювання. Негативні зворотні зв’язки, наприклад автоматичне формування замовлення на поповнення запасів кабелю при досягненні критичного рівня, допомагають підтримувати параметри системи у встановлених межах. Позитивні зворотні зв’язки, навпаки, сприяють розвитку та розширенню, наприклад, коли зростання попиту викликає збільшення складських або виробничих потужностей. Аналогічні механізми спостерігаються і в комерційній діяльності – система обліку платежів реагує на заборгованість споживача відповідними керуючими впливами, такими як обмеження подачі електроенергії чи надсилання повідомлень. Усе це створює замкнені інформаційні контури, характерні для кібернетичних систем [30].

Функціонування системи має виражену цілеспрямованість. Основна мета полягає в забезпеченні надійного, безперебійного електропостачання при оптимальному використанні ресурсів і мінімальних витратах. Усі управлінські рішення – від планування закупівель до оптимізації тарифної політики – спрямовані на досягнення цього цільового стану. Так, впровадження диференційованих тарифів або використання автоматизованих систем прогнозування навантаження є проявом свідомого управління, що підпорядковується єдиній стратегічній меті.

Ще однією важливою характеристикою є ймовірнісний характер досягнення мети. Результати управління не є детермінованими, оскільки система постійно стикається з випадковими факторами – коливанням попиту, погодними умовами, змінами цін, аварійними ситуаціями чи регуляторними обмеженнями. У таких умовах ефективність залежить від здатності системи швидко аналізувати інформацію, передбачати зміни та приймати коригуючі рішення. Саме тут особливого значення набувають сучасні моделі прогнозування та оптимізації, включно з метаевристичними алгоритмами, які підвищують гнучкість і стійкість управління.

Нарешті, філія демонструє здатність до адаптації та повернення до рівноваги. Після будь-яких збурень – аварій, перебоїв у поставках чи неочікуваних витрат – система відновлює свій стан завдяки чітко вибудованим управлінським контурам. Наприклад, після ліквідації аварії відбувається не лише оперативне відновлення мережі, а й автоматичне планування поповнення аварійних запасів, що повертає систему до початкового рівня готовності. Така властивість гомеостазу робить систему стійкою до зовнішніх впливів і забезпечує її довгострокову стабільність [31, 32].

Отже, енергозбутова компанія є кібернетичною системою. Вона взаємодіє із середовищем, має чіткі цілі, працює через систему зворотних зв’язків, функціонує в умовах стохастичності та здатна до адаптації. Такий підхід відкриває можливість застосування апарату теорії керування, системного аналізу та сучасних метаевристичних методів для підвищення ефективності управління запасами, стабільності роботи та надійності енергопостачання регіону.

2.4 Дані, інформація та знання системи «Філія Енергозбуту»

Функціонування філії енергозбуту як кібернетичної системи ґрунтується на безперервному циклі перетворення даних у інформацію та її перетворення в операційні знання. Ця триєдина структура є основою для прийняття усіх управлінських рішень.

Дані є первинними, необробленими сигналами та фактами, що реєструються в системі. Для філії енергозбуту ключовими видами даних є технологічні (миттєві значення напруги, струму, статуси вимикачів), комерційні (обсяги спожитої енергії, дані про оплату), ресурсні (залишки матеріально-технічних ресурсів на складах), операційні (час реагування на аварії, витрати матеріалів) та зовнішні (прогнози погоди, ринкові ціни).

Інформація представляє собою дані, які були оброблені, структуровані та інтерпретовані для надання їм конкретного змісту. Процес перетворення

даних в інформацію включає збір та фільтрацію з різних джерел (SCADA, АСКОЕ, складські програми), формалізацію та структурування у єдині системи обліку, сортування та класифікацію за ознаками, агрегацію та аналіз для отримання похідних показників, архівування для довгострокового зберігання, захист для забезпечення цілісності та конфіденційності, а також перетворення та візуалізацію у зручні форми (графіки, карти). Найпоширенішою структурою для роботи з інформацією є таблична форма реляційних баз даних [33].

Інформацію класифікують за джерелом та призначенням. Внутрішня інформація включає виробничі дані (технічні характеристики, схеми мереж), фінансово-економічні звіти, інформацію про споживачів, дані про використання ресурсів та систему управління. Зовнішня інформація охоплює законодавчі акти, рішення регуляторних органів, ринкові котировки та науково-технічні розробки.

Знання є вищим рівнем, який передбачає розуміння причинно-наслідкових зв'язків та вміння застосовувати інформацію для досягнення цілей. У філії енергозбуту знання формуються через аналіз та накопичений досвід. Прикладом трансформації є перехід від показників лічильників (дані) до зведеної таблиці споживання (інформація) і далі – до висновку про необхідність модернізації підстанції через два роки (знання). Таким чином, ефективність системи залежить від якості та швидкості перетворення даних в операційні знання, що безпосередньо впливає на якість управлінських рішень, зокрема в сфері управління запасами [34].

2.5 Ступінь невизначеності системи «Філія Енергозбуту» та фактори, що її обумовлюють

Філія енергозбуту функціонує в умовах значної невизначеності, що ускладнює процес прийняття рішень. Невизначеність виникає через недостатність інформації, її протиріччя або випадковість зовнішніх впливів.

Джерела та види невизначеності для філії включають технологічну невизначеність, обумовлену стохастичністю відмов обладнання; комерційну та ринкову невизначеність, пов'язану з коливаннями попиту, поведінкою споживачів та ринковою кон'юнктурою; зовнішню (середовищну) невизначеність, найбільш критичну, що включає погодні умови, чинники воєнного стану та регуляторні зміни; а також внутрішню організаційну невизначеність, обумовлену обмеженістю ресурсів та людським фактором [35].

Для ілюстрації проблеми вибору в умовах невизначеності розглянемо приклад стратегічного рішення про розподіл обмеженого бюджету інвестування. Нехай перед філією постає вибір між альтернативами (A_i): модернізація трансформаторів (A_1), реконструкція ліній електропередач (A_2), оновлення релейного захисту (A_3), впровадження інтелектуальних лічильників (A_4) та підвищення кваліфікації персоналу (A_5). Ефективність кожної інвестиції залежить від майбутнього стану зовнішнього середовища (S_j): стабільності (S_1), воєнних дій (S_2) або економічної кризи (S_3). Гіпотетична матриця оцінок ефективності представлена в таблиці 2.1.

Таблиця 2.2 – Матриця оцінок ефективності інвестиційних рішень

Альтернатива (A_i) \ Стан середовища (S_j)	S_1 (Стабільність)	S_2 (Воєнні дії)	S_3 (Економічна криза)
A_1: Модернізація трансформаторів	7	9	3
A_2: Реконструкція ЛЕП	6	8	4
A_3: Оновлення релейного захисту	8	6	7
A_4: Інтелектуальні лічильники	5	2	9
A_5: Підвищення кваліфікації	4	7	5

Джерело: побудовано автором на основі аналізу джерел

Аналіз матриці показує, що в умовах повної визначеності вибір очевидний: для S_1 – A_3 (8 балів), для S_2 – A_1 (9 балів), для S_3 – A_4 (9 балів). Однак в умовах невизначеності, коли ймовірності станів невідомі, вибір стає неочевидним. Якщо керівництво схильне до песимізму та використовує критерій Вальда (максимін), воно обере альтернативу A_3, яка забезпечує найкращий найгірший результат (мін. 6 балів). Якщо ж керівництво готове йти на ризик (критерій максимакса), воно може обрати A_1 або A_4, що дають максимальний ефект (9 балів) у певних сценаріях, але мають низькі оцінки в інших. Альтернатива A_3 демонструє найбільшу стійкість, показуючи хороші результати за всіма сценаріями, що робить її привабливою в умовах високої невизначеності [36, 37].

Висновок для управління запасами полягає в тому, що високий ступінь невизначеності, особливо зовнішньої, прямо визначає стохастичний характер попиту на матеріально-технічні ресурси. Неможливість точно прогнозувати час, місце та масштаб аварії вимагає переходу від детермінованих моделей управління запасами до стохастичних та ризик-орієнтованих. Це обґрунтовує необхідність створення динамічних страхових запасів, розрахованих не на "середній" попит, а на потенційно катастрофічні сценарії, що знаходить свій вираз у використанні таких показників, як умовне значення під ризиком (CVaR) при оптимізації рівнів запасів.

2.6 Методологія управління філією Енергозбуту

Управління такою складною соціотехнічною системою, як філія енергозбуту, вимагає комплексного підходу, що поєднує різноманітні методи впливу на персонал, технологічні процеси та економічні показники.

Адміністративно-організаційні методи управління у філії енергозбутової компанії базуються на ієрархічній системі повноважень і чітко встановлених правилах діяльності. Їхня суть полягає у прямому регулюванні поведінки працівників через накази, інструкції, розпорядження й нормативні

акти. Вони визначають формальну структуру організації, порядок взаємодії між підрозділами та дисциплінують персонал. На практиці це проявляється у виданні наказів про призначення, затвердженні внутрішнього трудового розпорядку, створенні положень про структурні підрозділи, а також у складанні графіків планово-запобіжних ремонтів. Особливе місце серед таких методів займають оперативно-диспетчерські команди, які мають директивний характер і забезпечують оперативне реагування на зміни в роботі мережі.

Правові методи управління формують нормативну основу функціонування філії. Вони забезпечують дотримання законодавчих вимог, галузевих стандартів і внутрішніх регламентів компанії. Завдяки цим методам діяльність працівників узгоджується з положеннями чинного права, що гарантує відповідальність і правову визначеність. У роботі філії це виражається через застосування дисциплінарної відповідальності, наприклад, доган чи звільнень за порушення техніки безпеки або трудової дисципліни. Правові методи також проявляються у дотриманні ліцензійних умов, вимог Закону України «Про електроенергетику» та правил технічної експлуатації. До цього ж блоку належать і нематеріальні форми заохочення, такі як подяки, грамоти чи присвоєння почесних звань, що слугують інструментом морального стимулювання в межах правового поля.

Економічні методи управління ґрунтуються на принципі матеріальної зацікавленості персоналу у досягненні високих результатів. Їхнє завдання полягає у створенні фінансових стимулів для підвищення ефективності праці, раціонального використання ресурсів і відповідального ставлення до витрат. У філії ці методи реалізуються через систему оплати праці, де оклад поєднується з преміальними виплатами за виконання планів продажу, зниження технологічних втрат або безаварійну експлуатацію мереж. Водночас економічні санкції, наприклад зменшення премії у разі перевитрати матеріалів чи порушення строків ремонтів, виконують функцію фінансового контролю. До економічних методів також належить система бюджетування, що включає

планування та контроль витрат, зокрема пов’язаних із формуванням і зберіганням запасів.

Соціально-психологічні методи управління доповнюють попередні, створюючи сприятливий мікроклімат у колективі та підвищуючи внутрішню мотивацію працівників. Вони спрямовані не стільки на формальне підпорядкування, скільки на розвиток командної єдності, ініціативності та професійного самовираження. У філії ці методи реалізуються через проведення корпоративних заходів, організацію навчальних програм і курсів підвищення кваліфікації, розвиток систем морального заохочення, а також формування командного духу серед аварійно-ремонтних бригад. Особливу роль відіграє довіра та взаємоповага між працівниками, що забезпечує злагодженість дій у кризових ситуаціях.

Суб’єктами управління виступають керівні органи та підрозділи, що формують, приймають і реалізують управлінські рішення. До них належать директор філії, головний інженер, керівник відділу продажів, а також функціональні служби – планово-економічний відділ, логістика, кадрова служба, бухгалтерія. Важливу роль у цій системі відіграють і зовнішні суб’єкти регулювання, зокрема Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг, яка визначає тарифну політику, ліцензійні вимоги та нормативи якості постачання. Об’єктами управління є елементи технічної, організаційної та виробничої структури – електромережева інфраструктура, що включає лінії електропередач, трансформаторні підстанції, розподільчі пункти, а також персонал, який забезпечує їхню експлуатацію. До об’єктів управління належать також технологічні процеси постачання електроенергії, управління матеріально-технічними запасами та обслуговування споживачів. Головною метою цієї системи є гарантування надійного, якісного та економічно ефективного постачання електричної енергії споживачам Запорізького регіону.

Система управління функціонує як цілеспрямований механізм, у якому поєднано прагнення до досягнення результату з урахуванням об’єктивних обмежень. Її ефективність оцінюється за трьома основними критеріями. Перший – це надійність, яка вимірюється мінімізацією частоти та тривалості перерв у електропостачанні, що оцінюється показниками SAIDI та SAIFI. Другий критерій – економічна ефективність, яка передбачає зниження сукупних витрат на закупівлю енергії, експлуатацію мереж і управління запасами. Третій – якість послуги, що охоплює стабільність параметрів напруги, дотримання стандартів швидкості підключення нових споживачів і рівня клієнтського сервісу. Водночас система діє в межах низки обмежень. До технологічних належать фізичні характеристики мережі, її пропускна здатність і технічні норми електротехніки. Ресурсні обмеження включають обсяг бюджету, кількість персоналу, місткість складів і наявність транспорту. Регуляторні фактори визначаються тарифною політикою, екологічними нормами, вимогами безпеки. Нарешті, ринкові обмеження пов’язані з демографічною структурою споживачів, рівнем розвитку промисловості та загальним економічним потенціалом регіону.

Процес управління у філії має циклічний і стратегічно адаптивний характер. Його перша фаза полягає у зростанні обсягів діяльності та підвищенні ефективності, коли зусилля спрямовуються на залучення нових споживачів, зменшення втрат електроенергії та підвищення продуктивності персоналу. Наступний етап – оптимізація процесів надання послуг, що досягається шляхом впровадження сучасних автоматизованих систем, таких як АСКОЕ для комерційного обліку електроенергії та ERP чи WMS для управління запасами. У цій площині особливе значення мають інтелектуальні методи прогнозування попиту, побудовані на основі еволюційних та інших метаевристичних алгоритмів, які дозволяють точно визначати оптимальний рівень матеріальних запасів і мінімізувати витрати. Завершальна стадія циклу – капіталізація та розвиток, коли отриманий економічний ефект інвестується у модернізацію мереж, розширення інфраструктури та вдосконалення

стандартів обслуговування. Таким чином, цикл управління замикається, створюючи основу для подальшого зростання та адаптації системи до нових викликів [38].

Отже, управління філією енергозбуту розглядається як динамічна кібернетична система, у якій класичні адміністративні та економічні методи поєднані з сучасними інструментами аналітики, автоматизації та оптимізації. Це дозволяє не лише підтримувати стабільність у складних умовах ринку, а й активно розвивати ефективність процесів, серед яких управління запасами матеріально-технічних ресурсів посідає ключове місце в структурі стратегічного управління.

2.7 Декомпозиційний аналіз економічної системи «Філія Енергозбуту»

Декомпозиційний аналіз економічної системи філії енергозбутової компанії є ключовим інструментом для вивчення її структури, виявлення взаємозв’язків між елементами та формування ефективної системи управління. Його сутність полягає у розподілі складної системи на підсистеми та процеси, кожен з яких виконує власну функцію, але водночас інтегрований у загальний механізм функціонування підприємства. Такий підхід дозволяє чітко визначати межі відповідальності, пріоритети розвитку та напрями оптимізації управлінських рішень.

У межах першого рівня декомпозиції, що здійснюється за напрямами діяльності, система поділяється на дві взаємопов’язані складові – надання та розподіл електроенергії. Підсистема надання охоплює розвиток і підтримку основної інфраструктури, включаючи модернізацію силових трансформаторів, оновлення ліній електропередач, підвищення потужності та надійності магістральних мереж. Її метою є забезпечення технологічної бази для зростання попиту та стабільної роботи енергосистеми. Підсистема розподілу зосереджена на точному та безпечному доведенні електроенергії до кінцевого споживача. Тут основну роль відіграють цифрові технології –

модернізація систем релейного захисту та автоматики, впровадження АСКОЕ для автоматизованого комерційного обліку, що забезпечує достовірність даних і контроль енергоспоживання.

Другий рівень аналізу враховує часову структуру управлінських рішень. У короткостроковій перспективі, з горизонтом планування до одного року, філія зосереджується на досягненні операційної рентабельності, оптимізації витрат на закупівлю та транспортування електроенергії, ефективному управлінні запасами матеріально-технічних ресурсів і підтриманні стабільної ліквідності. Особливу роль відіграють моделі управління запасами, що дозволяють мінімізувати витрати без ризику виникнення дефіциту ресурсів у критичні моменти. У довгостроковому вимірі, що охоплює період від п’яти до десяти років, фокус зміщується на стратегічні цілі – розширення ринку, підключення нових промислових споживачів, модернізацію інфраструктури, впровадження технологій розумних мереж і підвищення стійкості енергосистеми до зовнішніх ризиків, включаючи кліматичні та воєнні загрози.

Третій рівень декомпозиції передбачає функціональний підхід, який розкриває структуру бізнес-процесів. До них належать постачання електроенергії побутовим, комерційним і промисловим споживачам, організація системи розрахунків та обслуговування приладів обліку, а також технічне обслуговування та ремонт електричних мереж. Саме останній процес є основним споживачем матеріально-технічних ресурсів, тому управління запасами для нього має стратегічне значення. Функціональний аналіз дозволяє визначити, які з процесів є найбільш витратними, де існує потенціал для автоматизації та які ресурси можна оптимізувати без втрати якості послуг.

На четвертому рівні декомпозиції формується ієрархія цілей системи. На верхівці знаходиться стратегічна мета – забезпечення населення та бізнесу стабільною і якісною електроенергією, що сприяє соціально-економічному розвитку регіону. Тактичні цілі, розраховані на середньостроковий період, охоплюють розширення діяльності, підвищення надійності постачання, впровадження нових інформаційних технологій та оптимізацію витрат.

Операційні цілі конкретизують ці завдання через вимірювані показники: зниження втрат електроенергії, підвищення кваліфікації персоналу, скорочення витрат на запаси при збереженні високого рівня обслуговування [39].

Узагальнюючи, можна стверджувати, що декомпозиційний аналіз дозволяє побудувати цілісну картину функціонування філії "Енергозбуту" як складної економіко-технічної системи. Він створює основу для розробки інтелектуальних моделей управління, зокрема оптимізаційних алгоритмів керування запасами, що є важливою складовою підвищення ефективності роботи енергетичного підприємства в умовах динамічного середовища та високого рівня невизначеності.

2.8 Морфологічний аналіз економічної системи «Філія Енергозбуту»

Об’єктом дослідження є економічна система «Філія Енергозбуту», діяльність якої пов’язана з продажем електричної енергії, організацією технічного забезпечення мереж та управлінням інвестиційними програмами. Морфологічний аналіз дозволяє формально описати простір можливих рішень, альтернатив і критеріїв, що використовуються для вибору оптимальної стратегії розвитку.

У загальному вигляді задача морфологічного синтезу описується множиною: ⟨T, A, K, X, F, G, L, M, N, C, P, Y, Q, D⟩. Нижче подано розшифрування кожного елемента цієї системи із конкретизацією для філії Енергозбуту.

T (Постановка завдання). Типові постановки задач морфологічного синтезу охоплюють: синтез і вибір найкращого варіанта системи (t_1); упорядкування всього набору варіантів (t_2); синтез варіанта, найближчого до заданого технічного завдання (t_3); синтез і ранжування варіантів за мірою схожості з прототипом (t_4). Для філії Енергозбуту сформульовано такі цілі: а) максимізувати прибуток в умовах сучасного стану ринку електроенергії; б)

забезпечити рівень прибутковості не нижче 5% від загального доходу. Таким чином, використовується постановка типу t_1, тобто пошук оптимального варіанту системи.

A (Множина допустимих альтернатив). Альтернативи представляють можливі напрями модернізації або розвитку підсистем компанії. Для філії Енергозбуту визначено такі альтернативи: використання відновлювальних джерел енергії (встановлення сонячних панелей, вітрових установок для часткового покриття власних потреб); впровадження енергоефективних технологій (оновлення обладнання, зменшення втрат енергії); програми енергозбереження для споживачів (просвітницькі заходи, фінансові стимули, рекомендації); автоматизація та IT-рішення (системи управління запасами, облік та прогнозування навантаження, оптимізація ремонтів); розвиток систем моніторингу та контролю (системи раннього виявлення відмов обладнання); впровадження дистанційного управління (SCADA-системи, телеметрія, дистанційне керування енергооб’єктами). Ці альтернативи можуть реалізувати одну або кілька функцій одночасно.

K (Критерії оцінки альтернатив). Можуть застосовуватися один критерій ($к_1$) або кілька критеріїв ($к_2$ – векторна оцінка). Для філії оцінка здійснюється за комплексом соціально-економічних критеріїв, серед яких: економічна ефективність; соціальна значимість; рівень ризиків; вплив на надійність електропостачання.

X (Методи вимірювання переваг альтернатив). Можливі типи шкал: номінальна (x_1), рангова (x_2), кількісна (x_3), експертні коментарі (x_4), експериментальна оцінка (x_5), правила продукційного типу (x_6). Для філії застосовуються кількісна шкала (x_3) для економічних показників, а також експертні коментарі (x_4) та експериментальна оцінка (x_5) при розгляді впровадження IT-систем, автоматизації та дистанційного управління.

F (Тип відображення альтернатив у критерії). Може бути детерміноване (f_1), ймовірнісне (f_2) або невизначене (f_3). Для філії Енергозбуту всі критерії

оцінюються детерміновано (f_1) – на основі фінансових показників та розрахунків.

G (Система переваг). Може формуватися одним особовим вирішальним центром (g_1) або колективом (g_2). Для філії формується колективна система переваг (g_2), оскільки рішення приймається керівництвом та визначається нормативними документами.

L (Спосіб дослідження системи). Можливе дослідження цілісної системи (L_1) або дослідження системи по частинах (L_2). Застосовується L_2, оскільки філія аналізується за окремими підсистемами: виробничою, технічною, фінансовою, логістичною.

M (Метод оцінки варіантів). Може здійснюватися оцінка варіантів після синтезу (m_1) або оцінка альтернатив та підсистем до синтезу (m_2). Для філії обрано m_2 – попередня оцінка підсистем.

N (Процедура вибору варіантів). Можуть застосовуватися лексикографічний перебір (n_1), послідовний перебір (n_2), випадкове зондування (n_3) або термінове зондування (n_4). Рішення приймається на основі послідовного перебору альтернатив (n_2) з урахуванням обмежень і критеріїв.

C (Вид цільової функції). Може бути адитивною (c_1), мультиплікативною (c_2) або функцією схожості (c_3). Цільова функція філії має мультиплікативний характер (c_2) і спрямована на максимізацію добутку соціальної та економічної ефективності:

P (Кількість рівнів системи). Система може бути однорівневою (p_1) або багаторівневою (p_2). Філія Енергозбуту є багаторівневою системою (p_2), що включає центральний офіс, оперативні дільниці, ремонтні служби, склади тощо.

Y (Рівень формалізації задачі). Може бути неформалізованим (y_1), формально-евристичним (y_2) або формалізованим (y_3). Для аналізу використовується формально-евристичний підхід (y_2), оскільки поєднуються кількісні розрахунки та експертні оцінки. Рівень формалізації постановки і рішення задач у Енергозбуті залежить від конкретної задачі і її складності.

Наприклад, задачі управління запасами палива та матеріалів можуть бути досить формалізованими, оскільки базуються на математичних моделях та алгоритмах. З іншого боку, задачі, пов'язані з експлуатацією енергетичного обладнання, можуть бути менш формалізованими та вимагати залучення експертів. Рівень формалізації також залежить від використовуваних інформаційних систем, таких як системи автоматизованого управління енергооб’єктами. Для загального аналізу філії використовується формально-евристичний підхід (y_2), що поєднує кількісні розрахунки та експертні оцінки.

Q (Рівень комп'ютеризації процедур). Можливі рівні комп'ютеризації: q_1 – відсутня інформаційно-програмна підтримка; q_2 – частина або всі процедури реалізовані у вигляді діалогової комп'ютерної системи; q_3 – метод реалізований у вигляді інтелектуальної системи. Рівень комп'ютеризації в Енергозбуті варіюється. Збір даних про споживання електроенергії за допомогою електронних лічильників, які автоматично передають інформацію, є прикладом високої комп'ютеризації. Такі процеси, як планування потужності та розподіл ресурсів, часто виконуються з використанням спеціалізованого програмного забезпечення. Таким чином, для багатьох ключових процедур характерний рівень q_2, де частина або всі дії реалізовані у вигляді діалогової комп'ютерної системи.

D (Вирішальне правило). Вирішальне правило відображає систему переваг та формалізує головну мету. Для філії Енергозбуту воно ґрунтується на мультиплікативній цільовій функції, спрямованій на одночасну максимізацію соціальної та економічної ефективності [41, 42].

РОЗДІЛ 3
ПРОГНОЗУВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ УПРАВЛІННЯ ЗАПАСАМИ

3.1 Постановка задачі моделювання з урахуванням специфіки енергозбутових компаній

Аналіз, проведений у попередніх розділах, виявив ключові виклики в системі управління запасами матеріально-технічних ресурсів (МТР) для філії енергозбутової компанії, що функціонує в умовах підвищеної невизначеності та ризиків. Основним протиріччям є необхідність балансування між двома критичними цілями: мінімізацією сукупних логістичних витрат (замовлення, зберігання) та забезпеченням максимально можливого рівня надійності енергопостачання. Останнє вимагає наявності достатніх резервів для негайного відновлення мережі при аваріях, частота яких має стохастичний характер і посилюється зовнішніми факторами (погода, знос інфраструктури, наслідки воєнних дій).

Таким чином, задача моделювання формулюється як багатокритеріальна стохастична оптимізаційна проблема. Необхідно знайти такий динамічний план управління запасами різнорідної номенклатури МТР, який би мінімізував очікувані сукупні витрати на заданому горизонті планування, але при цьому гарантовано дотримувався жорстких обмежень на ризик дефіциту критичних ресурсів (трансформатори, кабель великих перерізів). Класичні детерміновані моделі, такі як EOQ (Уілсона), нездатні адекватно врахувати ймовірнісну природу попиту та вимоги до надійності. Сучасний підхід полягає у використанні ризик-орієнтованих моделей та метаевристичних методів оптимізації, здатних працювати зі складними обмеженнями та нелінійними цільовими функціями [43, 44].

3.2 Побудова блокової архітектури системи управління запасами

Архітектура запропонованої адаптивної системи підтримки прийняття рішень будується як замкнутий кібернетичний контур з підсиленим механізмом зворотного зв’язку, що дає можливість системі не лише реагувати на зміни, а й передбачати їх. У центрі цієї конструкції знаходиться інтеграція чотирьох модулів, кожен із яких виконує окрему функцію, але працює у тісній взаємодії з іншими, формуючи єдину інтелектуальну систему управління запасами для енергозбутової компанії. На рисунку 3.1 показано логічні зв’язки між компонентами, однак їх значення розкриваються тільки в динаміці.

Перший модуль, що фактично виконує роль сенсорної системи, збирає дані про технічний стан обладнання, історію його відмов, логістичні характеристики, строки та вартість постачання, а також безперервно інтегрує зовнішні фактори, зокрема метеорологічні прогнози, зміни оптових енергетичних цін і оцінки геополітичної стабільності. У результаті система працює не в ізоляції, а в інформаційному полі, яке відображає реальний стан інфраструктури та середовища, в якому вона експлуатується.

Другий модуль перетворює зібрані дані на набір майбутніх сценаріїв. Він поєднує регресійні моделі, що дозволяють оцінити звичайну динаміку зносу обладнання, із байєсівськими мережами, здатними враховувати малоймовірні, але критично важливі екстремальні події, такі як раптові аварії або зовнішні впливи. У такий спосіб система отримує не один прогноз, а спектр можливої поведінки попиту на матеріально-технічні ресурси, що значно підвищує її стійкість до невизначеності.

Третій модуль, який виступає ядром системи, виконує оптимізацію рішень. На основі сформованих сценаріїв він генерує план закупівель і поповнення запасів, використовуючи гібридний генетичний алгоритм, доповнений методом Монте-Карло. Таким чином, оптимізація враховує не лише середні значення витрат, а й їх розподіл, що дозволяє оцінювати ризики у широкому контексті. У моделі закладено вимогу дотримання CVaR-

обмежень, які обмежують можливість виникнення надмірних дефіцитів у найгірших сценаріях. Це робить систему орієнтованою на стійкість, а не просто на економію [45].

Четвертий модуль забезпечує адаптивність усієї архітектури. Він безперервно аналізує реальні показники експлуатації та порівнює їх з прогнозними. Якщо фактична аварійність або витрати матеріалів починають відхилятися від очікуваних значень, система автоматично ініціює повторне налаштування моделей прогнозування та новий цикл оптимізації. Таким чином, управління запасами перетворюється на живий процес, який не спирається на статичні норми, а розвивається разом із зовнішнім середовищем.

Завдяки цій архітектурі рішення про поповнення запасів ґрунтуються на уявленні про можливі майбутні стани системи, а не лише на фіксації поточного рівня складських залишків. Це дозволяє перейти від реактивного управління, властивого традиційним підходам, до проактивної системи, що здатна передбачати й компенсувати ризики ще до їх виникнення, що є принципово важливим у сучасних умовах нестабільності.

Таблиця 3.1 – Вплив зовнішніх факторів на параметри моделі управління запасами

Фактор впливу	Вплив на попит МТР	Вплив на логістику	Вплив на критерії моделі
Погодні умови (шторм, ожеледь)	Різке зростання кількості аварій мережі	Ускладнення транспортування	Збільшення дисперсії попиту, потребує збільшення страхового запасу
Знос обладнання	Прогресивне зростання базової інтенсивності відмов	–	Зсув середнього значення попиту

Продовження таблиці 3.1

Фактор впливу	Вплив на попит МТР	Вплив на логістику	Вплив на критерії моделі
Геополітична нестабільність	Підвищення ризику катастрофічних пошкоджень інфраструктури	Порушення ланцюгів поставок, зростання цін	Різке зростання вартості дефіциту, необхідність контролю хвостового ризику (CVaR)
Коливання цін на матеріали	Непрямий вплив через бюджетні обмеження	Вартість замовлення стає змінною	Необхідність врахування цінових сценаріїв в оптимізації

Джерело: побудовано автором на основі аналізу джерел

3.3 Формалізація еволюційної моделі

Математично поставлена задача формулюється таким чином. Нехай горизонт планування складає T періодів (наприклад, місяців), а множина типів МТР, що управляються, позначається як N. Для кожного періоду t та кожного ресурсу і визначаються:

а) $P(\omega)$ – випадковий попит (кількість одиниць), що залежить від реалізації сценарію ω з множини можливих станів зовнішнього середовища Ω.

б) Q_{it} – розмір замовлення (кількість одиниць).

в) I_{it}^{+} – рівень запасу на кінець періоду.

г) C_{order}^{i} – витрати на розміщення одного замовлення.

д) C_{hold}^{i} – витрати на зберігання однієї одиниці ресурсу за період.

е) $C_{\text{short}}^{i}(\omega)$ – штрафні витрати за дефіцит однієї одиниці, які можуть нелінійно зростати залежно від тривалості дефіциту та критичності ресурсу в сценарії ω.

Цільова функція – мінімізація сумарних очікуваних витрат (ETC) за всіма сценаріями:

$$ETC = \sum_{\omega\in\Omega}\Big[P(\omega)\cdot\sum_{t=1}^{T}\sum_{i\in N}\big(C^{i}_{\text{order}}\cdot\delta(Q_{it}) + C^{i}_{\text{hold}}\cdot I^{+}_{it} + C^{i}_{\text{short}}(\omega)\cdot I^{-}_{it}\big)\Big] \to min. \quad (3.1)$$

де $\delta(Q_{it})$ враховує фіксовані витрати на замовлення, активуючись (δ=1) лише для тих періодів t, коли обсяг замовлення для ресурсу і є додатним (Qit>0);

I^{+}_{it} – рівень позитивного запасу на кінець періоду;

I^{-}_{it} – обсяг дефіциту (незадоволеного попиту).

Ключовим обмеженням на ризик для критичної групи ресурсів A ⊂ N є обмеження на умовне значення під ризиком (CVaR_α). Воно вимагає, щоб середній рівень дефіциту в (1-α)*100% найгірших сценаріїв (наприклад, α=95%) не перевищував допустимого значення. Це формально відображає вимогу підприємства гарантувати наявність ресурсів навіть у найнесприятливіших, але можливих, обставинах.

Таким чином, модель є стохастичною задачею з обмеженнями, пошук рішення в якій неможливий аналітичними методами через велику розмірність і наявність випадкових величин.

Вибір та обґрунтування параметрів еволюційного алгоритму. Для розв’язання сформульованої стохастичної оптимізаційної задачі з її численними обмеженнями було обрано гібридний підхід, у якому генетичний алгоритм поєднується з методом Монте-Карло. Така комбінація дозволяє одночасно працювати зі складною топологією простору пошуку та адекватно оцінювати ризики, притаманні попиту на матеріально-технічні ресурси. В основі цього вибору лежить неможливість застосувати точні методи, адже стохастична природа попиту, наявність цілих змінних у вигляді обсягів замовлень і нелінійні обмеження, що виникають при розрахунку умовного значення під ризиком, перетворюють задачу на типову NP-складну. Класичні методи стохастичного програмування в реальних умовах, де наявні сотні

позицій номенклатури та тисячі сценаріїв, стають надто повільними й обчислювально непрактичними.

У цій ситуації генетичний алгоритм демонструє низку переваг. Його здатність працювати з будь-якою формою цільової функції робить можливим урахування CVaR-обмежень через механізм штрафів або спеціальних операторів. Популяційна природа алгоритму дає можливість досліджувати різні частини простору рішень паралельно, що значно зменшує ризик потрапляння в локальний оптимум. Крім того, ГА дуже легко адаптується до специфіки поставленої задачі, оскільки його оператори й схема кодування можуть бути налаштовані у відповідності до структури рішень, що оптимізуються.

Однак, оскільки сама цільова функція є математичним сподіванням, а ключові обмеження пов’язані з поведінкою хвостів розподілу витрат, жоден кандидат на роль оптимального плану закупівель не може оцінюватися без урахування стохастичності попиту. Саме цей аспект робить інтеграцію методу Монте-Карло необхідною. Для кожної хромосоми генерується велика кількість реалізацій випадкового попиту, наприклад тисяча, що дає змогу оцінити як середню величину сукупних витрат, так і поведінку сценаріїв із найгіршими значеннями, які визначають CVaR. У підсумку еволюційний алгоритм набуває властивості «обізнаності про ризик», оскільки його фітнес-функція вже відображає не лише економічну доцільність, а й поведінку рішень у критичних ситуаціях [46, 47].

Конкретні параметри алгоритму було підібрано таким чином, щоб забезпечити баланс між швидкістю роботи та різноманітністю досліджуваних стратегій. Представлення рішення реалізовано у вигляді вектора цілих чисел, кожен елемент якого відображає розмір замовлення для певного ресурсу в конкретному періоді планування. Популяція містить сто особин, що дає змогу охопити достатню різноманітність рішень без надмірних обчислювальних витрат. Відбір здійснюється за принципом турнірної селекції з невеликим розміром турніру, що створює помірний тиск відбору й водночас дозволяє

слабшим, але перспективним кандидатам зберігатися у популяції. Схрещування виконується у вигляді однорідного кросинговера з досить високою ймовірністю, завдяки чому різні частини стратегій можуть комбінуватися в нових конфігураціях. Мутація реалізована як точкове внесення невеликих випадкових змін до окремих генів, що дає можливість повільного дослідження найближчих областей простору рішень і зменшує ризик передчасної збіжності.

Алгоритм завершує роботу або після досягнення встановленої кількості поколінь, або якщо найкраще рішення перестає покращуватися протягом певного проміжку еволюційного часу. Кожне покоління супроводжується оцінюванням усіх хромосом за допомогою тисячі реалізацій Монте-Карло, що забезпечує достатню статистичну точність для визначення очікуваних витрат та CVaR. Таким чином формується єдиний цикл, у якому відбувається генерація популяції, оцінка її поведінки в ймовірнісному середовищі, еволюційне вдосконалення планів та перевірка критеріїв зупинки.

Для апробації запропонованого підходу та отримання кількісних результатів було розроблено конкретну модель управління запасами для філії «Енергозбуту» на прикладі Шевченківського району м. Запоріжжя. Цей вибір дозволяє пов'язати теоретичну модель з реальними фізичними об'єктами та обсягами потреб.

Аналіз структури номенклатури запасів.

Першим етапом є визначення номенклатури критичних МТР та розрахунок їх базової потреби для забезпечення функціонування мережі району. Згідно з аналізом, проведеним у розділі 2, основну увагу приділено зовнішньому обладнанню, необхідному для передачі та розподілу електроенергії, а також обліку її споживання, оскільки саме ці компоненти найбільш схильні до зносу та аварій і формують основу аварійного резерву.

На основі аналізу даних про інфраструктуру району (80 тис. мешканців, 20 підприємств, соціальні об'єкти), а також використання нормативних показників оснащеності та експертних оцінок фахівців філії, було виконано

розрахунок річної потреби в основних видах обладнання. Отримані результати, що слугують вхідними даними для подальшого стохастичного моделювання, систематизовано в Таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Розрахунок потреби в основних матеріально-технічних ресурсах для Шевченківського району

Найменування МТР	Од. в.	Розрахункова формула / логіка	Потреба (база), S	Призначення
Трансформатор масляний ТМ-160/10	шт.	2 РП * (2 ТП/РП) * (50 ТМ/ТП)	100	Зниження напруги з 6/10 кВ до 0.4 кВ
Кабель силовий (АВВГ, різних перерізів)	м	35000 (до споживачів) + 25000 (від ТП) + 1250 (підприємства)	61 250	Прокладання повітряних та кабельних ліній
Електролічильник	шт.	80000 (мешканці) + 36 (підприємства)	80 151	Облік спожитої електроенергії
Автоматичний вимикач (АВ)	шт.	Приблизно 1.5 на лічильник	120 226	Захист електричних кіл від перевантажень

Джерело: побудовано автором на основі аналізу джерел

Для забезпечення подальшого моделювання та диференційованого управління запасами наявна номенклатура була класифікована за методологією ABC-аналізу, що враховує як вартість одиниці, так і її критичність для безперебійної роботи енергетичної системи. До групи А віднесено трансформатори ТМ-160 – низькооборотну, але високовартісну продукцію, відсутність якої може спричинити відключення цілих мікрорайонів. Їх кількісна частка є незначною, проте саме вони формують основну частину вартості запасів. Групу В становить силовий кабель із середнім рівнем оборотності та вартості; його дефіцит призводить до затримок

ремонтних робіт, але зазвичай допускає тимчасові альтернативи. Група С включає масові та відносно дешеві позиції – автоматичні вимикачі та електролічильники, дефіцит яких має локальний характер і не ставить під загрозу великі ділянки мережі.

Складна стохастична модель з обмеженнями CVaR застосовується передусім для груп А та В, де наслідки дефіциту мають суттєвий вплив на надійність системи та економічні ризики. Для групи С доцільними залишаються спрощені підходи – періодична Р-система або адаптована модель Уілсона, яка використовується як обчислювальна основа для визначення економічно обґрунтованих розмірів замовлення.

Адаптація класичної моделі Уілсона в умовах невизначеності.

Класична модель економічного розміру замовлення (EOQ) Уілсона, традиційно спирається на низку спрощувальних припущень, зокрема на постійність і детермінованість попиту, миттєвість поповнення та відсутність дефіциту. У контексті енергозбутових компаній такі передумови не виконуються, тому модель потребує суттєвої адаптації для використання в умовах стохастичного та сезонно змінного середовища.

Першою модифікацією є заміна фіксованого річного попиту S на прогнозоване очікуване значення Ŝ та відповідне стандартне відхилення σ, що генерується модулем прогнозування. Це дозволяє інтегрувати у модель не лише середню інтенсивність споживання ресурсів, а й їхню мінливість. Подальше вдосконалення стосується параметрів безпеки: точка повторного замовлення ROP та страховий запас SS більше не визначаються статичними формулами. Натомість вони розраховуються як:

$$ROP = \hat{S}_L + SS. \qquad (3.2)$$

де Ŝ_L відображає прогнозований попит протягом часу поставки L, а страховий запас:

$$SS = k \cdot \sigma_L. \quad (3.3)$$

Використовує коефіцієнт безпеки k як змінну частину, що оптимізується генетичним алгоритмом. Завдяки цьому рівень сервісу перестає бути наперед заданою величиною й динамічно адаптується до поточних ризиків і вартості дефіциту відповідної позиції.

Окремої уваги потребує моделювання витрат, пов'язаних із дефіцитом. На відміну від класичної постановки, де дефіцит часто або забороняється, або оцінюється лінійною функцією, у реальних умовах енергозбуту його вартість може зростати нелінійно. Для критичних груп А та В дефіцит навіть однієї одиниці обладнання призводить до непропорційно великих соціально-економічних втрат. Тому параметр C^i_{short} розглядається як функція від тривалості дефіциту, яка може мати експоненційний характер.

У результаті модель Уілсона перестає бути статичним калькулятором та трансформується в елемент адаптивної системи, де ключові параметри – оптимальний розмір замовлення Q_{opt} і коефіцієнт безпеки k – визначаються в рамках еволюційної оптимізації. Це дозволяє поєднати простоту й інтерпретованість класичної моделі з гнучкістю та стійкістю до невизначеності, притаманною сучасним стохастичним підходам.

Генерація сценаріїв попиту на основі методу Монте-Карло.

Реалістичність і точність усієї стохастичної моделі безпосередньо залежать від того, наскільки повно вдається відтворити можливі траєкторії попиту на матеріально-технічні ресурси. Оскільки попит формується під дією численних випадкових чинників, традиційні детерміновані підходи виявляються недостатніми. Саме тому у роботі застосовано метод Монте-Карло, що дозволяє моделювати широкий спектр сценаріїв розвитку подій протягом річного горизонту планування та охопити не лише середні значення попиту, а й повний спектр ризиків.

Вихідною точкою для моделювання є базова інтенсивність відмов обладнання, яку позначено λ. Вона відображає усереднену частоту аварій для кожного типу обладнання за нормальних умов експлуатації. Проте реальне значення цієї інтенсивності змінюється під дією трьох груп чинників. Першим визначальним фактором є знос обладнання, який з часом накопичує латентні пошкодження і підвищує ймовірність відмов. Цей процес зручно описується логістичною кривою, що дозволяє врахувати підвищення вразливості у період середнього віку трансформаторів, коли частота відмов може коливатися у межах від двох до восьми відсотків на рік. Другим фактором виступає сезонність, яка значною мірою впливає на інтенсивність ремонтних робіт. Зимові опади, ожеледь, сильний вітер або весняні паводки здатні разово підвищити потребу в матеріалах, тоді як літній період дає тимчасове зниження навантаження. З огляду на це сезонний коефіцієнт може змінюватися від приблизно нуль цілих восьми десятих до півтора, створюючи природні коливання навколо базового рівня попиту.

Найчутливішим елементом моделі є врахування зовнішнього ризику, який інколи багаторазово перекриває вплив зносу та сезонності. Умови мирного часу дають нам коефіцієнт, близький до одиниці, але перехід до періоду підвищеної напруги збільшує ймовірність аварій до півтора разів, а поява активних бойових дій або прицільних атак на електромережі різко підсилює ризики і створює ситуацію, у якій інтенсивність відмов може зрости утричі. Поєднання цих трьох компонентів формує узагальнений параметр λ_модель, що відображає реальний стан системи в кожний конкретний момент.

Після отримання цього показника для кожного місяця і для кожного виду ресурсу генерується випадкова кількість аварійних подій, які вимагають заміни обладнання. Механіка МК дозволяє кожного разу створювати нові реалізації місячного попиту, відтворюючи як незначні коливання, так і екстремальні піки. У ситуації з кабелем додатковою змінною стає довжина, необхідна для ліквідації конкретної аварії, адже вона може суттєво

варіюватися на практиці – від кількох десятків до кількох сотень метрів. У підсумку для кожного зі створених тисячі сценаріїв формується повна матриця попиту для всіх ресурсів у кожному місяці.

Таке генерування сценаріїв перетворює модель із набору середніх припущень на повноцінну множину можливих майбутніх варіантів, завдяки чому оптимізаційний алгоритм отримує можливість оцінювати не лише очікувані витрати, а й поведінку системи у рідкісних, але потенційно критичних ситуаціях. Саме це робить підхід придатним для реальних умов, де ризики ніколи не залишаються сталими, а рішення мають враховувати не лише звичайні, а й найгірші можливі сценарії розвитку подій [48].

Опис вихідних даних та параметрів системи для експерименту.

Експеримент був сконцентрований на трьох ключових товарних групах (A, B, C), характеристики яких деталізовані в Таблиці 3.3. Вихідні дані були отримані шляхом аналізу ринкових пропозицій, нормативів та експертних оцінок фахівців філії.

Таблиця 3.3 – Детальні характеристики товарних груп для експериментального моделювання

Параметр	Група А (Трансформатор ТМ-160)	Група В (Кабель силовий АВВГ)	Група С (Автом. вимикач)
Вартість одиниці, грн	150 000	200 (за метр)	200
Витрати на замовлення (F), грн	5 000	2 000	500
Витрати на зберігання за рік (% від вартості)	20% (30 000 грн/рік)	25% (50 грн/м/рік)	30% (60 грн/рік)
Вартість дефіциту (C_short)	Нелінійна: 1 000 000 грн/день простою мережі	5 000 грн/год простою бригади	100 грн/од. (втрата доходу)

Продовження таблиці 3.3

Параметр	Група A (Трансформатор ТМ-160)	Група B (Кабель силовий АВВГ)	Група C (Автом. вимикач)
Середньорічний попит (Ŝ), од.	8 (базовий знос)	3 000 м (базовий знос+аварії)	6 000 (5% зносу парку)
Час поставки (L), днів	45	14	7
Коефіцієнт α у CVaR	0.95	0.90	Не застосовується

Джерело: побудовано автором на основі аналізу джерел

Параметри гібридного генетичного алгоритму. Популяція охоплювала сто кандидатних рішень, що дозволяло зберегти достатню різноманітність без надмірного збільшення часу розрахунків. Еволюційний процес тривав протягом ста п’ятдесяти поколінь, після чого подальше покращення не спостерігалося. Значення ймовірностей операторів залишалися класичними для задач такого типу: імовірність кросинговера становила нуль цілих вісім десятих, тоді як мутація застосовувалася до окремих генів із частотою нуль цілих нуль сім сотих.

Для оцінки стохастичної природи витрат кожне рішення перевірялося за допомогою методу Монте-Карло, в межах якого генерувалося тисяча випадкових траєкторій попиту. Така кількість реалізацій забезпечувала достатню статистичну стабільність при оцінюванні очікуваної вартості та умовного значення під ризиком. Ще одним важливим параметром був коефіцієнт неприйняття ризику α, який визначав ступінь чутливості моделі до екстремальних сценаріїв. У процесі серії експериментів його варіювали в інтервалі від нуль цілих трьох десятих, що відповідало агресивній орієнтації на надійність, до нуль цілих восьми десятих, що відповідало фокусуванню на мінімізації середніх витрат.

Обчислювальний експеримент структурувався у три етапи, кожен із яких відповідав за окремий компонент валідації та аналізу ефективності моделі. На першому етапі проводилося калібрування прогнозної моделі, яка використовує історичні дані про відмови та витрати МТР. Перевірка точності здійснювалася за період двох попередніх років, що дозволило оцінити здатність моделі відтворювати середньорічний попит для груп B та C. Похибка не перевищила дванадцяти відсотків, що є прийнятним показником для задач управління запасами, у яких притаманна значна стохастичність.

Другий етап передбачав порівняльне моделювання у штатних умовах протягом дванадцяти місяців, у межах якого аналізувалися чотири альтернативні стратегії. Перша стратегія ґрунтувалася на класичній моделі Уілсона, де страховий запас приймався фіксованим і складав п’ятнадцять відсотків від річного попиту. Друга передбачала застосування системи типу (s, S) з періодичним щомісячним переглядом запасів та відповідним визначенням точки повторного замовлення і цільового рівня запасів. Третя стратегія використовувала базову версію генетичного алгоритму, у якій оптимізація відбувалася лише за детермінованим середнім сценарієм без стохастичного аналізу та без урахування CVaR. Четверта стратегія реалізовувала запропоновану гібридну модель, що поєднувала ГА з методом Монте-Карло та включала обмеження на умовне значення під ризиком у дев’яносто п’ятому процентилі для критично важливої групи A. Саме цей етап дозволив оцінити переваги ризик-орієнтованого підходу у порівнянні з традиційними моделями.

Завершальний етап експерименту мав характер стресового тестування і був спрямований на визначення стійкості стратегій до різких зовнішніх шоків. На восьмому місяці модель переводилася у кризовий режим шляхом активування коефіцієнта зовнішнього ризику, що дорівнював трьом. Це імітувало наслідки масованих пошкоджень інфраструктури у зимовий період, які призводили до триразового збільшення кількості відмов трансформаторів та зростання попиту на кабельну продукцію на сто п’ятдесят відсотків протягом одного місяця. Таке тестування дало змогу встановити, наскільки

кожна стратегія здатна забезпечити безперервність роботи у пікових та екстремальних умовах.

Порівняльний аналіз результатів еволюційного алгоритму та класичних методів оптимізації.

Результати проведеного обчислювального експерименту, зведені в таблиці 3.4, наочно демонструють ключові переваги та недоліки кожної з аналізованих стратегій управління запасами. Найбільш показовим є порівняння поведінки систем в умовах стресового сценарію.

Таблиця 3.4 – Порівняльні результати моделювання

Критерій оцінки	Стратегія 1 (EOQ)	Стратегія 2 (s, S)	Стратегія 3 (Базова ГА)	Стратегія 4 (Гібридна модель)
Сумарні очікувані витрати (ETC), тис. грн	4 125	3 980	3 750	3 850
у т.ч. штрафи за дефіцит, тис. грн	1 050	850	400	< 50
Середній рівень запасів (нормо-дні)	45	38	32	40
Забезпеченість за CVaR (95%) для групи А	72%	78%	88%	> 99%
Реакція на стресовий сценарій (лютий): тривалість критичного дефіциту	Катастрофічний дефіцит, простої > 15 днів	Серйозний дефіцит, простої 7-10 днів	Помірний дефіцит, простої 3-5 днів	Мінімальний дефіцит, простої < 2 днів

Джерело: побудовано автором на основі аналізу джерел

Порівняння чотирьох стратегій управління запасами показує низку принципових відмінностей, що стосуються економічної ефективності, надійності постачання та здатності протистояти нестандартним і кризовим ситуаціям. Аналіз таблиці результатів дозволяє сформулювати такі ключові висновки.

Перш за все, за показником сумарних очікуваних витрат (ETC) найнижче значення продемонстрував базовий генетичний алгоритм, який досягнув рівня три мільйони сімсот п’ятдесят тисяч гривень. Це приблизно на два цілих шість десятих відсотка менше, ніж у гібридної моделі, в якій сукупні витрати становили три мільйони вісімсот п’ятдесят тисяч гривень. Однак менші витрати базової ГА-стратегії є наслідком того, що вона не враховує ризикові сценарії та не контролює хвостові втрати. Гібридна модель цілеспрямовано перерозподіляє витрати: збільшує складські витрати за рахунок підвищеного резерву, але натомість істотно – на порядок – зменшує витрати, пов’язані з дефіцитом. В умовах роботи енергорозподільної компанії, де перерви в електропостачанні мають значні соціально-економічні наслідки, саме такий компроміс між витратами та надійністю вважається оптимальним.

Другим важливим аспектом є надійність і якість керування ризиками. Запропонована гібридна стратегія забезпечила стабільний рівень сервісу, який, відповідно до обмеження на умовне значення під ризиком (CVaR), перевищує дев’яносто дев’ять відсотків для групи А. Це означає, що навіть у п’яти відсотках найгірших сценаріїв попиту система зберігає здатність забезпечити трансформаторами аварійні бригади, що є критично важливим для відновлення мережі. Жодна з альтернативних стратегій не забезпечує подібного результату: моделі, орієнтовані на середні очікування, ігнорують ризикові відхилення і виявляються неспроможними у випадках високої варіативності попиту.

Третім ключовим індикатором ефективності стала поведінка систем під час стресового тестування. У сценарії з коефіцієнтом зовнішнього ризику, що дорівнює трьом, попит на критичні ресурси різко зріс: кількість відмов

трансформаторів збільшилася утричі, а споживання кабельної продукції – на сто п’ятдесят відсотків. Гібридна модель змогла поглинути цей шок завдяки тому, що протягом попередніх місяців адаптивно формувала підвищений аварійний запас на основі значення параметра неприйняття ризику α, яке в даному експерименті дорівнювало нуль цілих чотири десятих. Така поведінка є проявом саме ризик-орієнтованої логіки оптимізації, що враховує можливість раптових та масштабних змін умов. На противагу цьому, інші стратегії – зокрема детерміновані EOQ та (s, S) – виявили недостатній рівень запасів у кризовому місяці, що призвело до значних штрафних витрат і фактичної нездатності забезпечити безперервність ремонтно-відновлювальних робіт.

Визначення практичної ефективності та обмежень розробленої моделі.

Практична ефективність запропонованої стохастично-еволюційної моделі управління запасами для філії енергозбутової компанії може бути оцінена у трьох ключових вимірах: фінансовому, операційному та стратегічному.

Фінансовий ефект. У результаті моделювання встановлено, що очікувана річна економія для досліджуваної філії становить від п’ятисот до семисот тисяч гривень. Цей ефект формується за рахунок зменшення штрафних витрат, уникнення дефіцитів критичних позицій та оптимізації структури запасів у порівнянні з традиційною політикою, заснованою на детермінованій моделі EOQ. Зниження витрат досягається не лише завдяки скороченню «надлишку», але й завдяки більш ефективному розподілу оборотного капіталу між групами A, B і C.

Підвищення операційної стійкості. Запропонована модель автоматизує процес прийняття рішень щодо формування резервів і переводить страхові запаси з площини емпіричних оцінок у площину формалізованого ризик-орієнтованого підходу. Завдяки контролю за CVaR у групі A система завчасно формує оптимальний обсяг критичних МТР, що забезпечує безперервність ремонтно-відновлювальних робіт навіть у пікові або кризові періоди. Це

безпосередньо підвищує надійність електропостачання регіону та знижує ймовірність масштабних соціально-економічних втрат.

Інструмент сценарного та стратегічного планування. Імітаційні можливості моделі (завдяки методу Монте-Карло) дозволяють досліджувати вплив широкого спектра зовнішніх факторів – від зміни бюджетних лімітів до варіацій часу поставки, політики постачальників або рівня прийнятного ризику (через параметр α). Це робить систему не лише оперативним інструментом, а й інтегрованим засобом підтримки стратегічного планування у компанії.

Обмеження моделі та можливі шляхи їх подолання. Попри високу ефективність, запропонована модель має низку обмежень, характерних для складних стохастичних оптимізаційних систем.

Залежність від якості даних. Точність прогнозів та адекватність оптимальних рішень безпосередньо пов’язані з повнотою та достовірністю історичних даних: облік відмов, реальний технічний стан обладнання, витрати на дефіцит тощо.

Шлях подолання: впровадження поетапного циклу калібрування, інтеграція з корпоративними системами обліку, поступове накопичення емпіричних даних та регулярне оновлення моделей прогнозування.

Обчислювальна складність. Оптимізація для сотень номенклатурних позицій за тисячею сценаріїв попиту створює значне навантаження на обчислювальні ресурси.

Шлях подолання: використання кластеризації номенклатури (ABC/XYZ), оптимізація лише для груп з високою критичністю; паралелізація обчислень (GPU/мультиядерність); використання хмарних сервісів, що забезпечують масштабованість.

Організаційні зміни та бар’єри впровадження. Переорієнтація на data-driven управління вимагає зміни внутрішніх процесів, підвищення кваліфікації персоналу та адаптації культури прийняття рішень.

Шлях подолання: розробка інтуїтивного інтерфейсу СППР, навчання співробітників, поступове впровадження через пілотні проєкти та демонстрацію фінансової вигоди на реальних кейсах.

Підсумовуючи, гібридна модель, побудована на основі інтеграції генетичного алгоритму та методу Монте-Карло, є високоефективним інструментом для ризик-орієнтованого управління запасами в енергетичному секторі. Вона забезпечує суттєву економію, підвищує операційну стабільність і дозволяє формувати стійку стратегію роботи в умовах високої невизначеності – що особливо актуально для українських енергокомпаній у сучасних умовах.

3.4 Опис прототипу системи підтримки прийняття рішень на платформі Microsoft Access

Для апробації розроблених принципів та демонстрації можливості практичного впровадження був розроблений функціональний прототип системи підтримки прийняття рішень (СППР) на базі результатів транспортної системної передачі RTE для управління запасами на платформі Microsoft Access. Вибір середовища обумовлений його поширеністю в бізнес-середі, відносною простотою розробки, потужними можливостями по створенню форм та звітів, а також наявністю мови програмування VBA для реалізації складних алгоритмів [49, 50].

Метою прототипу є наочна демонстрація роботи ключових модулів запропонованої архітектури (збір даних, прогноз, оптимізація, візуалізація) на обмеженій номенклатурі МТР (наприклад, 10-15 найважливіших позицій). Прототип реалізує спрощену, але повноцінну версію гібридної моделі, що дозволяє користувачу (менеджеру з логістики) отримувати обґрунтовані рекомендації щодо розмірів замовлень.

Розклад повинен бути розрахований на період один рік . Тим не менш, тимчасовим кроком графіка може бути або день, або тиждень, в залежності від необхідної точності.

Формально $H = 1,2,\dots,T$ число тимчасових кроків позначається як $T \in N$, а дискретний часовий горизонт . Наприклад, T = 365 для щоденного графіка і T = 53 для потижневого графіка .

Для виконання різних завдань (або робіт) необхідні трудові ресурси, які поділені на групи (ресурси) раз особистої величини. Кожна група має різні навички, які потенційно можуть знадобитися при будь-якій роботі. Нехай C означає безліч ресурсів. Доступні ресурси завжди обмежені і тому є максимальне значення для кожного ресурсу, яке не може бути перевищено. Більше того, доступні ресурси змінюються з часом. Так що для кожного ресурсу $c \in C$і кожного моменту часу $t \in H$величина u_t^cпозначає верхню межу, яка не може бути перевищена. З експлуатаційних причин також існує нижня межа споживання ресурсів. З метою запобігання невикористання трудових ресурсів повністю (простоїв), існують порогові значення, що вказують на мінімальну необхідну вартість споживаного міського ресурсу. Такий поріг позначається як l_t^cі є мінімальним значенням для ресурсу $c \in C$в момент часу $t \in H$.

Роботи – це завдання, які мають бути заплановані наступного року. Вони різняться за тривалістю чи з погляду потреб у ресурсах. Безліч робіт позначається I. Через дні, що випадають (вихідні, святкові дні) тривалість даної роботи не фіксована в часі, і залежить від того, коли вона починається. Отже, $\Delta_{i,t} \in N$позначає фактичну тривалість роботи $i \in I$, якщо вона починається на момент часу $t \in H$. Кожна робота вимагає специфічних навичок, щоб бути коректно виконаною. Отже, існує навантаження ресурс, яка залежить від розглянутого ресурсу та часу. Це тому, що тривалість роботи залежить від часу, але також тому, що зазвичай потрібно більше ресурсів на початок і кінець роботи для спеціальних цілей (перенесення та видалення

обладнання, останніх штрихів). Таким чином, робоче навантаження ресурсу, позначається як $r_{i,t'}^{c,t} \in R^+$

Коли виконується робота, лінії, що розглядаються, повинні бути відключені, що призводить до послаблення електричної мережі в цей час. Це означає певний ризик для RTE, який тісно пов'язаний з роботою мережі: якщо зламається інша близька ділянка (наприклад, через екстремальні погодні умови), мережа може бути не в змозі правильно обробляти потребу в електроенергії. Навіть якщо такі події мають вкрай низьку ймовірність, вони мають бути враховані у розкладі. Для фінансової оцінки цих ризиків RTE вже провів моделювання різних сценаріїв для різних тимчасових кроків. Нехай S_tбуде безліч сценаріїв у момент часу $t \in H$. Вони відповідають певній операції мережі, отже, не залежать від робіт.

Проте саме значення ризику залежить від роботи. Воно також залежить від часу, оскільки часто набагато менш ризиковано проводити роботу влітку (коли до електромережі не так багато звернень), а не взимку. Таким чином, величина ризику (у євро) позначається як $risk_{i,t'}^{s,t} \in R$; для моменту часу $t \in H$, сценарію $s \in S_t$та роботи $i \in I$, яка починається в момент часу $t' \in H$.

Розклад (або рішення) – це список L пар $(i,t), i \in I$, де t – час початку роботи i . Нехай $start_i$ позначає початковий час роботи $i \in I$, і $I_t \subseteq I$ - набір робіт процесу на момент часу $t \in H$. Планування вважається допустимим, якщо додатково виконуються всі обмеження, подані нижче.

Роботи повинні починатися на початку періоду. Більше того, оскільки втручання вимагають відключення деяких ліній електромережі, яка після роботи запускається, її не можна переривати (крім неробочих днів). Точніше, якщо робота $i \in I$починається в момент часу $t \in H$, то вона повинна закінчуватися в момент часу $t + \Delta_{i,t}$. Усі роботи мають бути виконані у призначений період. Усі роботи мають бути завершені пізніше кінця горизонту. Якщо втручання i ∈ I починається в момент часу t ∈ H , тоді t + Δ i,t ≤ T + 1 . На рисунку 2 , I2 не є правильно заплановано..

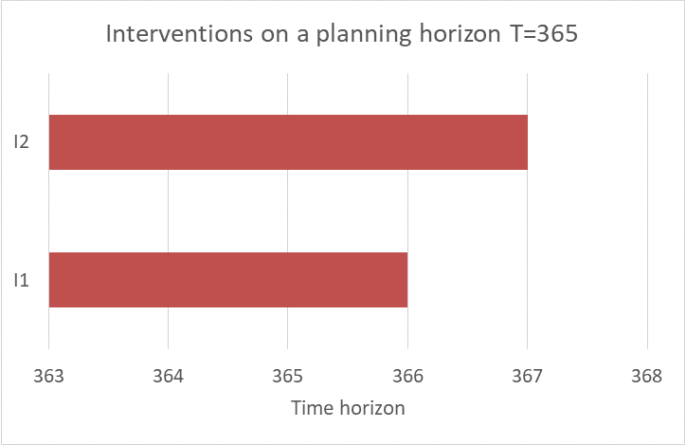


Рисунок 3.1 – Приклад роботи, що закінчується до кінця горизонту (I1) і після (I2) коли T = 365

При даному рішенні робоче навантаження для роботи i для ресурсу c в момент часу t дорівнює . $r_{i,start_i}^{c,t}$ Тоді загальне навантаження ресурсу на ресурс c в момент часу t дорівнює

$$r^{c,t} = \sum_{i \in I_t} r_{i,start_i}^{c,t}. \tag{3.4}$$

Необхідні ресурси не можуть перевищувати ємність ресурсів, але мають бути як мінімум рівні мінімального робочого навантаження, і, отже, обмеження ресурсів:

$$l_t^c \leq r_{tot}(c,t) \leq u_t^c \quad \forall c \in C, t \in H. \tag{3.5}$$

Деякі лінії, де повинні виконуватися операції технічного обслуговування, іноді надто близькі одна до одної, щоб одночасно виконувати відповідні роботи. Це надто сильно послабить мережу і буде драматичним у разі іншого під час роботи відключення лінії Хоча значення ризику розраховуються незалежно для кожної роботи, винятки враховують залежність між ними. Більше того, ці винятки також змінюються у часі.

Наприклад, в літку послаблювати мережу набагато менш ризиковано, оскільки загальний попит набагато менший, ніж узимку, і тому мережа може впоратися з відключенням іншої близької лінії.

Безліч винятків позначається через Exc . Це набір триплетів (i_1, i_2, t), де $i_1, i_2 \in I$і $t \in H$. Обмеження виключення формально можна записати у вигляді:

$$i_1 \in I_t \Rightarrow i_2 \notin I_t \quad \forall (i_1, i_2, t) \in Exc. \tag{3.6}$$

Оцінка допустимого плану залежить лише від розподілу ризиків. По-перше, враховувався лише середній ризик (за часом та сценаріями). Крім інтуїтивності, середній ризик підсумовує все планування у єдиному значенні, вираженому як грошових витрат. Якщо протягом декількох секунд необхідно провести арбітраж між двома планами, середній ризик безперечно буде показником, на який потрібно дивитися.

Але якби у планувальника було кілька хвилин, він чи вона захотів би дізнатися більше, ніж просто середнє значення, і подивився б на розподіл за роками: чи вищий ризик улітку, коли зазвичай проводиться багато робіт, але мережа менш затребувана? Чи взимку, коли потрібно виконати кілька, але ризикованих робіт? Тоді рішення буде ухвалено. Зрештою, якщо планувальник має годинник, він чи вона захочуть дізнатися ще більше, занурюючись точно в кожен період: для цього конкретного тижня, який, можливо, найгірший сценарій? Середній? Цілком імовірно, що фінансові витрати будуть вищими, ніж очікувалося?

RTE провів дослідження, що базуються на поточних методах планування, щоб знайти, який показник найкраще відображає всі ці нюанси, пов'язані з роботами. Загальна середня вартість швидко видалася відмінним кандидатом, але цього виявилося замало обліку специфічної поведінки розподілу ризику. Зрештою, RTE виявив ще один показник, який у поєднанні із середньою вартістю здатний охопити деякі з описаних вище реалій проблеми

Отже, тепер можна кількісно оцінити якість цього плану, розглядаючи два критерії: середня вартість та очікуваний надлишок. Обидва вони пов'язані з ризиком і розраховуються на євро. Як згадувалося раніше, перший це просто середній ризик за рік. За інших рівних умов мета полягає у досягненні мінімально можливого значення. Крім цієї першої метрики якість планування також визначається з урахуванням очікуваного перевищення. Це допомагає кількісно оцінити мінливість вартості, керуючи певним квантилем розподілів.

За наявності рішення сукупний ризик планування в момент часу $t \in H$для сценарію $s \in S_t$, позначений як $risk^{s,t}$, є сумою ризику в сценарії s в ході внутрішньовиробничих робіт в момент часу t :

$$risk^{s,t} = \sum_{i \in I_t} risk^{s,t}_{i,start_i}. \quad (3.7)$$

Це наближення першого порядку, оскільки значення ризику передбачається незалежним. Середній сукупний ризик планування при $t \in H$ рівні

$$\overline{risk^t} = \frac{1}{|s_t|} \sum_{s \in S_t} risk^{s,t}. \quad (3.8)$$

Тоді загальний ризик планування (або середня вартість) дорівнює

$$obj1 = \frac{1}{T} \sum_{s \in S_t} \overline{risk^t}. \quad (3.9)$$

Середня вартість тоді є середньою із двох причин: щодо сценаріїв та щодо тимчасового горизонту.

Як згадувалося раніше, якість планування також враховує мінливість витрат. Дійсно, при розрахунку середнього ризику за всіма сценаріями деяка інформація втрачається. Зокрема критичні сценарії, що призводять до надзвичайно високих витрат, можуть бути недостатньо охоплені середнім

значенням. Щоб запобігти таким подіям, існує метрика для кількісної оцінки мінливості сценаріїв.

Нехай $E \subseteq R$ - непуста кінцева множина і $\tau \in [0,1]$. τ −квантиль E позначається$Q_\tau(E)$ і

$$Q_\tau(E) = min\{\, q \in R: \exists X \subseteq E: |X| \geq \tau \times |E| \text{ и } \forall x \in X, x \leq q\}. \quad (3.10)$$

Індикатор очікуваного перевищення спирається на квантильні значення. За кожен період часу t ми визначаємо квантильне значення Q_T^t наступним чином:

$$Q_T^t = Q_T(\{risk^{s,t}\})_{s \in S_t}. \quad (3.11)$$

Очікуваний надлишок у момент часу $t \in H$потім визначається як:

$$Excess(t) = max(\,0, Q_T^t - \overline{risk^t}). \quad (3.12)$$

Малюнки 3 і 4 показують ілюстрацію вартісної мінливості для $\tau = 0{,}9$ нехай I_1, I_2 і I_3- три роботи, заплановані на час t = 1. Їхні індивідуальні значення ризику для 10 сценаріїв такі:

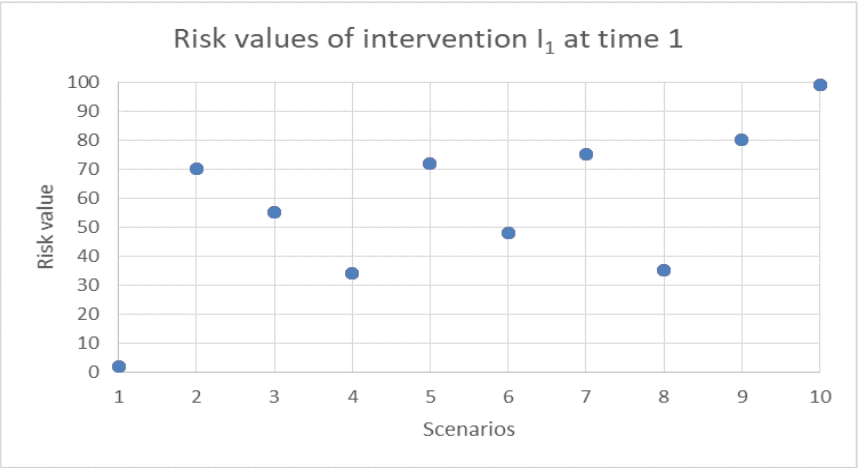


Рисунок 3.2 – Значення ризику для 10 сценаріїв роботи I_1

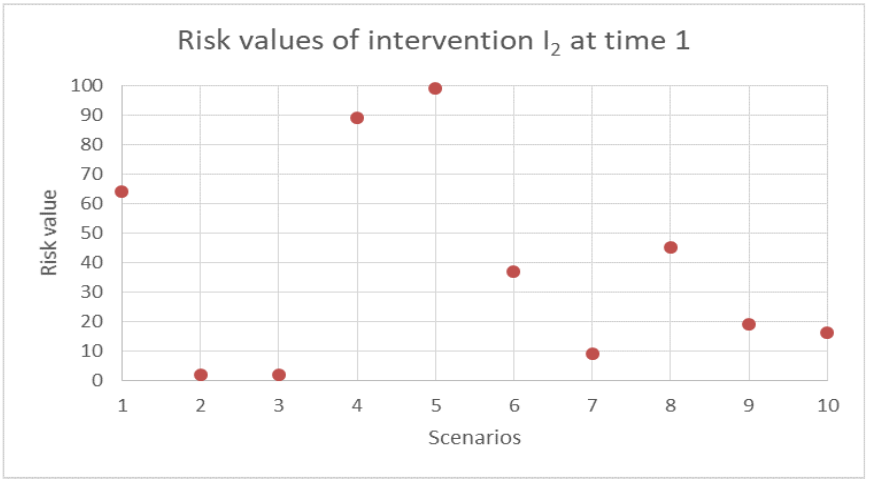


Рисунок 3.3 – Значення ризику для 10 сценаріїв роботи I_2

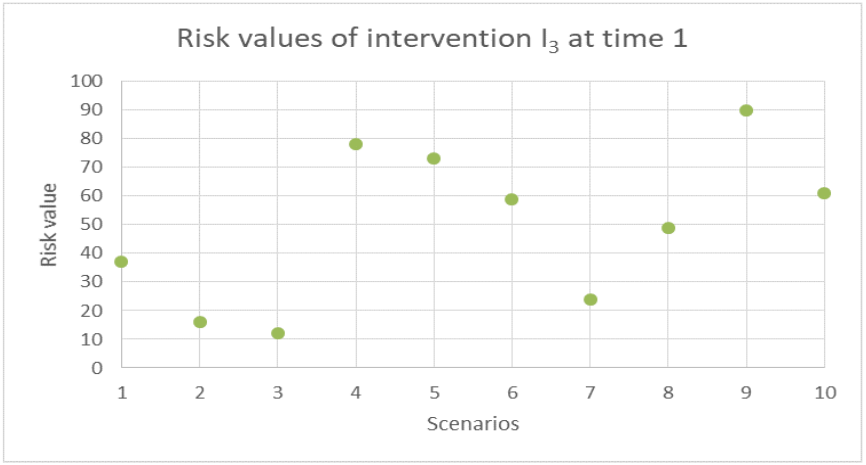


Рисунок 3.4 – Значення ризику для 10 сценаріїв роботи I_3

Далі можна вирахувати середній ризик, $Q_{0,9}$ квантиль (значення, яке ділить розподіл даних на певну частку), а потім очікуваний надлишок.

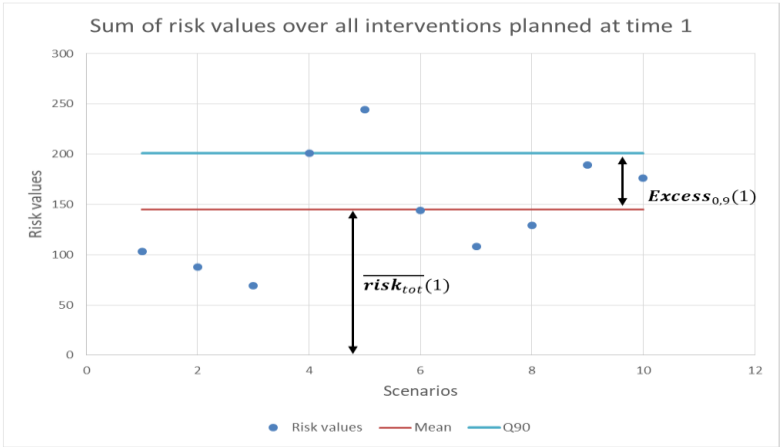


Рисунок 3.5 – Сума значень ризику для 10 сценаріїв.

Очікуваний надлишок плану:

$$obj_2(\tau) = \frac{1}{T}\sum_{t\in H} Excess(t). \quad (3.13)$$

Дві метрики, описані вище, вказані у євро. Однак, їх не можна обов'язково порівнювати безпосередньо, оскільки вони залежать від неприйняття ризику (або політики ризику). Саме тому коефіцієнт масштабування $\alpha \in [0,1]$ необхідний. Тоді остаточний критерій якості розкладу робіт матиме вигляд:

$$obj(\tau) = \alpha \times obj_1 + (1-\alpha) \times obj_2(\tau). \quad (3.14)$$

Мета полягає в тому, щоб знайти допустимий розклад із найменшим можливим значенням критерію.

Архітектура прототипу базується на класичній трирівневій структурі СУБД:

а) Рівень даних – набір взаємопов'язаних таблиць, що зберігають довідникову інформацію, поточні запаси, історію попиту, параметри моделі та результати розрахунків;

б) Рівень бізнес-логіки – реалізований через запити (Queries), макроси (Macros) та модулі VBA. Саме в модулях VBA інкапсульовані ключові алгоритми: генерація сценаріїв методом Монте-Карло, гібридний генетичний алгоритм оптимізації, розрахунок показників ризику (CVaR);

в) Рівень представлення – сформований за допомогою інтуїтивних форм (Forms) для введення даних та параметрів, а також звітів (Reports) для наочної візуалізації результатів у вигляді таблиць, графіків та діаграм [51, 52].

Структура бази даних та основні інтерфейсу.

Основні таблиці бази даних та їх призначення:

а) tblОбладнання – довідник МТР (код, назва, група A/B/C, вартість, витрати на зберігання, час поставки тощо);

б) tblПоточні_запаси – актуальні залишки на складах;

в) tblІсторія_відмов – архів даних про споживання (відмови) обладнання за попередні періоди;

г) tblСценарії_ризику – параметри для генерації сценаріїв (базова інтенсивність відмов, коефіцієнти сезонності, ФЗР);

д) tblРезультати_оптимізації – зберігає рекомендовані плани закупівель та розраховані показники ризику;

Робочий процес користувача організований через послідовність форм:

а) frmГоловне_меню – вихідний пункт для навігації;

б) frmВведення_даних – дозволяє оглядати та корегувати початкові дані (запаси, історію), імпортувати нові дані;

в) frmНалаштування_моделі – ключова форма для конфігурації експерименту. Користувач обирає горизонт планування, товарні групи, задає коефіцієнт неприйняття ризику (α) за допомогою повзунка, встановлює рівень CVaR. Кнопка "Запустити оптимізацію" ініціює розрахунок;

г) frmХід_виконання – інформаційна панель, що відображає прогрес обчислень (номер покоління ГА, найкраще значення фітнесу), забезпечуючи зворотний зв'язок.

frmЗвіт_рекомендацій – фінальна форма, що містить:

а) динамічну таблицю/графік рекомендованого рівня запасів по місяцях для кожного обраного виду МТР.

б) необхідний обсяг інвестицій у запаси, очікувана економія порівняно з політикою EOQ, значення CVaR.

в) кнопку "Експорт в Excel" для подальшого аналізу.

Завдяки такій структурі прототип слугує не лише демонстраційним, але й навчальним інструментом, що дозволяє персоналу компанії наочно переконатися у перевагах ризик-орієнтованого підходу та сформулювати вимоги до промислової версії системи.

ВИСНОВКИ

У ході дослідження було доведено, що ефективне управління запасами в умовах сучасної української енергетики неможливе на основі застарілих детермінованих моделей. Критичною потребою є перехід до адаптивних, ризик-орієнтованих систем, здатних враховувати стохастичну природу попиту та проактивно формувати резерви для протидії екстремальним загрозам. Виконання поставлених завдань дозволило отримати такі результати:

Специфіка діяльності та виклики в управлінні запасами для енергозбутової компанії були детально проаналізовані. Встановлено, що головною особливістю є високий ступінь невизначеності попиту на матеріально-технічні ресурси (МТР), обумовленої стохастичністю аварій, зносом обладнання, сезонними коливаннями та зовнішніми шоковими факторами, такими як наслідки бойових дій, погодні аномалії та критичний знос інфраструктури.

Теоретичні основи та можливості застосування еволюційних алгоритмів для оптимізації управління запасами були досліджені. Доведено, що класичні детерміновані моделі недостатньо ефективні, тоді як метаевристичні методи, зокрема генетичні алгоритми, є оптимальним інструментом для розв’язання складних стохастичних багатокритеріальних задач з обмеженнями.

Економіко-математична модель управління запасами МТР була успішно розроблена. Розроблена в роботі гібридна стохастично-еволюційна модель управління запасами, що поєднує генетичний алгоритм, метод Монте-Карло та критерій умовної вартості під ризиком (CVaR), є науково обґрунтованим та практично придатним рішенням цієї проблеми. Модель формалізує процес із цільовою функцією мінімізації очікуваних сукупних витрат за умови дотримання високого рівня оперативної готовності. Ключовою перевагою моделі є її здатність не лише мінімізувати очікувані сукупні витрати, але й жорстко контролювати ризик катастрофічних втрат від дефіциту критичних

матеріально-технічних ресурсів (МТР), таких як трансформатори та силовий кабель, демонструючи стійкість до зовнішніх шоків.

Реалізація моделі в середовищі Microsoft Access та оцінка її ефективності була успішно виконана. Реалізація моделі у вигляді функціонального прототипу системи підтримки прийняття рішень (СППР) на платформі MS Access підтверджує практичну можливість її впровадження. Прототип інтегрує збір даних, прогнозування, оптимізацію та візуалізацію результатів, перетворюючи складну математичну модель на доступний інструмент. Серія експериментів довела переваги моделі: зменшення очікуваних витрат на 5-15% порівняно з традиційними підходами та забезпечення рівня готовності понад 99% для критичних МТР навіть у стресових умовах.

Практичні рекомендації щодо впровадження розробленої моделі сформульовані, що включає поетапне впровадження, інтеграцію з IT-інфраструктурою, адаптацію та навчання персоналу, а також постійну калібрацію оделі.

Таким чином, робота має значну наукову новизну (поєднання інструментів стохастичного моделювання, еволюційної оптимізації та ризик-менеджменту), практичну цінність (готовий до адаптації інструмент з очікуваною річною економією 500-700 тис. грн для філії) та соціально-економічну значущість. Впровадження подібних розробок спрямоване на підвищення стійкості критичної інфраструктури, забезпечення енергетичної безпеки регіонів та оптимізацію використання коштів.

Перспективою подальших досліджень є масштабування моделі на рівень холдингу, її інтеграція з корпоративними ERP-системами та вдосконалення прогнозного модуля за допомогою методів машинного навчання для аналізу великих даних з мережі.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Енергетична стратегія України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність» : схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 18.08.2017 р. № 605-р. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/605-2017-%D1%80

2. Положення (стандарт) бухгалтерського обліку 9 «Запаси» : затв. Наказом М-ва фінансів України від 20.10.1999 р. № 246. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0751-99

3. Фролова Л. В. Механізм логістичного управління торговельним підприємством : монографія. Донецьк : ДонДУЕТ, 2015. 322 с.

4. Нестеренко М., Чернишова Н. Облік запасів: актуальні питання. *Податки & Бухоблік.* 2018. № 50. С. 15–21.

5. Григорак М. Ю. Логістичний менеджмент : підручник. Київ : Логос, 2017. 368 с.

6. Крикавський Є. В., Чорнописька Н. В. Логістика : підручник. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2019. 468 с.

7. Ларіна Р. Р. Логістика : навч. посіб. Донецьк : ДонДУЕТ, 2020. 273 с.

8. Сумець А. М. Логістика: теорія, ситуації, практичні завдання : навч. посіб. Київ : Хай-Тек Прес, 2018. 320 с.

9. Кузьмін О. Є., Мельник О. Г. Теоретичні та прикладні засади менеджменту: еволюція та сучасність. *Менеджмент та підприємництво в Україні*. 2018. С. 4–12.

10. Taha H. A. *Operations Research: An Introduction*. 10th ed. Pearson, 2017. 848 p.

11. Silver E. A., Pyke D. F., Peterson R. *Inventory Management and Production Planning and Scheduling*. 3rd ed. New York : Wiley, 1998. 754 p.

12. Петренко В. І. Специфіка формування страхових запасів в умовах воєнного стану. *Економіка України*. 2023. № 2. С. 45–56.

13. Ковальчук К. Ф., Бандоріна Л. М. Моделювання процесів управління запасами з урахуванням випадкового попиту. *Економічний вісник Донбасу*. 2019. № 2(56). С. 167–173.

14. Шпильовий В. А. Методи оптимізації в логістиці постачання. *Вісник східноукраїнського національного університету*. 2019. № 5. С. 44–50.

15. Баранова А. В. Удосконалення системи управління запасами на енергетичних підприємствах. *Ефективна економіка*. 2019. № 5. URL: http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=7050

16. Миронова Ю. Ю. Інструментарій управління запасами підприємства в умовах мінливого попиту. *Інфраструктура ринку*. 2020. Вип. 42. С. 189–194.

17. Матвійчук А. В. Штучний інтелект в економіці: нейронні мережі, нечітка логіка : монографія. Київ : КНЕУ, 2011. 439 с.

18. Пономаренко В. С., Клебанова Т. С., Резнікова В. В. Економічна кібернетика : підручник. Харків : ІНЖЕК, 2018. 624 с.

19. Олійник О. В. Генетичні алгоритми в задачах оптимізації економічних систем. *Науковий вісник Ужгородського університету*. 2021. Вип. 1(57). С. 98–104.

20. Тимощук М. Р. Оптимізація багатономенклатурних запасів з використанням еволюційних обчислень. *Штучний інтелект*. 2019. № 3. С. 56–64.

21. Глибовець М. М. Еволюційні алгоритми : навч. посіб. Київ : НаУКМА, 2014. 240 с.

22. Goldberg D. E. *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning. Boston : Addison-Wesley,* 1989. 412 p.

23. Holland J. H. *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. MIT Press, 1992. 232 p.

24. Про ринок електричної енергії : Закон України від 13.04.2017 р. № 2019-VIII. *Відомості Верховної Ради України*. 2017. № 27–28. Ст. 312. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2019-19

25. Про затвердження Кодексу систем розподілу : Постанова НКРЕКП від 14.03.2018 р. № 310. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0310874-18

26. Про затвердження Правил роздрібного ринку електричної енергії : Постанова НКРЕКП від 14.03.2018 р. № 312. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0312874-18

27. Харченко В. В. Надійність систем енергопостачання : підручник. Київ : НУБіП України, 2018. 312 с.

28. Лисенко Ю. Г. Економічна кібернетика: методологія та практика управління. *Економічний часопис-XXI.* 2016. № 158. С. 68–72.

29. Семенов А. Г. Моделювання логістичних процесів енергозбутових компаній. *Вісник Запорізького національного університету*. Економічні науки. 2020. № 1(45). С. 155–160.

30. Савченко М. В. Системи підтримки прийняття рішень: сучасний стан та перспективи. *Кібернетика і системний аналіз*. 2019. № 4. С. 115–125.

31. Ситник В. Ф. Системи підтримки прийняття рішень : навч. посіб. Київ : КНЕУ, 2009. 614 с.

32. Терещенко О. О. Фінансова діяльність суб'єктів господарювання : навч. посіб. Київ : КНЕУ, 2016. 554 с.

33. Ткаченко А. М. Управління матеріальними потоками на підприємствах ПЕК. *Економічний вісник*. 2021. № 3. С. 89–95.

34. Шевченко Л. С. Економічна безпека підприємства: сутність та механізм забезпечення. *Вісник Національної юридичної академії України*. 2018. № 2. С. 120–129.

35. Ястремський О. І. Моделювання економічного ризику : монографія. Київ : Либідь, 2015. 245 с.

36. Чубукова О. Ю. Інформаційні технології в економіці : навч. посіб. Київ : Київський національний університет технологій та дизайну, 2017. 420 с.

37. Бойко В. В. Оптимізація логістичних витрат підприємства в умовах невизначеності. *Бізнес Інформ*. 2020. № 3. С. 254–260.

38. Карпенко О. А. Ризик-менеджмент в діяльності енергопостачальних компаній. *Проблеми економіки*. 2018. № 1. С. 210–216.

39. Козін І. В. Нечіткі моделі оцінювання ризиків складних систем. *Системні дослідження та інформаційні технології*. 2017. № 2. С. 25–34.

40. Черваньов Д. М. Менеджмент інноваційно-інвестиційного розвитку підприємств України. Київ : Знання, 2016. 512 с.

41. Василенко В. О. Стратегічне управління матеріальними ресурсами в енергетиці. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2021. № 2. С. 112–116.

42. Шаповалова В. О., Максишко Н. К. Економічна кібернетика : конспект лекцій. Запоріжжя : ЗНУ, 2021. 91 с.

43. Соколовська З. М. Імітаційне моделювання економічних систем: теорія та практика. *Економічний простір*. 2018. № 133. С. 176–187.

44. Вовк В. М. Математичне моделювання в системах підтримки прийняття рішень. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. 2018. № 890. С. 15–22.

45. Іванов С. М. Застосування стохастичних моделей в управлінні запасами. *Моделювання та інформаційні системи в економіці*. 2020. № 99. С. 102–115.

46. Гончаров Ю. В. Використання ABC-XYZ аналізу для оптимізації запасів електротехнічної продукції. *Логістика: проблеми та перспективи*. 2019. С. 45–48.

47. Rockafellar R. T., Uryasev S. *Optimization of conditional value-at-risk. Journal of Risk*. 2000. Vol. 2. No. 3. P. 21–41.

48. Ящук В. І. Використання методу Монте-Карло для оцінки ризиків інвестиційних проєктів. *Фінанси України*. 2020. № 8. С. 102–111.

49. Бондар А. В. Розробка баз даних у Microsoft Access : практикум. Вінниця : ВНТУ, 2019. 120 с.

50. Ковальов С. В. Автоматизація бізнес-процесів засобами VBA. *Комп'ютерні системи та мережі*. 2018. С. 55–60.

51. Субботін С. О. Подання й обробка знань у системах штучного інтелекту та підтримки прийняття рішень : навч. посіб. Запоріжжя : ЗНТУ, 2008. 341 с.

52. Вітлінський В. В., Великоіваненко Г. І. Ризикологія в економіці та підприємництві : монографія. Київ : КНЕУ, 2004. 480 с.

ДОДАТОК А

Структура розподілу станції Запоріжжя-2 на рівні РП

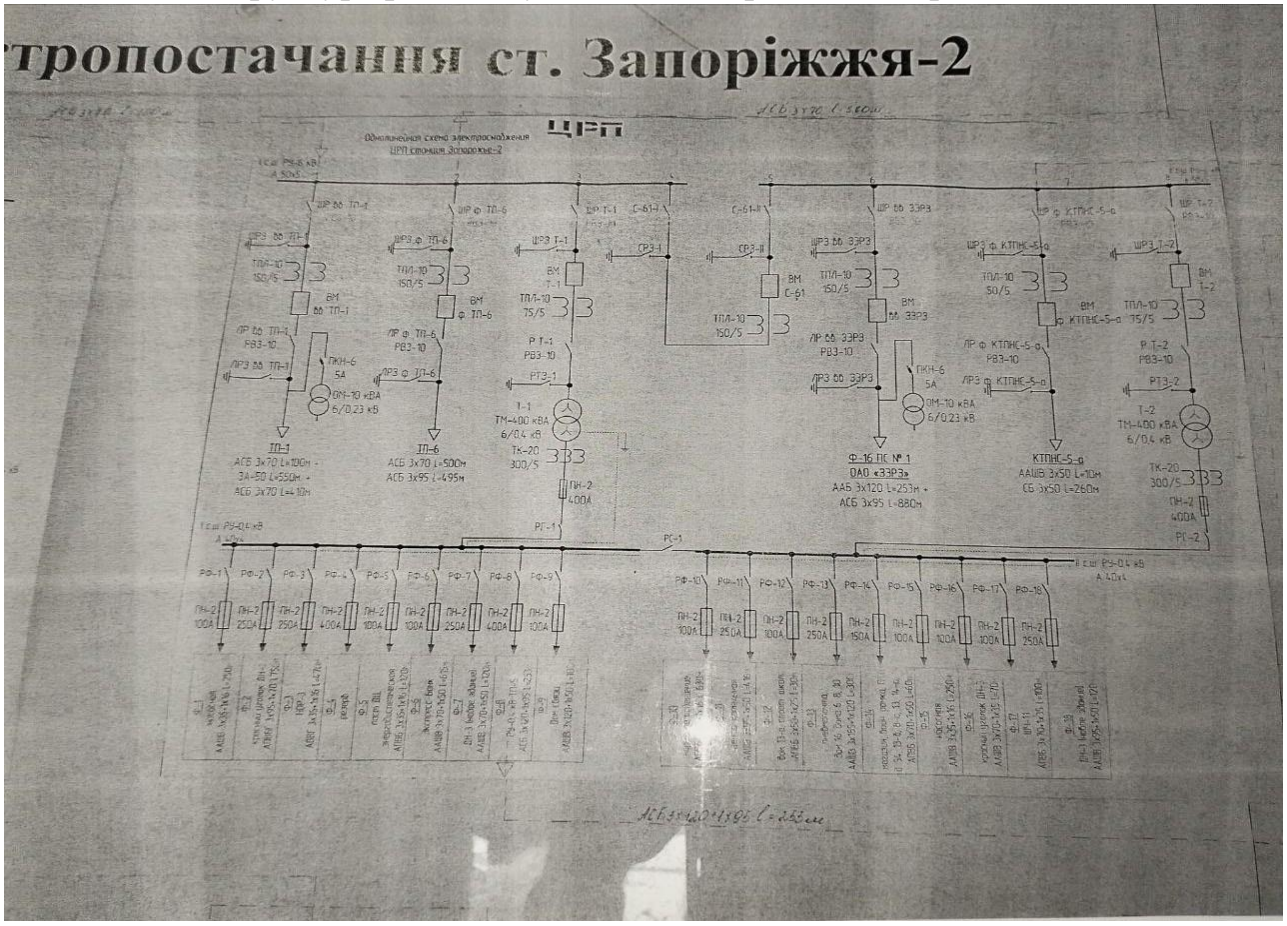


Рисунок А.1 – Структура розподілу станції Запоріжжя-2 на рівні РП

Джерело: філія Енергозбуту

ДОДАТОК Б

Структура розподілу станції Запоріжжя-2 на рівні ТП

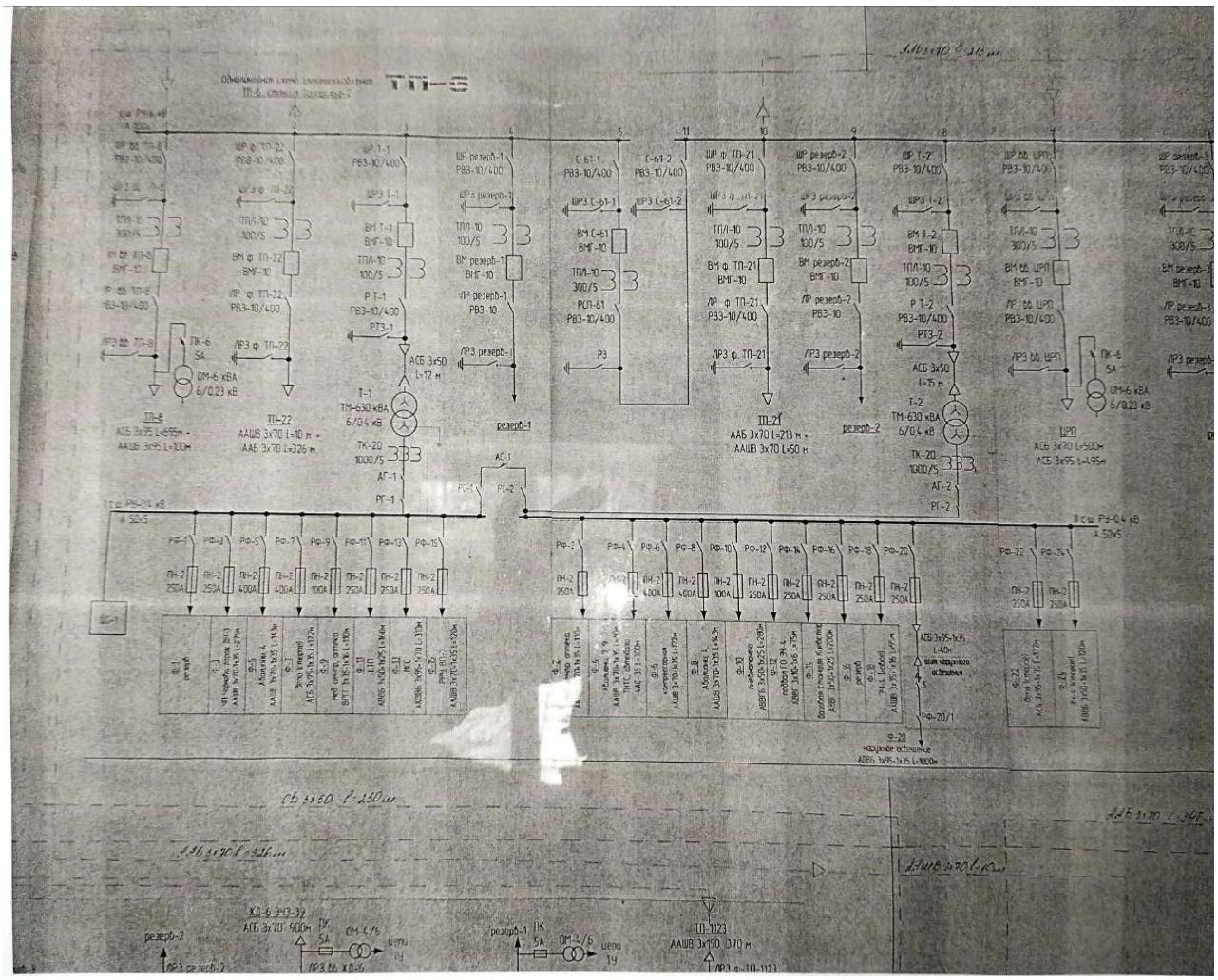


Рисунок Б. 1 – Структура розподілу станції Запоріжжя-2 на рівні ТП

Джерело: філія Енергозбуту

ДОДАТОК В

Фази існування системи Енергозбут

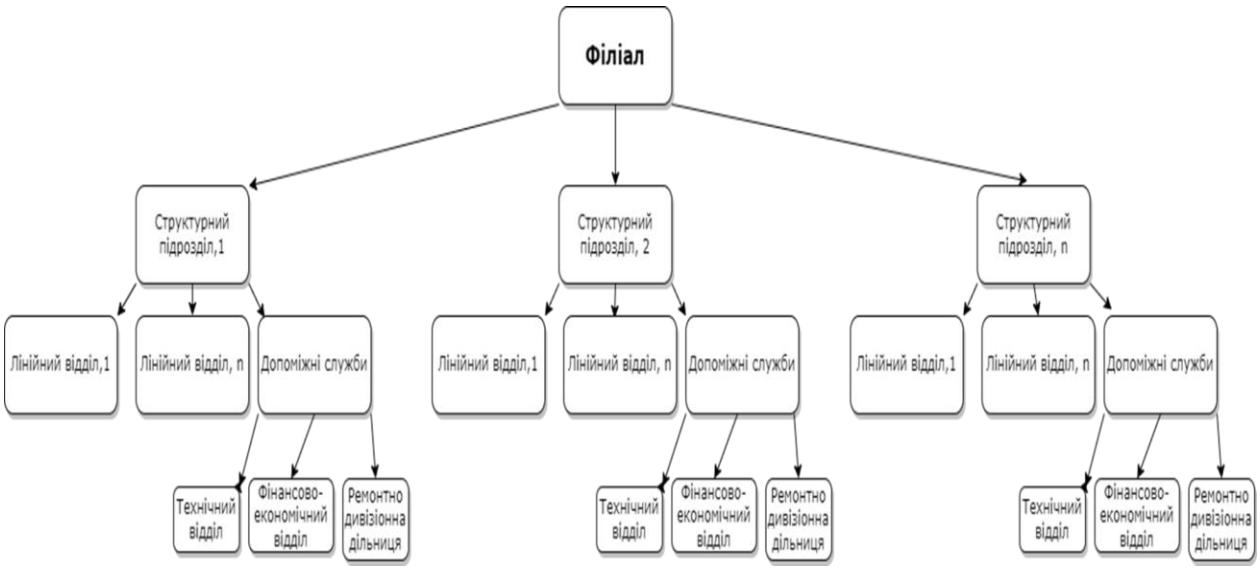


Рисунок В.1 – Графічне представлення фази існування системи Енергозбут

Джерело: побудовано автором на основі аналізу джерел

ДОДАТОК Г

Прототип СППР на платформі Microsoft Access

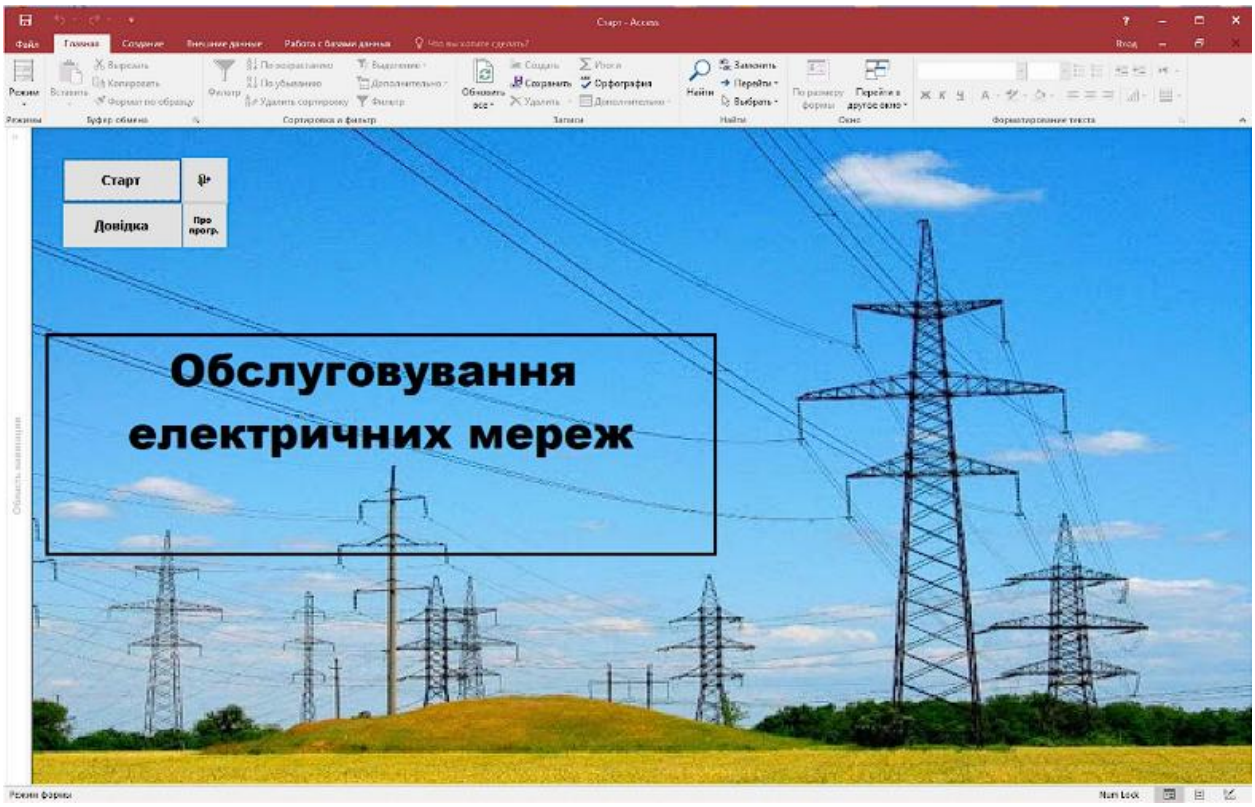


Рисунок Г.1 – Головне меню прототипу системи підтримки прийняття рішень на платформі Microsoft Access

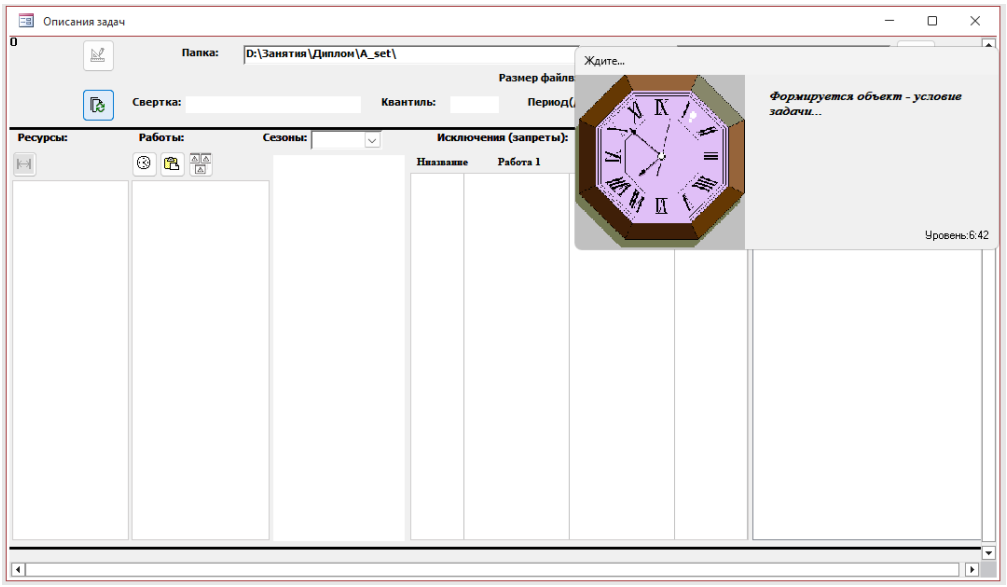


Рисунок Г.2 – Опрацювання вхідних даних для формування об’єкту та умов задачі

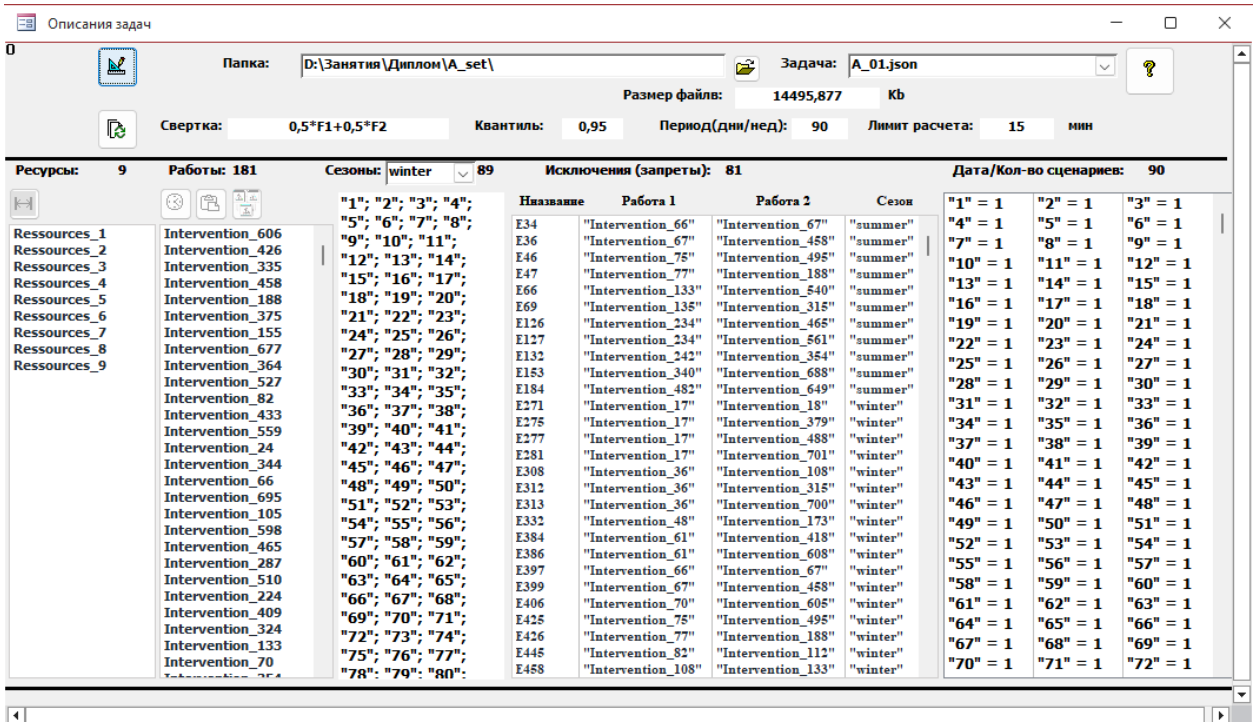


Рисунок Г.3 – Сформовані умови задачі для вибірки «A_01»

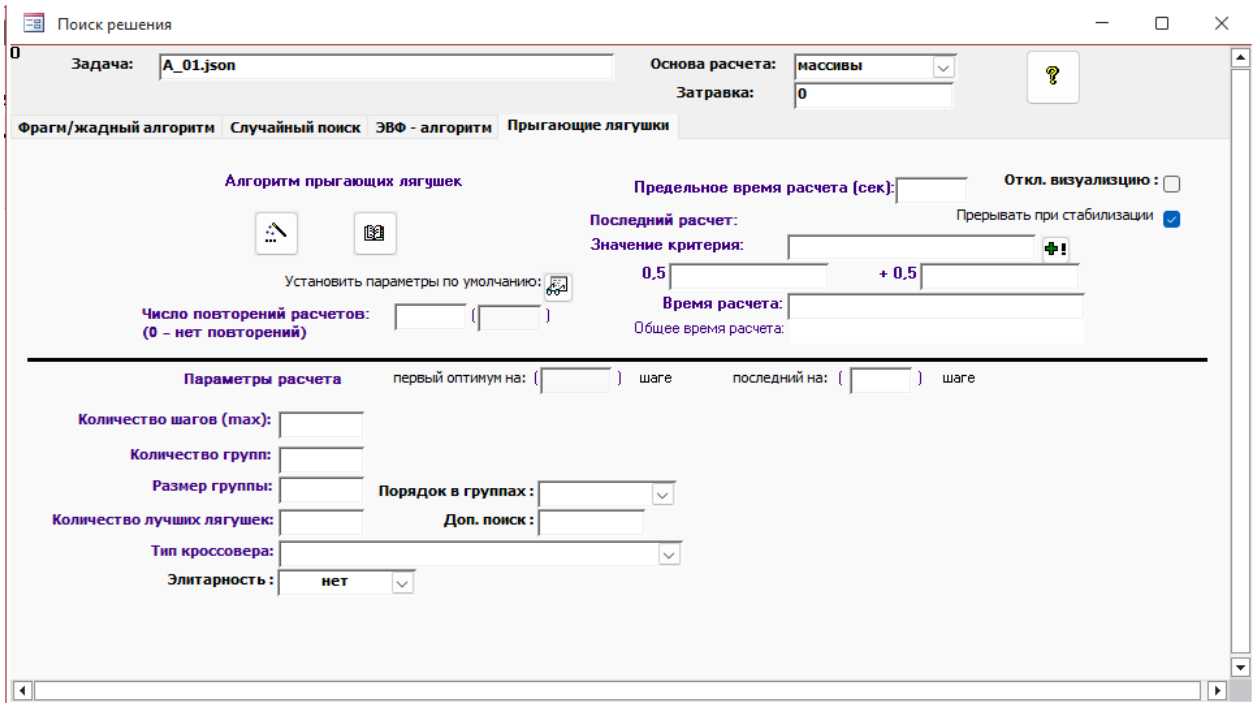


Рисунок Г.4 – Інтерфейс форми введення для алгоритму «Стрибаючих жаб»

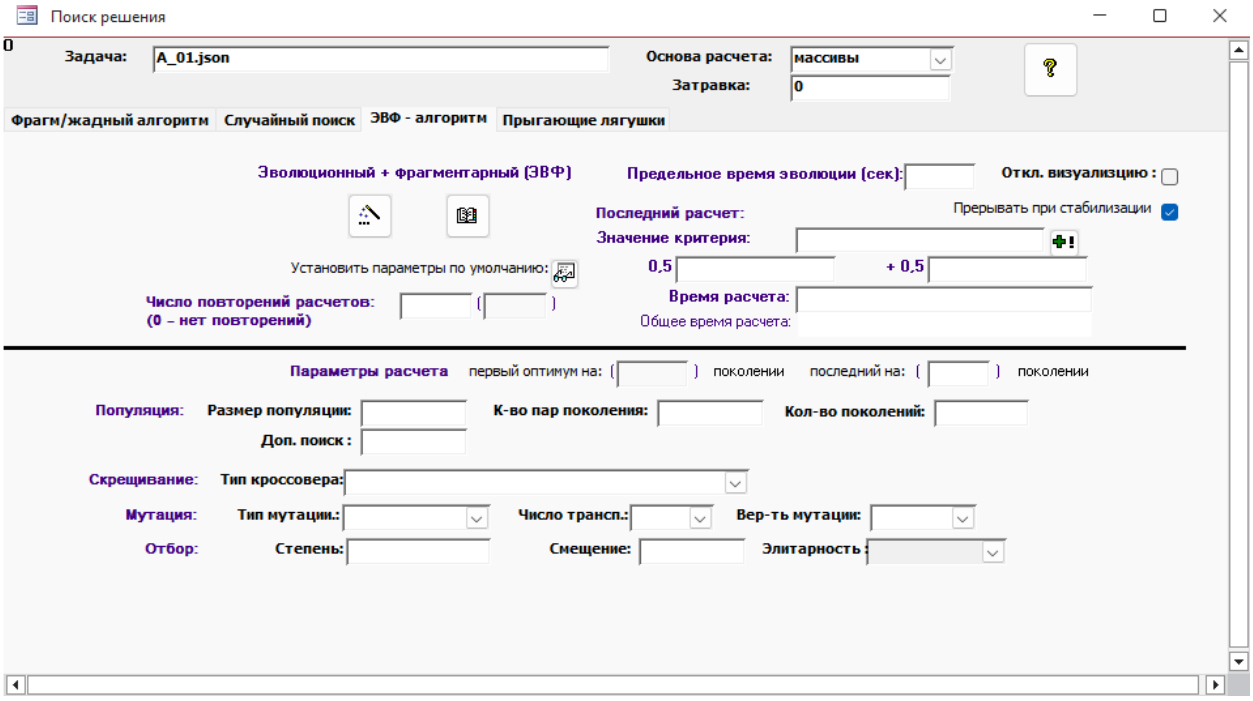


Рисунок Г.5 – Інтерфейс форми введення для «Еволюційно-фрагментарного алгоритму»

Декларація академічної доброчесності

здобувача вищої освіти ЗНУ

Я *Пшеничний Олександр Валерійович* , студент(ка) *другого* курсу, форми навчання *денна*, факультету *економічного* , спеціальності *051–Економіка*, адреса електронної пошти steamguard23@gmail.com ,

- підтверджую, що написана мною кваліфікаційна робота на тему «Моделювання процесів управління запасами в енергозбутових компаніях» відповідає вимогам академічної доброчесності та не містить порушень, що визначені у ст. 42 Закону України «Про освіту», зі змістом яких ознайомлений/ознайомлена;
- заявляю, що надана мною для перевірки електронна версія роботи є ідентичною її друкованій версії;
- згоден/згодна на перевірку моєї роботи на відповідність критеріям *академічної доброчесності у будь-який спосіб, у тому числі за допомогою* Інтернет-системи, а також на архівування роботи в базі даних цієї системи.

Дата_____ Підпис_____ ПІБ (студент) Пшеничний О.В. .

Дата_____ Підпис_____ ПІБ (науковий керівник) Козін І.В. .