

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра «Електротехнічні системи та енергетичний менеджмент»

“Допущено до захисту”
Зав. кафедри ЕТС та ЕМ
к.т.н., професор
_____ Петро ПЛЄШКОВ
“__” _____ 20__ р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за другим (магістерським) рівнем вищої
освіти

на тему:

«Оцінювання рівня енергоефективності промислового підприємства на основі базових показників енергоспоживання»

Виконав здобувач вищої освіти
II курсу, групи *ЕНМ-24М*
ОПП «Енергетичний менеджмент»
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»,

_____ Максим СУЛИМ
«__» _____ 2025 р.

Керівник роботи к.т.н., доцент
_____ Катерина ПЕТРОВА
«__» _____ 2025 р.

Рецензент _____

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра електротехнічних систем та енергетичного менеджменту

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Галузь знань 14 «Електрична інженерія»

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна програма Енергетичний менеджмент

ЗАТВЕРДЖУЮ:

завідувач кафедри ЕТС та ЕМ

к.т.н., професор

_____Петро ПЛЄШКОВ

«_____» _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

Сулима Максима Юрійовича

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи Оцінювання рівня енергоефективності промислового підприємства на основі базових показників енергоспоживання
Assessment of the energy efficiency level of an industrial enterprise based on basic energy consumption indicators

2. Керівник роботи Петрова Катерина Григорівна, к.т.н., доцент

(прізвище, ім'я, по-батькові, науковий ступінь, вчене звання)

3. Строк подання роботи до захисту 15.12.2025 р.

4. Мета та завдання кваліфікаційної роботи Мета кваліфікаційної роботи полягає у розробленні та практичному застосуванні методичного підходу до оцінювання енергоефективності промислового об'єкта на основі аналізу базових показників енергоспоживання з метою підвищення ефективності використання енергетичних ресурсів
Досягнення поставленої мети було забезпечене вирішенням завдань: 1) проаналізувати теоретичні основи енергоефективності та існуючі методи її оцінювання; 2) ідентифікувати систему базових показників енергоспоживання промислового підприємства; 3) розробити методичний підхід до комплексного оцінювання рівня енергоефективності; 4) провести оцінювання рівня енергоефективності на прикладі конкретного підприємства. 5) визначити основні напрями та сформулювати рекомендації з підвищення рівня енергоефективності промислового об'єкта

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Охорона праці	доц., к.т.н. Савеленко І.В.		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ	15.09.2025 р.	
2	Концептуальні засади оцінки ефективності використання енергоресурсів на підприємстві	29.09.2025 р.	
3	Інструменти контролю та підвищення енергорезультативності організацій	13.10.2025 р.	
4	Визначення та встановлення енерго-ефективності з урахуванням базового рівня	27.10.2025 р.	
5	Розроблення заходів підвищення енерго-ефективності підприємства з виробництва харчової упаковки	10.11.2025 р.	
6	Висновки, список використаних джерел	24.11.2025 р.	
7	Оформлення додатків	02.12.2025 р.	
8	Оформлення презентаційної частини КР	05.12.2025 р.	

Дата видачі завдання

« ___ » _____ 2025 р.

Підпис керівника

Катерина ПЕТРОВА

Завдання прийнято до виконання

« ___ » _____ 2025 р.

Підпис здобувача

Максим СУЛИМ

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота: 112 с., 19 рис., 55 табл., 15 джерел

Сулим М.Ю. Оцінювання рівня енергоефективності промислового підприємства на основі базових показників енергоспоживання. – Рукопис.

Кваліфікаційна робота за другим (магістерським) рівнем вищої освіти за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» освітньої програми «Енергетичний менеджмент». – Центральноукраїнський національний технічний університет; Кропивницький, 2025 р.

Мета кваліфікаційної роботи полягає у розробленні та практичному застосуванні методичного підходу до оцінювання енергоефективності промислового об'єкта на основі аналізу базових показників енергоспоживання з метою підвищення ефективності використання енергетичних ресурсів.

У роботі розкрито теоретичні засади енергоефективності як чинника конкурентоспроможності та сталого розвитку, проаналізовано сучасні методичні підходи до вимірювання енергетичної результативності та сформовано систему показників для її моніторингу. На прикладі підприємства з виробництва харчової упаковки проведено оцінку енергетичного профілю, визначено базовий рівень енергоспоживання та розроблено комплекс заходів підвищення енергоефективності. Отримані результати можуть бути використані для вдосконалення систем енергоменеджменту та реалізації програм енергозбереження на промислових підприємствах.

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ, ЕНЕРГОМЕНЕДЖМЕНТ, БАЗОВИЙ РІВЕНЬ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ, ЕНЕРГЕТИЧНА РЕЗУЛЬТАТИВНІСТЬ, ПРОМИСЛОВЕ ПІДПРИЄМСТВО

ABSTRACT

Qualification work: 112 p.; 19 fig.; 55 tables; 15 source

Sulym M.Yu. Assessment of the energy efficiency level of an industrial enterprise based on basic energy consumption indicators. - Manuscript.

Master's qualification work for the second (master's) level of higher education in the specialty 141 "Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics", educational program "Energy Management". – Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, 2025.

The purpose of the qualification work is to develop and practically apply a methodological approach to assessing the energy efficiency of an industrial facility based on the analysis of basic energy consumption indicators, aimed at improving the efficiency of energy resource utilization.

The study reveals the theoretical foundations of energy efficiency as a factor of competitiveness and sustainable development, analyzes modern methodological approaches to measuring energy performance, and forms a system of indicators for its monitoring.

Using the example of a food packaging manufacturing enterprise, an energy profile assessment was carried out, the baseline level of energy consumption was determined, and a set of measures to improve energy efficiency was developed. The obtained results can be used to enhance energy management systems and implement energy-saving programs at industrial enterprises.

ENERGY EFFICIENCY, ENERGY MANAGEMENT, BASELINE ENERGY CONSUMPTION, ENERGY PERFORMANCE, INDUSTRIAL ENTERPRISE

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	8
ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1. КОНЦЕПТУАЛЬНІ ЗАСАДИ ОЦІНКИ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ЕНЕРГОРЕСУРСІВ НА ПІДПРИЄМСТВІ.....	13
1.1. Енергоефективність як детермінанта конкуренто- спроможності та сталого розвитку підприємства.....	13
1.2. Методичні підходи та інструментарій оцінювання енергоефективності промислових підприємств.....	22
1.3. Система показників для діагностики та моніторингу енергетичної результативності підприємств.....	31
Висновки до розділу 1	34
РОЗДІЛ 2. ІНСТРУМЕНТИ КОНТРОЛЮ ТА ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОРЕЗУЛЬТАТИВНОСТІ ОРГАНІЗАЦІЙ.....	36
2.1. Оцінка енергоефективності через базовий рівень споживання відповідно до норм ISO/FDIS 50006:2023(E).....	36
2.2. Формування енергетичної базової лінії підприємства.....	45
2.3. Моделювання та прогнозування тенденцій енергоспоживання підприємств.....	54
Висновки до розділу 2.....	62
РОЗДІЛ 3. ВИЗНАЧЕННЯ ТА ВСТАНОВЛЕННЯ ЕНЕРГО- ЕФЕКТИВНОСТІ З УРАХУВАННЯМ БАЗОВОГО РІВНЯ.....	64
3.1 Підготовка вихідної інформації для аналітичного дослідження	64
3.2. Побудова моделі енергоспоживання підприємства: регресійний підхід.....	66
3.3. Побудова моделі енергоспоживання підприємства: експоненційне згладжування.....	77

3.4. Побудова базового рівня енергоспоживання підприємства за допомогою моделі ARIMA	86
Висновки до розділу 3	93
РОЗДІЛ 4. РОЗРОБЛЕННЯ ЗАХОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГО-ЕФЕКТИВНОСТІ ПІДПРИЄМСТВА З ВИРОБНИЦТВА ХАРЧОВОЇ УПАКОВКИ.....	95
4.1. Загальна характеристика підприємства та аналіз енергетичного профілю	95
4.2. Розроблення заходів підвищення енергоефективності підприємства..	96
Висновки до розділу 4	101
ВИСНОВКИ.....	104
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	106
ДОДАТКИ.....	108
ДОДАТОК А. Охорона праці.....	109

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

- БРЕ – базовий рівень енергоспоживання;
ЕБЛ – енергетична базова лінія;
ЕЕ – електрична енергія;
ПЕЕ – показник енергоефективності.

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасний етап розвитку економіки України характеризується зростанням уваги до питань енергоефективності як ключового чинника забезпечення конкурентоспроможності промислових підприємств та енергетичної безпеки держави. В умовах постійного зростання вартості енергоресурсів, дефіциту традиційних видів палива, необхідності зниження антропогенного навантаження на довкілля та виконання міжнародних зобов'язань щодо скорочення викидів парникових газів, питання підвищення ефективності використання енергії стає одним із пріоритетних напрямів розвитку промислового сектору.

Високий рівень енергоспоживання більшості українських підприємств зумовлює потребу у впровадженні системного підходу до оцінювання їхньої енергоефективності. Недостатня увага до аналізу базових показників енергоспоживання, відсутність єдиних критеріїв оцінки та ефективних інструментів моніторингу призводять до нераціонального використання енергоресурсів, перевитрат коштів та зниження рентабельності виробництва.

Оцінювання рівня енергоефективності на основі базових показників енергоспоживання дозволяє виявити основні напрями енергетичних втрат, сформулювати обґрунтовані управлінські рішення щодо оптимізації енергетичного балансу підприємства та розробити ефективні стратегії енергоменеджменту.

З огляду на стратегічний курс України на інтеграцію до Європейського Союзу, гармонізацію законодавства з директивами ЄС у сфері енергоефективності, а також реалізацію Національної енергетичної стратегії до 2050 року, питання розроблення методичного підходу до оцінювання енергоефективності промислових підприємств набуває особливої актуальності.

Отже, дослідження, спрямоване на оцінювання енергоефективності промислового об'єкта з врахуванням базових показників енергоспоживання, є своєчасним і має важливе практичне значення для підвищення ефективності

використання енергетичних ресурсів, зменшення енергоємності продукції та забезпечення сталого розвитку виробництва.

Результати проведеного дослідження можуть бути використані на різних рівнях управління енергоспоживанням — від окремого підприємства до галузевого та державного.

1. На рівні промислових підприємств – запропоновані підходи до оцінювання рівня енергоефективності дають змогу:

- виявляти основні напрями енергетичних втрат і неефективного використання ресурсів;
- формувати систему моніторингу та контролю енергоспоживання;
- розробляти програми підвищення енергоефективності виробництва;
- оцінювати ефективність реалізованих енергозберігаючих заходів;
- приймати обґрунтовані управлінські рішення щодо модернізації технологічного обладнання та оптимізації енергетичних витрат.

2. На рівні корпоративних структур та холдингів – результати можуть бути використані для створення внутрішніх стандартів енергоефективності, побудови систем енергоменеджменту відповідно до вимог міжнародних стандартів ISO 50001, а також для порівняльного аналізу енерговитрат між підприємствами однієї галузі.

3. На галузевому рівні – методика може стати основою для формування галузевих показників енергоефективності, енергетичних рейтингів підприємств, а також для розроблення рекомендацій щодо підвищення енергоефективності в окремих виробничих секторах.

4. На державному рівні – результати дослідження можуть бути використані під час реалізації політики енергозбереження, розроблення регіональних програм енергоефективності, підготовки статистичних звітів щодо динаміки енергоспоживання та виконання міжнародних зобов'язань України у сфері скорочення викидів парникових газів.

5. У науковій та освітній діяльності – матеріали дослідження можуть бути використані для подальших наукових розробок у галузі енергоменеджменту, енергетичного аудиту, а також у процесі викладання дисциплін, пов'язаних із енергоефективністю, економікою енергетики та сталим розвитком.

Мета дослідження полягає у розробленні та практичному застосуванні методичного підходу до оцінювання енергоефективності промислового об'єкта на основі аналізу базових показників енергоспоживання з метою підвищення ефективності використання енергетичних ресурсів.

Для досягнення поставленої мети у роботі визначено такі **завдання**:

1. Проаналізувати теоретичні основи енергоефективності та існуючі методи її оцінювання.
2. Ідентифікувати систему базових показників енергоспоживання промислового підприємства.
3. Розробити методичний підхід до комплексного оцінювання рівня енергоефективності.
4. Провести оцінювання рівня енергоефективності на прикладі конкретного підприємства.
5. Визначити основні напрями підвищення енергоефективності та сформулювати рекомендації щодо зменшення енергоємності виробництва.

Об'єктом дослідження є процес енергоспоживання промислового підприємства в системі його виробничо-господарської діяльності.

Предметом дослідження є методичні підходи, показники та інструменти оцінювання рівня енергоефективності промислових об'єктів на основі аналізу базових енергетичних характеристик.

Таким чином, актуальність теми зумовлена необхідністю підвищення рівня енергоефективності промислових об'єктів України в умовах енергетичних викликів та євроінтеграційних процесів. Реалізація поставленої мети та завдань роботи дозволить розробити практично орієнтований підхід до оцінювання рівня енергоефективності на основі базових показників

енергоспоживання, що сприятиме оптимізації використання енергетичних ресурсів, зниженню витрат виробництва та підвищенню конкурентоспроможності підприємств. Отримані результати можуть стати основою для формування ефективної системи енергоменеджменту та подальших наукових досліджень у сфері енергетичної сталості промисловості.

РОЗДІЛ 1

КОНЦЕПТУАЛЬНІ ЗАСАДИ ОЦІНКИ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ЕНЕРГОРЕСУРСІВ НА ПІДПРИЄМСТВІ

1.1. Енергоефективність як детермінанта конкуренто-спроможності та сталого розвитку підприємства

Енергоефективність є одним із ключових напрямків сучасної економічної політики та стратегічного розвитку підприємств у контексті глобальних викликів, пов'язаних із вичерпанням природних ресурсів, зміною клімату та необхідністю переходу до сталого розвитку. У широкому розумінні енергоефективність відображає ступінь раціонального використання енергетичних ресурсів для досягнення визначених виробничих, економічних чи соціальних цілей. Відповідно до Закону України "Про енергетичну ефективність" від 2021 року, енергоефективність визначається як "характеристика виробничого процесу, будівлі, споруди, будинку, установки чи обладнання, що полягає у виробництві продукції, надання послуг, у проведенні будівельних робіт з певним рівнем якості за мінімального (порівняно з відповідними технічними, технологічними та економічними можливостями) використання паливно-енергетичних ресурсів".

На разі існують різні підходи до трактування поняття енергоефективності, розглянемо основні з них (табл.1.1).

Таблиця 1.1 – Огляд підходів до визначення поняття "енергоефективність" [1-8]

№ з\п	Джерело	Визначення	Ключовий акцент
1	2	3	4
1	Міжнародне енергетичне агентство (IEA)	Співвідношення між обсягом виробленої продукції (послуг) та витраченою енергією	Технічний аспект

Продовження табл. 1.1

1	2	3	4
2	Європейська директива 2012/27/ЄС	Співвідношення між результатом діяльності та витратами енергії	Результативність
3	Національний стандарт України ДСТУ ISO 50001:2020	Комплексна характеристика раціонального використання енергоресурсів в організації	Системний підхід
4	Енергетична стратегія України до 2035 р.	Ефективність перетворення, передачі та споживання енергії для виробництва продукції	Виробничий аспект
5	ISO 50001:2018 (міжнародний стандарт)	Відношення чи інша кількісна залежність між результатами діяльності та енергією	Стандартизація

Згідно з технічним підходом, енергоефективність може бути виражена через показник питомої енергоємності, який визначають:

$$EE = Q / E \quad (1.1)$$

де складовими є визначений обсяг виробленої продукції (чи наданих послуг) Q , а також визначений обсяг спожитої енергії на об'єкті дослідження (E).

Альтернативно використовують й показник енергоємності продукції:

$$Ee = E / Q \quad (1.2)$$

де складовими є безпосередньо витрати енергії на виробництво (E) та фактичний обсяг виробленої продукції (Q).

Енергетичний баланс промислового підприємства характеризується складною структурою споживання різних видів енергоносіїв. За даними Державного агентства з енергоефективності та енергозбереження України, типова структура енергоспоживання промислових підприємств набуває вигляду, поданого в табл.1.2.

Таблиця 1.2 – Структура енергоспоживання промислових підприємств України (2024 р.)

№ з\п	Вид енергоносія	Частка, %	Основні напрямки використання
1	Природний газ	42-48	Технологічні процеси, опалення, виробництво пари
2	Електроенергія	28-35	Електроприводи, освітлення, технологічні процеси
3	Вугілля та кокс	12-18	Металургійні процеси, теплогенерація
4	Нафтопродукти	5-8	Транспорт, резервні джерела енергії
5	Альтернативні джерела	2-5	Відновлювані джерела енергії, вторинні ресурси

Розподіл енергоспоживання за виробничими процесами також має суттєве значення для аналізу енергоефективності (див. табл. 1.3).

Таблиця 1.3 – Розподіл енергоспоживання за виробничими процесами

№ з\п	Напрямок споживання	Частка від загального енергоспоживання, %
1	Основне виробництво (технологічні процеси)	55-65
2	Допоміжне виробництво (вентиляція, компресори, насоси)	15-20
3	Опалення та кондиціонування	8-12
4	Освітлення	3-5
5	Господарсько-побутові потреби	2-4
6	Втрати в мережах та обладнанні	8-15

Підвищення енергоефективності відіграє багатогранну роль у діяльності сучасного підприємства, впливаючи на ключові аспекти його функціонування та розвитку.

Енергетичні витрати становлять значну частку в собівартості продукції промислових підприємств. За даними аналітичних досліджень, частка енергетичної складової в собівартості продукції різних галузей промисловості України коливається в широких межах див. табл.1.4.

Таблиця 1.4 – Частка енергетичної складової в собівартості продукції за галузями (2023-2024 рр.)

№ з\п	Галузь промисловості	Частка енерговитрат у собівартості, %	Потенціал економії, %
1	2	3	4
1	Металургія	25-35	15-25
2	Хімічна промисловість	20-30	20-30
3	Целюлозно-паперова промисловість	18-25	15-20

Продовження табл. 1.4

1	2	3	4
4	Виробництво будівельних матеріалів	15-22	18-25
5	Машинобудування	8-15	10-15
6	Харчова промисловість	10-18	12-18
7	Легка промисловість	6-12	10-15

Річний економічний ефект від впровадження енергоефективних заходів може бути розрахований за формулою:

$$E_{ек} = (E_{в1} - E_{в2}) \times Ц - К / T \quad (1.3)$$

де фігурують: обсяги споживання енергії до та після впровадження заходів ($E_{в1}$ та $E_{в2}$ відповідно); фактичне значення вартості енергоносія ($Ц$); капітальні витрати на впровадження ($К$); термін окупності проекту (T).

Зниження енергоємності продукції на 10% може призвести до зменшення собівартості на 2-5% залежно від галузі, що безпосередньо впливає на прибутковість та конкурентоспроможність підприємства.

Підвищення енергоефективності має пряме відношення до зменшення негативного впливу на довкілля. Скорочення споживання енергії призводить до зменшення викидів парникових газів та інших забруднюючих речовин (див. табл.1.5)

Таблиця 1.5 – Зв'язок між енергоспоживанням та викидами CO₂

№ з/п	Енергоносій	Викиди CO ₂ , кг/ГДж	Супутні забруднюючі речовини
1	2	3	4
1	Природний газ	56,1	NO _x , SO ₂ (мінімальні)

Продовження табл. 1.5

1	2	3	4
2	Вугілля	94,6	NO _x , SO ₂ , тверді частинки
3	Мазут	77,4	NO _x , SO ₂ , важкі метали
4	Електроенергія (мережева)	85,0*	Непрямі викиди на ТЕС

*Залежить від структури генерації електроенергії в країні

Відповідно до зобов'язань України в рамках Паризької угоди, країна має скоротити викиди парникових газів на 65% до 2030 року порівняно з рівнем 1990 року. Підвищення енергоефективності промислових підприємств є ключовим інструментом досягнення цієї мети.

Таблиця 1.6 – Динаміка зростання цін на енергоносії в Україні (2020-2024 рр.)

Енергоносій	2020 (базовий рік = 100%)	2022	2024	Середньорічне зростання
Природний газ для промисловості	100%	285%	320%	+35%
Електроенергія (промислові тарифи)	100%	165%	195%	+18%
Вугілля	100%	240%	275%	+28%

У контексті енергетичної безпеки та незалежності підприємства, особливо в умовах волатильності цін на енергоносії та геополітичної

нестабільності, енергоефективність набуває стратегічного значення. Зниження енергозалежності дозволяє:

- Зменшити вплив зовнішніх ризиків на виробничу діяльність
- Підвищити стабільність операційних витрат
- Забезпечити довгострокову конкурентоспроможність
- Створити резерви для інвестицій у розвиток

Енергоефективність підприємства впливає на соціальну відповідальність бізнесу та його репутацію. Компанії, що демонструють високі показники енергоефективності:

- Отримують кращий доступ до міжнародних ринків капіталу
- Підвищують інвестиційну привабливість
- Покращують корпоративний імідж
- Відповідають вимогам ESG-критеріїв (Environmental, Social, Governance)

Governance)

Енергоефективність підприємства формується під впливом комплексу внутрішніх та зовнішніх факторів, які можна систематизувати наступним чином:

Таблиця 1.7 – Класифікація факторів впливу на енергоефективність підприємства

Група факторів	Конкретні фактори	Характер впливу
Технологічні	Рівень зношеності обладнання	Критичний
	Застосування енергоефективних технологій	Високий
	Автоматизація виробничих процесів	Середній
Організаційні	Система енергетичного менеджменту	Високий
	Кваліфікація персоналу	Середній

Продовження табл.1.7

Група факторів	Конкретні фактори	Характер впливу
	Культура енергоспоживання	Середній
Економічні	Рівень інвестицій в енергозбереження	Критичний
	Ціни на енергоносії	Високий
	Доступ до фінансування	Високий
Нормативно-правові	Вимоги законодавства	Високий
	Система стимулів та санкцій	Середній
	Стандарти та сертифікація	Середній

За оцінками експертів, потенціал підвищення енергоефективності на промислових підприємствах України становить 25-40%, що еквівалентно 15-20 млрд м³ природного газу щорічно або приблизно 8-10 млрд доларів США в грошовому вираженні.

Провідні країни світу демонструють суттєві успіхи в підвищенні енергоефективності економіки. Порівняльний аналіз показників енергоємності ВВП наведено в таблиці 1.8.

Таблиця 1.8 – Енергоємність ВВП у різних країнах світу (2023 р.)

Країна	Енергоємність ВВП, кг н.е./1000 дол. США	Зміна за 10 років, %
Норвегія	65	-22%
Японія	82	-18%
Німеччина	95	-25%

Продовження табл.1.8

Країна	Енергоємність ВВП, кг н.е./1000 дол. США	Зміна за 10 років, %
Велика Британія	78	-30%
США	115	-20%
Китай	135	-32%
Польща	165	-28%
Україна	285	-15%

Як видно з таблиці, Україна значно поступається розвиненим країнам за показниками енергоефективності, що свідчить про наявність значного потенціалу для покращення.

Отже, енергоефективність є комплексною характеристикою діяльності підприємства, що відображає ступінь раціональності використання енергетичних ресурсів для досягнення виробничих цілей. Підвищення енергоефективності відіграє ключову роль у забезпеченні економічної стабільності, екологічної безпеки та стратегічної конкурентоспроможності підприємства.

Проведений аналіз показує, що енергетична складова в собівартості продукції промислових підприємств становить від 6% до 35% залежно від галузі, при цьому потенціал економії енергоресурсів оцінюється на рівні 10-30%. Енергоємність економіки України майже втричі перевищує показники розвинених європейських країн, що актуалізує необхідність системної роботи з підвищення енергоефективності на рівні окремих підприємств.

1.2. Методичні підходи та інструментарій оцінювання енергоефективності промислових підприємств

Оцінювання енергоефективності промислових підприємств є складним багатоаспектним процесом, що потребує використання комплексу методичних підходів та інструментів. У науковій літературі та практиці управління енергоспоживанням сформувалося кілька основних методичних підходів до оцінки енергоефективності, кожен з яких має свої переваги та обмеження. У вигляді табл. 1.9 подано систематизований набір існуючих методичних підходів до оцінювання енергоефективності промислових об'єктів.

Таблиця 1.9 – Класифікація методичних підходів до оцінювання енергоефективності промислових підприємств

Підхід	Сутність	Основні показники	Переваги	Обмеження
Ресурсний	Оцінка абсолютних та питомих показників споживання енергоресурсів	Енергоемність, питоми споживання, коефіцієнт корисного використання	Простота розрахунків, можливість порівняння в динаміці	Не враховує якісні характеристики та економічну ефективність
Економічний	Оцінка вартісних показників та економічної ефективності	Частка енергозатрат у собівартості, рентабельність, термін окупності	Обґрунтування інвестиційних рішень	Залежність від цінової кон'юнктури
Технологічний	Оцінка технічного рівня обладнання та процесів	ККД обладнання, коефіцієнт завантаження, втрати енергії	Виявлення технічних резервів	Складність комплексної оцінки
Процесний	Оцінка через призму бізнес-процесів енергоменеджменту	Показники результативності процесів за ISO 50001	Системність, цикл покращення PDCA	Потребує розвиненої системи менеджменту
Комплексний	Інтегральна багатокритеріальна оцінка	Інтегральні індекси, зважені показники	Об'єктивність, всебічність оцінки	Складність розрахунків, суб'єктивність вагових коефіцієнтів

Ресурсний підхід базується на оцінці абсолютних та питомих показників споживання енергоресурсів. Основним показником є енергоємність продукції, що розраховується за формулою:

$$E = Q_e / V_p \quad (1.4)$$

де E – показник енергоємності продукції, кг у.п./грн або кВт·год/грн; Q_e – значення загального споживання енергоресурсів в умовному паливі, кг у.п. або в натуральних одиницях, кВт·год; V_p – значення обсягу виробленої продукції в натуральному або вартісному вимірі.

Показник питомого споживання на одиницю продукції визначається як:

$$q_i = \frac{Q_i}{P} \quad (1.5)$$

де відповідно значення питомого споживання i -того виду енергоресурсу, споживання i -того виду енергоресурсу за визначений період та фактична кількість виробленої продукції, що подається в натуральних одиницях.

Крім того, коефіцієнт корисного використання енергії характеризує ефективність перетворення енергії:

$$\eta = \frac{E_{\text{корисна}}}{E_{\text{витрачена}}} \times 100\% \quad (1.6)$$

Економічний підхід орієнтований на оцінку вартісних показників енергоспоживання. Частка енергетичних витрат у собівартості продукції визначається за формулою:

$$C_{\text{ен}} = \frac{E_{\text{витрати}}}{C_{\text{прод}}} \times 100\% \quad (1.7)$$

$C_{\text{ен}}$ — частка енергетичних витрат у %;

$E_{\text{витрати}}$ — витрати на енергоресурси у грошовому вираженні;

$C_{\text{прод}}$ — повна собівартість продукції у грошовому вираженні.

Економічна ефективність енергозберігаючих заходів оцінюється через чистий дисконтований дохід (NPV):

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+r)^t} - I_0 \quad (1.8)$$

де CF_t – грошовий потік у періоді t від економії енергоресурсів; r – ставка дисконтування; n – термін реалізації проекту; I_0 – початкові інвестиції.

Термін окупності інвестицій в енергоефективність:

$$T_{\text{окуп}} = \frac{I_0}{E_{\text{річна}}} \quad (1.9)$$

де $E_{\text{річна}}$ – річна економія коштів від зниження енергоспоживання, грн/рік.

Технологічний підхід передбачає оцінку ефективності енергетичного обладнання. Коефіцієнт завантаження обладнання:

$$K_{\text{зав}} = \frac{Q_{\text{факт}}}{Q_{\text{ном}}} \times 100\% \quad (1.10)$$

$Q_{\text{факт}}$ – фактичне споживання енергії обладнанням; $Q_{\text{ном}}$ – номінальна потужність обладнання.

Коефіцієнт втрат енергії при транспортуванні:

$$K_{\text{вт}} = \frac{Q_{\text{вт}}}{Q_{\text{відп}}} \times 100\% \quad (1.11)$$

$Q_{\text{вт}}$ – втрати енергії при транспортуванні; $Q_{\text{відп}}$ – відпущена енергія.

Комплексна оцінка енергоефективності підприємства здійснюється на основі системи показників, що характеризують різні аспекти енергоспоживання (табл. 1.2).

Балансовий метод є базовим інструментом аналізу енергоспоживання. Загальне рівняння енергетичного балансу підприємства має вигляд:

$$Q_{\text{надх}} + Q_{\text{вироб}} = Q_{\text{викор}} + Q_{\text{вт}} + Q_{\text{відп}} \quad (1.12)$$

Таблиця 1.2 – Система показників оцінки енергоефективності промислового підприємства

Група показників	Показник	Формула розрахунку	Одиниці виміру
Абсолютні показники	Загальне споживання енергоресурсів	$Q_{заг} = \sum Q_i \times k_i$	т у.п., ГДж
	Споживання ЕЕ	Q_e	кВт·год
	Споживання теплової енергії	Q_T	Гкал, ГДж
	Споживання природного газу	Q_G	тис. м ³
Відносні (питомі) показники	Енергоємність продукції	$E = Q_{заг} / V_p$	кг у.п./тис. грн
	Електроємність продукції	$E_e = Q_e / V_p$	кВт·год/тис. грн
	Теплоємність продукції	$E_T = Q_T / V_p$	Гкал/тис. грн
	Питомі витрати на од. продукції	$q = Q / N$	кВт·год/од., Гкал/т
Структурні показники	Частка і-го енергоносія	$d_i = Q_i / Q_{заг} \times 100\%$	%
	Частка понов. джерел	$d_{ВДЕ} = Q_{ВДЕ} / Q_{заг} \times 100\%$	%
Економічні показники	Частка енергозатрат у собівартості	$d_e = C_e / C_{повна} \times 100\%$	%
	Рентабельність енергозбереження	$R_e = (E_{річна} / I_0) \times 100\%$	%
	Вартість одиниці енергії	$c = C_e / Q_e$	грн/кВт·год
Технічні показники	ККД обладнання	$\eta = (Q_{кор} / Q_{затр}) \times 100\%$	%
	Коефіцієнт використання потужності	$k_p = N_{факт} / N_{встан}$	від 0 до 1
	Коефіцієнт втрат в мережах	$k_{втр} = Q_{втр} / Q_{відп} \times 100\%$	%
Динамічні показники	Індекс енергоємності	$I_E = E_1 / E_0$	від 0 до n
	Темп зниження енергоспоживання	$T_{зн} = (Q_0 - Q_1) / Q_0 \times 100\%$	%

де $Q_{надх}$ – надходження енергоресурсів ззовні; $Q_{вироб}$ – власне виробництво енергії; $Q_{викор}$ – корисне використання енергії на технологічні потреби; $Q_{втр}$ – втрати енергії; $Q_{відп}$ – відпуск енергії стороннім споживачам.

Структура енергетичного балансу промислового підприємства наведена в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 – Структура енергетичного балансу промислового підприємства

Стаття балансу	Зміст	Розрахунок, %
АКТИВ (надходження)		
Надходження ззовні	Закуплена електроенергія, теплоенергія, паливо	$Q_{закуп} / Q_{заг} \times 100\%$
Власне виробництво	Когенерація, відновлювані джерела	$Q_{власн} / Q_{заг} \times 100\%$
Утилізація вторинних ресурсів	Теплота відхідних газів, конденсату тощо	$Q_{втор} / Q_{заг} \times 100\%$
Разом надходження		100%
ПАСИВ (використання)		
Технологічні потреби	Основне виробництво	$Q_{техн} / Q_{заг} \times 100\%$
Допоміжні процеси	Компресори, вентиляція, освітлення	$Q_{доп} / Q_{заг} \times 100\%$
Господарські потреби	Опалення, гаряче водопостачання	$Q_{госп} / Q_{заг} \times 100\%$
Втрати при транспортуванні	Втрати в мережах, трубопроводах	$Q_{втр.тр} / Q_{заг} \times 100\%$
Втрати при перетворенні	Втрати в трансформаторах, котлах	$Q_{втр.перетв} / Q_{заг} \times 100\%$
Відпуск стороннім	Продаж надлишкової енергії	$Q_{прод} / Q_{заг} \times 100\%$
Разом використання		100%

Коефіцієнт корисного використання енергії за балансом:

$$\eta_{бал} = \frac{Q_{викор}}{Q_{надх} + Q_{вироб}} \times 100\% \quad (1.13)$$

Коефіцієнт загальних втрат:

$$K_{вт} = \frac{Q_{втр} + Q_{відп}}{Q_{надх} + Q_{вироб}} \times 100\% \quad (1.14)$$

Індексний метод дозволяє оцінити вплив окремих факторів на зміну енергоємності продукції. Загальна зміна енергоємності описується мультиплікативною моделлю:

$$\Delta E = E_1 - E_0 \quad (1.15)$$

Для факторного аналізу використовується модель:

$$E = \frac{\sum_i q_i N_i}{\sum_i p_i N_i} \quad (1.16)$$

де q_i – питома споживання енергії на i -тий вид продукції; N_i – обсяг виробництва i -того виду продукції в натуральних одиницях; p_i – ціна i -того виду продукції.

Індекс енергоємності змінного складу:

$$I_E = \frac{\sum_i q_i^{\text{поточн}} N_i^{\text{баз}}}{\sum_i q_i^{\text{баз}} N_i^{\text{баз}}} \quad (1.17)$$

Абсолютна зміна енергоємності за рахунок:

– зміни питомих витрат енергії:

$$\Delta E_q = \sum_i (q_i^{\text{поточн}} - q_i^{\text{баз}}) N_i^{\text{баз}} \quad (1.18)$$

– зміни структури виробництва:

$$\Delta E_N = \sum_i q_i^{\text{баз}} (N_i^{\text{поточн}} - N_i^{\text{баз}}) \quad (1.19)$$

Для узагальненої оцінки енергоефективності використовується інтегральний показник, що розраховується методом таксономічного аналізу або методом адитивної згортки:

$$K_{\text{інт}} = \sum_{j=1}^n w_j k_j \quad (1.20)$$

де w_j – ваговий коефіцієнт j -го показника ($\sum w_j = 1$); k_j – нормалізоване значення j -го показника; n – кількість показників.

Нормалізація показників здійснюється за формулою:

– для показників-стимуляторів (зростання яких є позитивним):

$$k_j = \frac{x_j - x_j^{\min}}{x_j^{\max} - x_j^{\min}} \quad (1.21)$$

– для показників-дестимуляторів (зниження яких є позитивним):

$$k_j = \frac{x_j^{\max} - x_j}{x_j^{\max} - x_j^{\min}} \quad (1.22)$$

де x_j – фактичне значення показника; x_j^{\min}, x_j^{\max} – мінімальне та максимальне значення показника в сукупності підприємств.

Інтегральний показник приймає значення від 0 до 1, де значення ближче до 1 свідчить про вищий рівень енергоефективності.

Теоретичний потенціал енергозбереження визначається як різниця між фактичним та технічно можливим рівнем енергоспоживання:

$$E_{\text{теор}} = E_{\text{факт}} - E_{\text{техн}} \quad (1.23)$$

Технічно досяжний потенціал:

$$E_{\text{техн}} = \sum_i (q_i - q_{\text{ВАТ},i}) \cdot P_i \quad (1.24)$$

де $q_{\text{ВАТ},i}$ – питомі витрати за найкращими доступними технологіями (ВАТ – Best Available Technology).

Економічно доцільний потенціал визначається з урахуванням термінів окупності:

$$E_{\text{екон}} = \sum_{i=1}^m \Delta Q_i \quad \text{для } T_{\text{ок},i} \leq T_{\text{норм}} \quad (1.25)$$

де m – кількість заходів з терміном окупності $T_{\text{ок},i} \leq T_{\text{норм}}$; ΔQ_i – економія енергії від i -того заходу.

Сучасний інструментарій оцінювання енергоефективності включає програмні комплекси та системи моніторингу (табл. 1.4).

Таблиця 1.4 – Класифікація програмного забезпечення для оцінки енергоефективності

Тип ПЗ	Призначення	Приклади	Функціональні можливості
АСКОЕ	Автоматизований облік електроенергії	«Енергомонітор», PowerLogic, EM-CU	Збір даних в режимі реального часу, формування графіків навантаження, виявлення перевитрат
Системи енергомоніторингу	Моніторинг та аналіз споживання	EnergyCAP, Enerlyte, DEXMA	Візуалізація енергопотоків, порівняльний аналіз, звіти за ISO 50001
Програми енергоаудиту	Обстеження та розрахунки	RETScreen, EnergyPlus, eQuest	Моделювання енергоспоживання, оцінка заходів, фінансовий аналіз
ERP-модулі	Інтеграція в систему управління	SAP EHS, Oracle Utilities, MS Dynamics	Планування, облік, аналіз в єдиній системі
ІоТ-платформи	Інтернет речей	ThingWorx, AWS ІоТ, Azure ІоТ	Підключення датчиків, BigData-аналіз, ML-прогнозування

Специфіка промислових підприємств визначає пріоритетність окремих методів оцінки відповідно до галузі, що розглядається (табл. 1.5).

Таблиця 1.5 – Галузева специфіка застосування методів оцінки енергоефективності

Галузь	Структура енергоспоживання	Пріоритетні методи	Ключові показники
Металургія	Електроенергія (40%), природний газ (45%), вугілля (15%)	Балансовий, ексергетичний аналіз, термодинамічний	Питомі витрати палива на 1 т сталі, ККД нагрівальних печей
Машинобудування	Електроенергія (85%), теплоенергія (15%)	Нормування, графіки навантаження, аналіз режимів	Електроємність обробки, коефіцієнт завантаження верстатів
Хімічна промисловість	Теплоенергія (55%), електроенергія (35%), паливо (10%)	Технологічний аналіз, утилізація вторинних ресурсів	Питомі витрати енергії на 1 т продукту, ступінь регенерації тепла
Харчова промисловість	Електроенергія (50%), теплоенергія (40%), паливо (10%)	Комплексний підхід, оцінка холодильного циклу	Питомі витрати на переробку сировини, ККД холодильного обладнання
Будівельні матеріали	Теплоенергія (60%), електроенергія (30%), паливо (10%)	Балансовий, оцінка піролізних процесів	Витрати палива на випал, теплоємність продукції

Таким чином, сучасний методичний інструментарій оцінювання енергоефективності промислових підприємств характеризується різноманітністю підходів – від простих ресурсних показників до складних інтегральних моделей. Вибір конкретних методів та показників має здійснюватися з урахуванням галузевої специфіки, цілей аналізу, доступності інформації та рівня розвитку системи енергетичного менеджменту на підприємстві. Комплексне використання кількісних та якісних методів, традиційного та цифрового інструментарію забезпечує найбільш повну та

об'єктивну оцінку енергоефективності та дозволяє виявити резерви її підвищення.

1.3. Система показників для діагностики та моніторингу енергетичної результативності підприємств

Раціональний та системний підхід до управління енергоспоживанням на підприємстві передбачає формування комплексної системи показників, що забезпечує всебічну оцінку використання енергоресурсів, виявлення втрат і резервів, а також сприяє прийняттю ефективних управлінських рішень у напрямку підвищення загального рівня енергоефективності [1-3].

Індикатори енергетичної результативності розподіляються на кілька груп: операційні (виробничі), техніко-економічні, фінансові та екологічні. Такий класифікований підхід дає змогу оцінити не лише фактичне споживання енергії, а й економічну доцільність її витрат, а також екологічний вплив виробництва [1, 3].

Основні категорії індикаторів та їх характеристика зведені та подані у вигляді таблиці 1.6.

Таблиця 1.6 – Основні категорії індикаторів та їх характеристика

Категорія	Індикатор	Формула	Одиниця виміру
Операційні	Питома енергоємність од. прод.	$E_{од} = \frac{E_{виг}}{Q_{виг}}$	кВт·год/од.
	Продуктивність енергообладнання	$P_e = \frac{Q_{виг}}{K_o}$	од./кВт
Економічні	Частка витрат на енергоресурси у загальних витратах	$C_{ен/заг} = \frac{C_{ен}}{C_{заг}}$	%
	Вартість ЕЕ на од. прод.	$C_{ен/од} = \frac{C_{ен}}{Q_{виг}}$	грн/од.
Технічні	Втрати ЕЕ в мережах	$W_{мер} = \frac{E_{втрат}}{E_{отрим}}$	%
	Коефіцієнт корисного використання енергії	$K_{еф} = \frac{E_{кор}}{E_{виг}}$	%
Екологічні	Питома кількість CO ₂	$Q_{CO_2} = \frac{M_{CO_2}}{Q_{виг}}$	кг/од.
Інноваційні	Енергоефективність інвестицій у енергозбереження	$K_{інв} = \frac{\Delta C_{ен}}{C_{інв}}$	грн/грн

Пояснення змінних [1-8]:

$E_{\text{вик}}$ — загальне споживання енергії,

$Q_{\text{виг}}$ — обсяг виробленої продукції,

K_0 — встановлена потужність обладнання на об'єкті,

$C_{\text{ен}}, C_{\text{заг}}$ — витрати на енергію та загальні витрати відповідно,

$E_{\text{втрат}}, E_{\text{отрим}}$ — втрати та отримана енергія,

$E_{\text{кор}}$ — корисно використана енергія,

M_{CO_2} — обсяги викидів вуглекислого газу на об'єкті,

$\Delta C_{\text{ен}}$ — сума заощаджень на енергії,

$C_{\text{інв}}$ — інвестиції у заходи з енергозбереження.

Основні формули розрахунку показників [1-8]:

Питома енергоємність одиниці продукції:

$$E_{\text{од}} = \frac{E_{\text{вик}}}{Q_{\text{виг}}}$$

Коефіцієнт корисного використання енергії:

$$K_{\text{еф}} = \frac{E_{\text{кор}}}{E_{\text{вик}}} \times 100\%$$

Частка витрат на енергію в загальних витратах:

$$C_{\text{ен/заг}} = \frac{C_{\text{ен}}}{C_{\text{заг}}} \times 100\%$$

Втрати енергії в мережах:

$$W_{\text{мер}} = \frac{E_{\text{втрат}}}{E_{\text{отрим}}} \times 100\%$$

Питома кількість викидів CO₂:

$$Q_{\text{CO}_2} = \frac{M_{\text{CO}_2}}{Q_{\text{виг}}}$$

Ефективний моніторинг енергоспоживання здійснюється через багаторівневу систему інформаційних контурів:

- Локальний рівень — збір даних у реальному часі на рівні окремого обладнання або цехів;
- Корпоративний рівень — агрегація показників по структурних

підрозділах, підготовка звітів і порівняльний аналіз;

- Стратегічний рівень — комплексна аналітика, прогнозування та прийняття управлінських рішень згідно з довгостроковими цілями підвищення енергоефективності.

Візуальна схема таких багаторівневих інформаційних контурів подана у вигляді рис. 1.1.

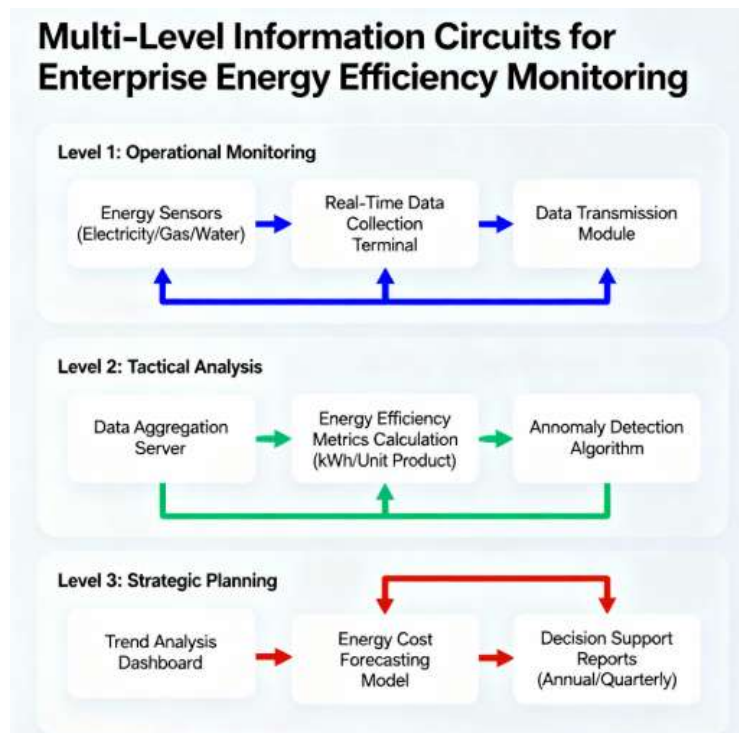


Рисунок 1.1 — Багаторівнева структура інформаційних контурів моніторингу енергетичної ефективності підприємства

Розроблена система показників та багаторівневий моніторинг створюють надійний інструментарій для проведення діагностики енергетичної результативності підприємства, аналізу якісних та кількісних параметрів, а також для прийняття ефективних заходів зі зниження енергоспоживання та поліпшення екологічних показників, що є основою сталого розвитку і підвищення конкурентоспроможності підприємства [1-4].

Якщо необхідно, можна доповнити цей пункт деталізованими прикладами або методиками практичного впровадження системи.

Висновки до розділу 1

1. Встановлено, що енергетична складова в собівартості продукції промислових підприємств України складає від 6% до 35% залежно від галузі (найбільше у металургії – 25-35%, найменше у легкій промисловості – 6-12%), при цьому потенціал економії енергоресурсів оцінюється на рівні 10-30%. Енергоємність економіки України (285 кг н.е./1000 дол. США) майже втричі перевищує показники розвинених європейських країн, що підтверджує актуальність системної роботи з підвищення енергоефективності на рівні окремих підприємств.

2. Систематизовано п'ять основних методичних підходів до оцінки енергоефективності промислових підприємств: ресурсний, економічний, технологічний, процесний та комплексний. Встановлено, що вибір конкретних методів має здійснюватися з урахуванням галузевої специфіки, оскільки структура енергоспоживання суттєво відрізняється (наприклад, у металургії переважає природний газ – 45% та електроенергія – 40%, тоді як у машинобудуванні електроенергія становить 85%).

3. Обґрунтовано, що комплексна оцінка енергоефективності потребує використання системи показників, яка включає абсолютні (загальне споживання енергоресурсів), відносні (енергоємність продукції), структурні (частка окремих енергоносіїв), економічні (частка енергозатрат у собівартості), технічні (ККД обладнання) та динамічні показники (темп зниження енергоспоживання). Інтегральний показник енергоефективності, розрахований методом адитивної згортки, забезпечує найбільш об'єктивну оцінку.

4. Розрахунки показують, що загальний потенціал підвищення енергоефективності на промислових підприємствах України становить 25-40%, що еквівалентно 15-20 млрд м³ природного газу щорічно або приблизно 8-10 млрд доларів США в грошовому вираженні. Зниження енергоємності продукції на 10% може призвести до зменшення собівартості на 2-5% залежно

від галузі, що безпосередньо впливає на прибутковість та конкурентоспроможність підприємства.

5. Доведено необхідність впровадження багатопеневої системи моніторингу енергоспоживання (локальний, корпоративний та стратегічний рівні), яка забезпечує збір даних у реальному часі, агрегацію показників за структурними підрозділами та прийняття обґрунтованих управлінських рішень. Така система, доповнена сучасним програмним забезпеченням (АСКОЕ, системи енергомоніторингу, IoT-платформи), створює надійний інструментарій для діагностики та підвищення енергетичної результативності підприємств.

2. ІНСТРУМЕНТИ КОНТРОЛЮ ТА ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОРЕЗУЛЬТАТИВНОСТІ ОРГАНІЗАЦІЙ

2.1. Оцінка енергоефективності через базовий рівень споживання відповідно до норм ISO/FDIS 50006:2023(E)

Базовий стандарт ISO/FDIS 50006:2023(E) пропонує методику для визначення, застосування та підтримки показників ефективності (далі ПЕЕ) та початкових рівнів споживання (далі БРЕ) для оцінки результативності енерговикористання в будь-якій компанії, яка дотримується ISO 50001. Крім того, включається допоміжне керівництво щодо вимірювань та контролю енергоефективності й демонстрації підвищення показників.

Стандарт поширюється на будь-які організації незалежно від виду, масштабу, складності, розташування, корпоративної культури, продукції або послуг, які надаються, та рівня зрілості у сфері енергоменеджменту.

Відповідно до стандарту, організація встановлює ПЕЕ і БРЕ для контролю та оцінки енергоефективності й демонстрації поліпшення показників. ПЕЕ забезпечують релевантну інформацію про ефективність енергоспоживання зацікавленим сторонам, щоб оцінити енерговикористання і вжити заходів для управління та покращення енергоефективності.

Кількісна оцінка показників енергоефективності (ПЕЕ) дозволяє визначати ефективність використання енергії всією організацією або її окремими елементами — наприклад, об'єктами, обладнанням, системами чи технологічними процесами, які споживають енергію. Перш ніж впроваджувати потенційні ПЕЕ, їх необхідно детально проаналізувати та оцінити доцільність застосування. Значення ПЕЕ можна виразити через енергетичну модель і представляти у вигляді одиниць споживання енергії (кВт·год, ГДж) або коефіцієнтів енергоефективності (наприклад, км/л).

Рівень енергоспоживання організації може значно змінюватися під впливом зовнішніх і внутрішніх факторів, таких як погодні умови, обсяги виробництва тощо. Якщо наявні дані підтверджують істотний вплив цих

факторів на ефективність використання енергії, слід застосовувати нормалізацію. Вона дозволяє коректно порівнювати показники енергоефективності, враховуючи змінні, що впливають на споживання енергії, а також оцінювати й демонструвати досягнуте поліпшення.

Організація визначає власні цілі з енергоефективності, спираючись на вже досягнуті результати та потенційні можливості для покращення.

На рисунку 2.1 представлено приклад взаємозв'язку між досягненням енергоефективності, ПЕЕ, базовим рівнем енергоспоживання (BRE), фактичними значеннями ПЕЕ та встановленими цілями. Схема демонструє, що поліпшення енергоефективності відбувається тоді, коли фактичні ПЕЕ перевищують базові значення. На графіку вісь X відповідає часу, а вісь Y — обсягу споживаної енергії.

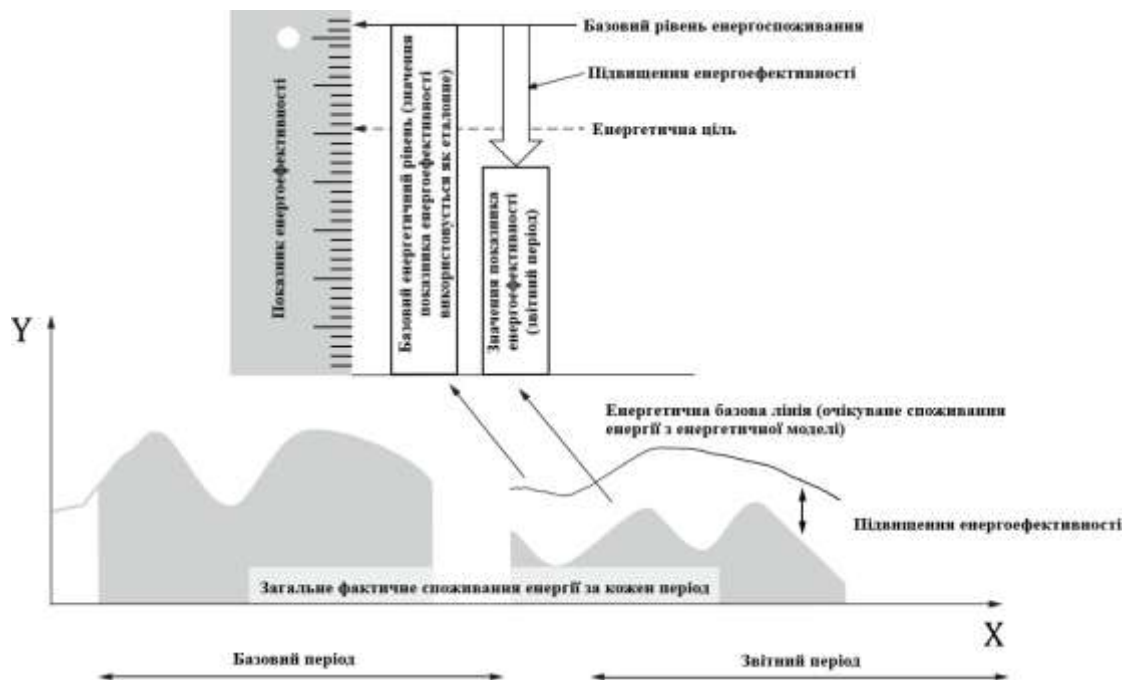


Рисунок 2.1 – Взаємозв'язки між показниками енергоефективності та енергетичними цілями

Ефективне управління енергоспоживанням потребує продуманого планування та систематичного аналізу. На рисунку 2.2 наведено покрокову схему створення, впровадження та базової підтримки ПЕЕ і BRE.

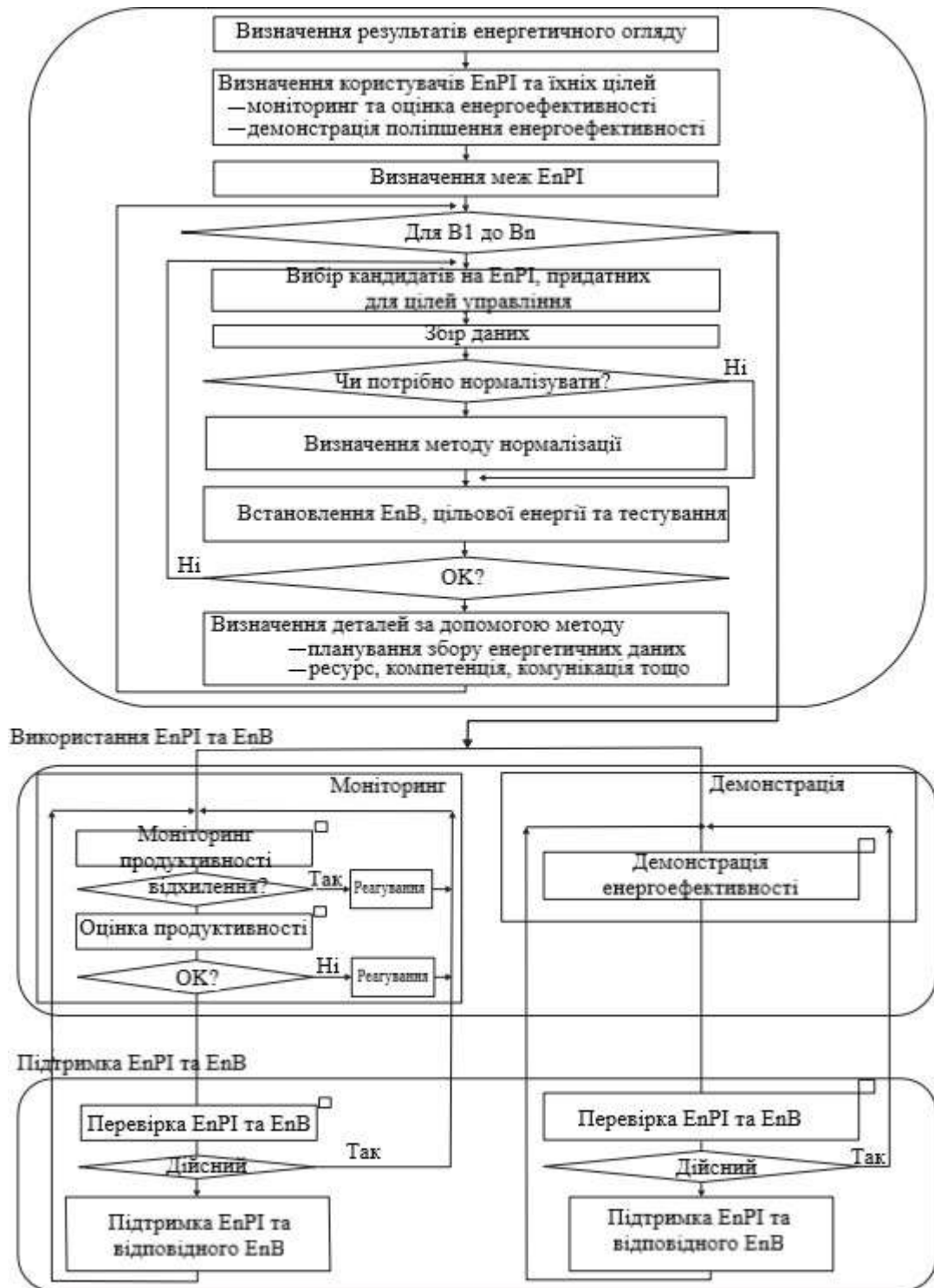


Рисунок 2.2 – Схема планування ПЕЕ та БРЕ

Даний процес дозволяє організаціям встановлювати межі показників ПЕЕ, отримувати необхідні дані, виявляти оптимальні значення та базові рівні, нормалізувати отримані результати та своєчасно оновлювати моделі. Використання цього підходу забезпечує регулярний контроль за

ефективністю енергоспоживання, виявлення вузьких місць та демонстрацію досягнутих покращень.

Відповідно до стандартів, організація має ідентифікувати існуючі види споживання енергії та провести оцінку поточного й історичного енергоспоживання, а також рівня енергоефективності на основі вимірювань та інших релевантних даних. Значущі джерела енергоспоживання визначаються шляхом аналізу отриманої інформації з урахуванням факторів, що впливають на ефективність використання енергії.

Крім того, організація повинна визначити ключових користувачів показників ПЕЕ. У вигляді табл. 2.1. подано згрупований перелік найпоширеніших користувачів.

Таблиця 2.1 – Типові користувачі показників енергоефективності (ПЕЕ)

Категорії користувачів ПЕЕ	Характерні потреби
Керівники вищого рівня (менеджмент)	Керівники вищого рівня потребують даних ПЕЕ для оцінки загальної енергетичної ефективності організації та для підтримки стратегічних заходів, спрямованих на підвищення енергоефективності.
Група з енергетичного менеджменту	Це група фахівців, яка підтримує організацію у таких завданнях: 1. Розробка показників енергоефективності (ПЕЕ); 2. Забезпечення підтримки та актуалізації ПЕЕ; 3. Моніторинг базових рівнів енергоспоживання (BRE), поточних значень ПЕЕ та всіх релевантних змінних у заздалегідь визначені проміжки часу; 4. Встановлення енергетичних цілей та оцінка ступеня їх досягнення; 5. Проведення нормалізації даних та порівняння фактичних показників ПЕЕ з BRE і встановленими цілями; 6. Підготовка звітів щодо значень ПЕЕ, відхилень та аналіз результатів.

Продовження табл. 2.1

Категорії користувачів ПЕЕ	Характерні потреби
Промисловий об'єкт або керований суб'єкт	Зазвичай відповідає за контроль ресурсів на підприємстві чи об'єкті та результати їх використання. Керівники об'єкта можуть застосовувати всі доступні показники енергоефективності, включно з тими, що відображають значне енергоспоживання, а також використовувати порівняльні ПЕЕ з подібних об'єктів з метою аналізу та порівняння.
Фахівці з експлуатації та технічного обслуговування	Ця група відповідає за застосування ПЕЕ для контролю та забезпечення ефективної роботи обладнання та процесів. Вони вживають необхідних заходів у разі значних відхилень від встановлених ПЕЕ, усувають втрати енергії та виконують профілактичне технічне обслуговування. Експлуатаційний і технічний персонал може користуватися ПЕЕ, що належить до конкретного процесу або обладнання.
Інженерні фахівці	Вони планують, реалізують та оцінюють заходи з підвищення енергоефективності, застосовуючи відповідні показники ПЕЕ, у тому числі методи, які використовуються для оцінки ефекту впроваджених заходів з підвищення енергоефективності.
Зовнішні зацікавлені сторони або користувачі	Здебільшого це - регуляторні органи, галузеві та професійні спілки/ асоціації, аудитори систем енергоменеджменту, клієнти та інші організації, можуть потребувати даних ПЕЕ для участі у відповідних процесах та прийняття рішень.
Менеджер показників енергоефективності	Це особа, відповідальна за спостереження, аналіз та підготовку звітності щодо показників енергоефективності та їхніх значень.

Для оцінки енергоефективності необхідно встановити відповідні межі вимірювання для кожного показника ПЕЕ. У вигляді табл. 2.2. наведено існуючі три основні рівні встановлення меж ПЕЕ.

Таблиця 2.2 – Основні рівні меж показників енергоефективності (ПЕЕ)

Рівень меж ПЕЕ	Характеристика та зміст	Приклади використання
Індивідуальний рівень	Межі ПЕЕ можуть бути встановлені відповідно до фізичного периметра конкретного об'єкта, обладнання або енергоспоживного процесу, який організація прагне виділити та контролювати.	Енергоспоживання обладнання для виробництва пари відокремлюється від інших видів споживання енергії.
Системний рівень	Межі ПЕЕ можуть встановлюватися для фізичного периметра групи об'єктів, обладнання або енергоспоживних процесів, які взаємодіють між собою і які організація прагне контролювати та оптимізувати.	Обладнання для виробництва пари разом із пристроями, що її використовують, наприклад, обладнання для висушування.
Організаційний рівень	Межа ПЕЕ може визначатися навколо енергії, придбаної організацією, з урахуванням відповідальності за енергоменеджмент на рівні підприємства (фабрики) або окремих підрозділів.	Пара, придбана для підприємства (фабрики) або конкретного підрозділу організації.

Підприємство повинна ідентифікувати релевантні змінні для кожної межі ПЕЕ. Зокрема, у випадку, якщо виробництво певних продуктів потребує більшого споживання електроенергії, ніж інших, слід розглядати асортимент продукції як відповідну змінну. Аналогічно, якщо взимку споживання

природного газу зростає, доцільно враховувати градусо-дні опалювального сезону як релевантну змінну. У вигляді табл.2.3 подано пояснення щодо вибору таких змінних.

Таблиця 2.3 – Алгоритм ідентифікації ключових змінних

Ключові змінні	Роз'яснення
Масив вхідних даних	Змінні, що стосуються вхідних ресурсів, визначаються залежно від їхньої якості та/або кількості, яка надходить до межі вимірювання (наприклад, молоко, що надходить на стадію пастеризації).
Процес	Змінні, пов'язані з процесом, описують діяльність, що відбувається в межах встановленої ПЕЕ. Наприклад, це можуть бути температура та тривалість етапів технологічного процесу. У контексті будівлі такою змінною може виступати рівень її зайнятості.
Результати	Змінні, що відносяться до результатів, описують продукцію або енергетичні потоки, що виходять за межі ПЕЕ. У виробничому процесі прикладом такої змінної може бути обсяг виробленої продукції.
Параметри навколишнього середовища	Змінні, що відображають вплив навколишнього середовища, ґрунтуються на даних про зовнішні умови.

Підприємство повинно забезпечити збір даних, що стосуються споживання енергії та ПЕЕ. При оцінці належної якості даних слід враховувати такі фактори: метод збору (ручний або автоматизований), джерело інформації, частоту збору, точність лічильників і вимірювального обладнання, повторюваність даних та процеси їх перевірки.

Вимірювання можуть здійснюватися безперервно, періодично або одноразово. Якщо безперервний збір даних неможливий, організація має

проводити одноразові або тимчасові вимірювання у періоди, що є репрезентативними для типової експлуатації.

При виборі відповідних ПЕЕ ключовими аспектами є вплив релевантних змінних та потреби користувачів інформації. За потреби організація повинна визначити ПЕЕ таким чином, щоб щонайменше один показник охоплював кожне істотне використання енергії.

Існує велика кількість інших типів показників, які організація може застосовувати для моніторингу різних аспектів системи енергоменеджменту (СЕНМ). Значення ПЕЕ можна отримувати як шляхом прямого вимірювання, так і за допомогою розрахунків. Вони можуть бути представлені у вигляді статистичних даних, агрегованих показників або інженерних моделей.

У випадках, коли на енергоефективність впливає лише один ключовий фактор, доцільно застосовувати регресійну модель для прогнозування споживання енергії чи рівня енергоефективності.

Проста лінійна регресія для моделювання споживання ЕЕ може бути подана у вигляді:

$$Y = mx + C \quad (2.1)$$

де змінними є:

Y – це значення споживання енергії;

m – значення енергоспоживання на одиницю ключової змінної;

x – значення ключової змінної;

C – базове енергоспоживання, не пов'язане з ключовим фактором.

Застосування простого показника може бути доречним у випадках, коли споживання енергії не залежить від жодних релевантних змінних. Це визначається шляхом аналізу тенденцій енергоспоживання протягом часу. Якщо Y демонструє суттєві коливання або виходить за межі цього діапазону, це вказує на вплив релевантних змінних, і тоді необхідне проведення нормалізації. Якщо базове навантаження дорівнює нулю, співвідношення споживаної ЕЕ до одиниці релевантної змінної (m) можна використовувати як

відповідний показник ефективності енергоспоживання. Цей підхід доцільний, коли на енергоспоживання впливає лише одна релевантна змінна, а базове навантаження відсутнє.

У випадках, коли на споживання енергії впливає більше однієї релевантної змінної, доцільно застосовувати модель багатомірної лінійної регресії. Модель енергоспоживання з багатомірною лінійною регресією має вид:

$$Y = m_1x_1 + m_2x_2 + \dots + m_nx_n + C \quad (2.2)$$

Y – показник споживаної енергії на об'єкті;

m_1, m_2, \dots, m_n - енергоспоживання на одиницю характерних змінних;

x_1, x_2, \dots, x_n – характерні змінні;

C – значення постійної константи.

Фактично найчастіше застосовують енергетичні моделі, що враховують кілька релевантних змінних одночасно.

Агреговані енергетичні моделі можна отримати шляхом поєднання різних індивідуальних моделей споживання енергії. Умовні моделі також відносяться до категорії агрегованих моделей. У цьому випадку різні енергетичні моделі застосовуються залежно від того, чи перевищує значення релевантної змінної певний поріг (N).

Умовну модель можна представити за допомогою таких формул:

$$Y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) - \text{if } x_i > N \quad (2.3)$$

$$Y = g(x_1, x_2, \dots, x_n) - \text{if } x_i \leq N \quad (2.4)$$

Серед якого: Y – показник споживаної енергії на досліджуваному об'єкті; x_1, x_2, \dots, x_n - змінні для обраної моделі.

2.2. Формування енергетичної базової лінії підприємства

Процес формування енергетичної базової лінії (ЕБЛ) є фундаментом системи енергетичного менеджменту, оскільки дозволяє об'єктивно оцінити динаміку споживання енергії та ефективність запроваджених заходів з енергозбереження. ЕБЛ визначає типовий рівень енергоспоживання підприємства за стабільних умов діяльності та є відправною точкою для подальшого моніторингу змін.

Для побудови ЕБЛ рекомендується послідовно виконати такі етапи:

1. Визначення мети створення базової лінії. Необхідно чітко встановити, чи буде базова лінія використовуватись для аналізу всього підприємства, окремої ділянки, технологічного процесу або для оцінки результатів впровадження енергоефективних заходів.

2. Вибір базового періоду. Період має бути репрезентативним, тобто відображати звичайні умови експлуатації обладнання, без впливу аварійних, сезонних або форс-мажорних чинників. Тривалість періоду залежить від типу виробництва, циклічності процесів та доступності даних.

3. Збір та перевірка даних. Проводиться збір інформації про обсяги споживаної енергії (електричної, теплової, паливної), а також про змінні, що можуть впливати на споживання: обсяг виробництва, погодні умови, кількість робочих днів, коефіцієнти завантаження обладнання тощо.

4. Нормалізація показників. За потреби дані коригуються для усунення впливу нерегулярних факторів (температурні відхилення, зупинки обладнання, нестандартні обсяги продукції). Це забезпечує коректне порівняння між різними періодами.

5. Побудова та перевірка моделі базового споживання. На основі статистичного аналізу визначається залежність енергоспоживання від релевантних змінних. Модель перевіряється на достовірність і точність, після чого використовується як стандарт порівняння для оцінки поточного енергетичного стану.

Вибір базового періоду повинен узгоджуватись із цілями енергетичної політики підприємства. Найчастіше базові періоди становлять від 6 місяців до 2 років (див. табл. 2.4), що дозволяє врахувати сезонні коливання і стабілізувати вплив змінних факторів.

Таким чином, побудова базової енергетичної лінії забезпечує створення об'єктивного критерію оцінювання ефективності використання енергоресурсів. Вона дозволяє проводити кількісну оцінку змін у споживанні енергії, визначати потенціал економії та формувати реалістичні енергетичні цілі підприємства.

У процесі експлуатації обладнання, технологічних систем або об'єктів, що споживають енергію, відбуваються постійні зміни зовнішніх і внутрішніх факторів. Залежно від температури, навантаження, режиму роботи чи рівня виробництва, споживання енергії може істотно коливатися. Тому реальна оцінка енергоефективності без урахування цих змінних буде неточною.

Таблиця 2.4 – Типові періоди для формування енергетичної базової лінії

Тип базового періоду	Тривалість періоду	Характеристика	Рекомендоване застосування
Сезонний	3–6 місяців	Відображає сезонні коливання споживання (наприклад, опалювальний або охолоджувальний період)	Для підприємств з вираженою сезонною залежністю (теплопостачання, аграрний сектор)
Річний	12 місяців	Охоплює повний цикл виробничої діяльності, враховує сезонні впливи	Для більшості промислових підприємств і бюджетних установ
Багаторічний	2–3 роки	Дає змогу усереднити вплив нестабільних зовнішніх факторів та оцінити довгострокові тенденції	Для стратегічного планування та енергетичного аудиту

Тип базового періоду	Тривалість періоду	Характеристика	Рекомендоване застосування
Проектний (тимчасовий)	Визначається тривалістю проєкту	Використовується для порівняння «до» та «після» впровадження енергоефективних заходів	Для оцінки результатів конкретних енергетичних проєктів
Операційний (технологічний)	1–2 місяці	Відображає короткострокові процеси або цикли експлуатації обладнання	Для локальних систем або дослідження технологічних змін

Для усунення впливу таких коливань застосовується нормалізація даних — метод статистичного узгодження енергетичних показників з релевантними змінними. Вона дозволяє перетворити фактичні результати на порівнянні величини, що відображають реальні тенденції зміни енергоефективності.

Організація має сформувати рівень енергетичної базової лінії (ЕБЛ) для кожного визначеного показника енергетичної ефективності (ПЕЕ), використовуючи інформацію про споживання енергії та відповідні змінні за базовий період. Якщо аналіз показує, що певні змінні (наприклад, обсяг виробництва, температура, кількість змін чи години роботи обладнання) суттєво впливають на споживання енергії, тоді БРЕ підлягає нормалізації.

Нормалізація необхідна для того, щоб:

- виключити вплив змін умов експлуатації на оцінку ефективності;
- отримати порівнювані результати за різні періоди;
- підвищити достовірність висновків про реальні зміни енергоефективності;
- скоригувати базовий рівень при впровадженні нових технологічних рішень чи модернізації обладнання.

До класичних етапів процесу нормалізації:

Крок 1. Підготовка даних. Організація повинна створити єдину базу даних або електронну таблицю, що містить обсяги споживання енергії та потенційно релевантні змінні. Для аналізу використовуються програмні інструменти, такі як MS Excel, Python, R або спеціалізовані пакети енергоменеджменту. Вибір моделі (лінійна чи нелінійна) залежить від характеру процесу та виду обладнання.

Крок 2. Первинний аналіз і тестування зв'язків. На цьому етапі проводиться кореляційний аналіз для виявлення залежності між споживанням енергії та обраними змінними. Коефіцієнт детермінації (R^2) показує, наскільки обрана модель пояснює зміну енергоспоживання. Чим більше значення R^2 , тим краще модель відображає реальний процес.

Додатково використовуються F -тест для оцінки статистичної значущості моделі ($F < 0,1$ свідчить про надійність залежності) та p -значення, яке визначає, чи має змінна суттєвий вплив на споживання енергії ($p < 0,05$ або $p < 0,1$ вважається прийнятним рівнем значущості).

Крок 3. Регресійне моделювання. На основі статистичного аналізу створюється модель, що описує зв'язок між споживанням ЕЕ (Y) та відповідними змінними (X_1, X_2, \dots, X_n). Якщо певна змінна має високе p -значення або не є технічно обґрунтованою, її вилучають і повторюють розрахунок. Отримана регресійна залежність використовується як базова енергетична модель.

Крок 4. Перевірка достовірності моделі. Для перевірки стабільності моделі оцінюється стандартна похибка, скоригований коефіцієнт детермінації (R^2_{adj}) і коефіцієнт інфляції дисперсії (VIF). Висока колінеарність між змінними може викривляти результати, тому така залежність повинна бути усунена або скоригована.

Крок 5. Оцінка актуальності базової лінії. Оскільки параметри технологічних процесів можуть змінюватися, організація має періодично перевіряти, чи залишається обрана базова лінія релевантною. Якщо з'явилися

нові технології, змінилося обладнання чи умови виробництва, БРЕ і ПЕЕ підлягають оновленню.

Критерії доцільності перегляду базових показників

Базовий рівень енергоспоживання вважається таким, що потребує перегляду, якщо:

1. Значення змінних виходять за межі діапазону, використаного під час формування моделі.
2. Виявлено значні зміни у виробничих або кліматичних умовах.
3. Модель втрачає статистичну значущість або зростає стандартна похибка.
4. Відбулися суттєві модернізації обладнання, що змінили характер енергоспоживання.

У таких випадках базовий період може бути оновлений, або проводиться перерахунок енергетичних індикаторів без зміни часових меж.

Таблиця 2.5 – Приклади ситуацій, які вимагають перегляду ПЕЕ та БРЕ

№	Причина перегляду	Приклад ситуації	Рекомендована дія
1	Зміна технологічного процесу	Встановлення нового виробничого обладнання з іншим енергопрофілем	Провести повторне моделювання базової лінії
2	Вплив зовнішніх факторів	Значні відхилення кліматичних умов (температура, вологість)	Коригування моделі нормалізації
3	Зміна обсягів виробництва	Збільшення/зменшення продуктивності понад 20%	Оновлення ПЕЕ з урахуванням нових обсягів
4	Технічні втручання	Встановлення систем рекуперації, ізоляції чи енергоощадних приладів	Формування нового БРЕ
5	Втрата достовірності даних	Збій систем вимірювання або неповні дані	Проведення аудиту даних і повторний розрахунок
6	Організаційні зміни	Зміна меж енергетичної системи або структури підрозділів	Перегляд меж ПЕЕ та відновлення базового періоду

У процесі оцінювання енергетичної ефективності важливо враховувати статичні фактори, тобто такі умови, що не змінюються щоденно, але можуть істотно вплинути на взаємозв'язок між споживанням ЕЕ та змінними параметрами. Ігнорування таких факторів призводить до спотворення результатів аналізу, неправильного визначення енергетичних трендів або невірної інтерпретації досягнутих показників ефективності.

Якщо статичні фактори змінюються (наприклад, змінюється структура виробництва, тип обладнання чи архітектура будівлі), енергетичну базову лінію (ЕБЛ) і показники енергоефективності (ПЕЕ) необхідно переглядати для збереження їхньої актуальності та достовірності.

У таблиці 2.6 наведено типові приклади варіації статичних факторів, що потребують оновлення або коригування ЕБЛ та ПЕЕ.

Систематичне відстеження показників енергоефективності є невід'ємною частиною енергетичного менеджменту підприємства.

З цією метою використовують основні ЕБЛ та ПЕЕ, які дають змогу:

- контролювати ефективність операційних процесів у режимі реального часу;
- підтверджувати досягнення покращень у споживанні енергії;
- оцінювати динаміку руху до встановлених енергетичних цілей і завдань.

Інформацію щодо рівня енергоефективності доцільно представляти у зручному форматі — графічному чи табличному, залежно від користувачів (операторів, енергоменеджерів, керівництва тощо).

Моніторинг ефективності здійснюється за рахунок порівняння фактичного значення ПЕЕ з очікуваним енергоспоживанням, визначеним за ЕБЛ. Такий аналіз може проводитися: щогодини (для безперервних технологічних процесів); щоденно або щотижнево (для оперативного управління); щомісяця (для стратегічного контролю та формування звітності).

Таблиця 2.6 – Основні варіації статичних факторів

Категорія статичного фактора	Суть зміни	Можливий вплив на енергоспоживання	Рекомендована дія
Технологічні процеси	Впровадження нових технологій, модернізація обладнання	Зміна питомого енергоспоживання, зниження або збільшення навантаження	Перерахунок ЕБЛ з урахуванням нових технічних характеристик
Виробнича структура	Зміна обсягів або номенклатури продукції	Зсув у співвідношенні між енергоємними і менш енергоємними процесами	Коригування ПЕЕ та формування нової ЕБЛ
Організаційні умови	Оптимізація графіків роботи, зміна кількості змін	Зменшення або збільшення споживання електроенергії, тепла, палива	Перегляд базових показників з урахуванням нових режимів
Будівельні та архітектурні зміни	Реконструкція приміщень, утеплення, зміна систем опалення/вентиляції	Покращення або погіршення теплового балансу об'єкта	Повторне визначення ЕБЛ після завершення робіт
Зміна енергоресурсу або постачальника	Перехід на інший тип палива чи джерело енергії	Відмінності у ККД, тарифах і питомій вартості енергії	Коригування моделі енерговитрат і оновлення ПЕЕ
Зовнішні умови експлуатації	Зміна кліматичних або географічних факторів	Вплив на опалення, охолодження або вентиляцію	Введення нових коефіцієнтів нормалізації до ЕБЛ

На початкових етапах формування системи енергоменеджменту достатньо щомісячного аналізу, проте з часом рекомендується переходити до автоматизованого моніторингу в реальному часі.

Для оцінки, аналізу та візуалізації даних можуть використовуватися різні методи, зокрема:

Побудова діаграм трендів ПЕЕ — для відображення відхилень між фактичним і очікуваним споживанням енергії.

Використання методу кумулятивної суми (CUSUM) — для виявлення систематичних змін у споживанні енергії та контролю ефективності впроваджених заходів.

Порівняння фактичного енергоспоживання із цільовими значеннями енергоефективності, визначеними на основі ЕБЛ.

Побудова діаграм розсіювання (Scatter Plot) — для дослідження взаємозв'язків між споживанням енергії та релевантними змінними (виробничими, кліматичними, технологічними).

Якщо під час моніторингу виявляються аномальні або несподівані відхилення, необхідно провести розслідування для з'ясування причин. Це може включати:

- перевірку режимів роботи обладнання чи систем управління;
- визначення технічних або організаційних несправностей;
- застосування коригувальних заходів у разі надмірного споживання;
- аналіз випадків зниженого енергоспоживання для пошуку можливостей постійного вдосконалення;
- перевірку точності вихідних даних та вимірювальних систем;
- оцінку можливих змін статичних факторів, що могли вплинути на результат.

Покращення енергоефективності визначається шляхом зіставлення показників ПЕЕ за певний звітний період із значеннями ЕБЛ. Таке порівняння може проводитись на рівні підприємства в цілому; для окремих ділянок чи виробничих процесів; для конкретних істотних енергетичних використань (ІЕВ).

Нижче подано узагальнені підходи до моніторингу, звітності та демонстрації покращення енергоефективності (див. табл.2.7).

Таблиця 2.7 – Основні підходи до моніторингу, звітності та демонстрації підвищення енергоефективності

Метод / інструмент	Сутність методу	Очікуваний результат	Періодичність застосування
Трендовий аналіз	Побудова графіка фактичного та очікуваного енергоспоживання	Виявлення тенденцій і сезонних коливань	Щотижня / щомісяця
CUSUM-аналіз	Обчислення накопичених відхилень між ЕБЛ і фактичними даними	Визначення моментів зміни енергоефективності	Щомісяця / щокварталу
Порівняння з цільовими показниками	Оцінка досягнення запланованих рівнів зниження енергоспоживання	Демонстрація прогресу в досягненні енергетичних цілей	Щомісяця
Діаграма розсіювання	Аналіз кореляцій між споживанням енергії та змінними (виробництво, температура, навантаження)	Виявлення основних чинників впливу	Щокварталу
Звіт енергоменеджера	Узагальнення результатів моніторингу, відхилень і вжитих заходів	Інформаційна підтримка прийняття управлінських рішень	Щомісяця / щороку

Таким чином, норми ISO/FDIS 50006:2023(E) є основним підґрунтям та методичним документом, який надає підприємствам чіткі та практичні рекомендації щодо ефективного управління енергетичними ресурсами. Він визначає підхід до оцінювання, моніторингу та постійного вдосконалення енергоефективності на всіх рівнях діяльності організації — від окремого обладнання до виробничих процесів і систем управління.

Згідно зі стандартом, основою енергетичного аналізу є впровадження, використання та підтримка показників енергоефективності (ПЕЕ) разом із енергетичними базовими лініями (ЕБЛ), які забезпечують можливість:

- об'єктивно оцінювати зміни у споживанні енергії з урахуванням впливу відповідних змінних;
- визначати фактичні результати реалізації енергозберігаючих заходів;
- відстежувати прогрес у досягненні стратегічних і оперативних енергетичних цілей;
- формувати доказову базу для звітності перед зацікавленими сторонами та аудиторями.

Загалом, ISO/FDIS 50006:2023(E) сприяє переходу від фрагментарного обліку енергоспоживання до системного управління енергоефективністю, що базується на кількісних даних, аналітичних моделях і принципах безперервного вдосконалення, визначених у стандартах серії ISO 50000.

2.3. Моделювання та прогнозування тенденцій енергоспоживання підприємств

Прогнозування енергоспоживання є одним із ключових інструментів ефективного управління енергетичними ресурсами підприємства. Від точності прогнозів залежить не лише рівень енергоефективності, а й планування виробничих процесів, формування бюджету витрат, вибір постачальників енергії та заходів енергозбереження. У науковій та практичній літературі виокремлюють декілька груп методів прогнозування: статистичні, економетричні, експертні, інтелектуальні та гібридні. Кожна з цих груп має свої особливості, переваги та обмеження, що зумовлює доцільність їх застосування в різних умовах діяльності підприємства.

1. Статистичні методи прогнозування.

Статистичні методи базуються на аналізі часових рядів даних про споживання енергії за попередні періоди. Основна ідея полягає в тому, що

майбутні значення показника можна оцінити шляхом виявлення закономірностей і тенденцій у минулих спостереженнях.

До найпоширеніших статистичних методів належать:

- Метод трендової екстраполяції, який передбачає побудову рівняння тренду (лінійного, експоненційного, логарифмічного тощо) і прогнозування майбутніх значень на основі історичних даних.

Метод трендової екстраполяції базується на побудові аналітичної залежності, що описує зміну показника в часі. Вважається, що виявлений тренд продовжуватиметься у майбутньому, а отже, може бути використаний для прогнозування майбутніх значень енергоспоживання. Загальна формула тренду може мати різні види залежно від характеру процесу:

$$\begin{aligned}\hat{Y}_t &= a + bt, \\ \hat{Y}_t &= ae^{bt}, \\ \hat{Y}_t &= a + b \ln t, \\ \hat{Y}_t &= a + bt + ct^2,\end{aligned}\tag{2.5}$$

\hat{Y}_t — прогнозоване значення показника (наприклад, енергоспоживання) у період t ; a, b, c — параметри рівняння тренду, що визначаються методом найменших квадратів; t — номер періоду спостереження.

Після визначення параметрів моделі здійснюється екстраполяція, тобто продовження знайденої функції на майбутні періоди.

Переваги методу:

- простота реалізації та інтерпретації;
- можливість відображення загального напрямку розвитку процесу;
- зручність для побудови довгострокових прогнозів за стабільних умов.

Недоліки:

- не враховує сезонні чи випадкові коливання;
- точність прогнозу знижується при структурних змінах у процесі;
- ефективність залежить від коректності вибору типу тренду.

Метод доцільно використовувати для стабільних часових рядів, коли динаміка споживання енергії характеризується вираженою тенденцією з часом.

- Метод ковзного середнього, який дозволяє згладити випадкові коливання споживання та виділити загальну тенденцію.

Метод ковзного середнього передбачає усереднення певної кількості останніх спостережень для зменшення випадкових коливань у часовому ряді та виділення основної тенденції розвитку.

Загальна формула методу має вигляд:

$$\hat{Y}_{t+1} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} Y_{t-i}, \quad (2.6)$$

\hat{Y}_{t+1} — прогнозоване значення показника на наступний період;

Y_{t-i} — фактичне значення показника у попередніх періодах;

n — кількість періодів, які враховуються при розрахунку середнього.

Цей підхід передбачає ковзання “вікна” усереднення: для кожного нового періоду найстаріше значення вилучається, а нове додається до розрахунку.

Таким чином, прогноз постійно оновлюється і реагує на зміни у динаміці даних.

Переваги методу:

- простота розрахунків і наочність;
- ефективне згладжування випадкових коливань;
- відсутність потреби у складному математичному апараті.

Недоліки:

- прогноз “відстає” від реальних змін через усереднення;
- не враховує трендові та сезонні коливання без додаткових модифікацій;
- вибір довжини інтервалу усереднення суттєво впливає на точність

прогнозу.

Метод ковзного середнього найбільш ефективний для короткострокових прогнозів за умов помірної мінливості споживання енергії та відсутності чітко вираженого тренду.

- Метод експоненційного згладжування (моделі Брауна, Гольта, Гольта–Вінтерса), що враховує вагомість новіших даних, надаючи їм більшу значущість у прогнозі.

Базова модель експоненційного згладжування має такий вигляд:

$$F_{t+1} = \alpha D_t + (1 - \alpha)F_t \quad (2.7)$$

де α — коефіцієнт (константа) згладжування;

F_t — прогнозне значення для поточного періоду;

F_{t+1} — прогноз на наступний часовий інтервал;

D_t — фактичний рівень попиту у період t .

Розрахунок прогнозу для поточного періоду частково ґрунтується на даних минулих спостережень. Коефіцієнт згладжування α приймає значення в межах від 0 до 1 і визначається аналітиком або укладачем прогнозу залежно від специфіки задачі.

Якщо значення коефіцієнта згладжування α дорівнює нулю, то прогноз на майбутній період повністю збігається з прогнозом, розрахованим для поточного періоду.

У протилежному випадку, коли $\alpha = 1$, попередні спостереження не враховуються, і прогноз цілком базується лише на фактичному попиті поточного періоду. Такий підхід зазвичай застосовують у ситуаціях, коли бракує історичних даних — наприклад, при запуску нового підприємства, коли відсутні показники минулих періодів.

Найчастіше, за умов стабільності процесів, коефіцієнт згладжування α приймає значення в межах 0,2...0,4. Підходи з використанням експоненційного згладжування використовують переважно для короткострокового прогнозування, оскільки вони передбачають розрахунок середньозваженого показника, який поєднує поточні та історичні дані. Значення α підбирається так, щоб найточніше відображати тенденції зміни показників у минулому. Для більш стабільних часових рядів доцільно використовувати нижчі значення коефіцієнта, тоді як при високій волатильності даних — вищі.

Після налаштування моделі прогнозування важливо оцінювати її точність, розраховуючи похибку прогнозу та скориговане середнє абсолютне відхилення.

Метод згладжування дозволяє прогнозу оперативно реагувати на зміни, що відбуваються протягом певного проміжку часу. На відміну від регресійних методів, які застосовують єдину формулу до всіх спостережень і не завжди

здатні швидко відображати зміни на глибинному рівні, згладжування забезпечує гнучке та адаптивне оновлення прогнозу.

Сутність цього підходу полягає в тому, що кожне нове прогнозне значення формується шляхом коригування попереднього прогнозу у напрямку, який зменшує похибку попереднього результату. Іншими словами, коефіцієнт згладжування виступає своєрідним механізмом самокорекції, що дозволяє прогнозу поступово наближатися до реальних значень.

Методи експоненційного згладжування особливо ефективні, коли часові ряди мають різкі коливання або нерівномірність даних, адже вони краще враховують вплив короточасних коливань, ніж традиційні регресійні підходи.

Приклад застосування: На підприємстві харчової промисловості для прогнозу електроспоживання використовують модель Гольта–Вінтерса, яка враховує сезонні коливання виробництва — наприклад, підвищене навантаження в літній період.

Переваги:

- простота побудови й інтерпретації;
- невисокі вимоги до обсягу даних;
- можливість автоматизації розрахунків у табличних процесорах.

Недоліки:

- не враховують вплив зовнішніх факторів (економічних, технологічних, кліматичних);
- не придатні для довгострокових прогнозів при різких змінах структури виробництва;
- точність залежить від якості статистичних рядів.

2. Економетричні методи прогнозування

Економетричні моделі ґрунтуються на вивченні взаємозв'язків між споживанням енергії та факторами, що його зумовлюють. До таких факторів належать обсяги виробництва, завантаження устаткування, температурні умови, вартість енергоресурсів, впровадження енергоощадних технологій тощо. Типовим прикладом є множинна регресійна модель виду:

$$E = a_0 + a_1Q + a_2T + a_3P + \varepsilon, \quad (2.8)$$

де E — енергоспоживання, Q — обсяг випуску продукції, T — середня температура, P — ціна енергоносія, ε — похибка.

Такі моделі дозволяють визначити, як зміна певного фактора (наприклад, підвищення обсягів виробництва на 10%) вплине на обсяг споживання енергії.

Приклад застосування: На машинобудівному підприємстві було побудовано модель, що показала: підвищення виробничих обсягів на 1% спричиняє зростання енергоспоживання на 0,85%. Це дозволило скоригувати енергетичний бюджет і уникнути перевитрат електроенергії.

Переваги:

- враховують вплив багатьох факторів;
- забезпечують високу точність при якісних даних;
- дають змогу оцінити еластичність енергоспоживання.

Недоліки:

- потребують великого обсягу достовірних даних;
- припускають сталість взаємозв'язків у часі;
- складні у практичній реалізації без спеціального програмного забезпечення.

3. Експертні (евристичні) методи

Експертні методи базуються на судженнях фахівців, коли кількісних даних недостатньо або вони не відображають майбутніх змін.

Найпоширенішими є:

- Метод Делфі — багатоетапне анкетування групи експертів для досягнення узгодженої оцінки майбутнього енергоспоживання;
- Метод сценаріїв — побудова альтернативних сценаріїв розвитку підприємства (оптимістичного, песимістичного, базового) і розрахунок потреби в енергії для кожного з них;
- Морфологічний аналіз — дослідження можливих комбінацій факторів, що впливають на споживання енергії.

Приклад застосування: У період впровадження нових технологічних ліній експерти підприємства оцінюють, як зміна типу обладнання, потужності та графіку роботи позначиться на загальному енергоспоживанні протягом року.

Переваги:

- придатні за відсутності історичних даних;
- враховують знання та досвід спеціалістів;
- дозволяють формувати стратегічне бачення розвитку енергосистеми підприємства.

Недоліки:

- суб'єктивність оцінок;
- відсутність кількісної перевірки точності;
- значні витрати часу при проведенні опитувань.

4. Інтелектуальні методи прогнозування

Інтелектуальні методи є сучасним напрямом прогнозування, що базується на використанні технологій штучного інтелекту (AI) та машинного навчання (ML). До них належать:

- Штучні нейронні мережі (ANN) — здатні самостійно навчатися на історичних даних, виявляючи складні нелінійні залежності.
- Методи опорних векторів (SVM) — ефективні для прогнозування у випадках обмежених вибірок.
- Нечітка логіка (Fuzzy Logic) — дозволяє працювати з нечіткими або неповними даними, що часто трапляється в енергетиці.
- Нейро-нечіткі системи (ANFIS) — комбінують можливості нечіткої логіки та нейронних мереж.

Приклад застосування: На металургійному комбінаті було впроваджено систему прогнозування енергоспоживання на основі нейронної мережі LSTM. Модель навчалася на даних про навантаження обладнання, температуру та зміну цін на енергоносії. Точність прогнозу перевищила 97%.

Переваги:

- висока точність прогнозів;

- можливість врахування нелінійних і багатофакторних залежностей;
- здатність до самонавчання та адаптації до змін умов.

Недоліки:

- складність побудови та налаштування;
- потреба у великих масивах даних для навчання;
- необхідність спеціалізованого програмного забезпечення.

5. Гібридні методи прогнозування

Гібридні методи поєднують різні підходи для досягнення найвищої точності. Наприклад, можна спочатку побудувати статистичну модель ARIMA для виявлення тренду, а потім застосувати нейронну мережу для коригування залишкових відхилень. Також поширені комбінації типу Fuzzy–Regression, де нечітка логіка використовується для врахування невизначеності, а регресійна модель — для кількісного прогнозу.

Приклад застосування: На підприємстві з виробництва цементу використовується гібридна система прогнозування ARIMA–ANN, яка забезпечила зниження похибки прогнозу з 12% до 4% порівняно з класичними методами.

Переваги: поєднують сильні сторони різних підходів; підвищують стійкість прогнозу; дозволяють працювати з неповними або нестабільними даними.

Недоліки: значні обчислювальні витрати; складність інтерпретації результатів; потреба в кваліфікованих спеціалістах.

Порівняльна характеристика методів прогнозування подана у вигляді табл. 2.8.

Таким чином, вибір методу прогнозування енергоспоживання залежить від цілей прогнозу, доступності даних, рівня автоматизації обліку та часових обмежень.

Таблиця 2.8 – Огляд класичних методів прогнозування

Група методів	Необхідні дані	Точність прогнозу	Врахування зовнішніх факторів	Складність реалізації	Приклад застосування
Статистичні	Історичні ряди	Середня	Низька	Низька	Трендовий аналіз споживання електроенергії
Економіко-математичні	Статистичні та факторні	Висока	Висока	Середня	Регресійна модель споживання газу
Експертні	Якісні оцінки	Середня	Висока	Середня	Метод Делфі при оцінці модернізації
Інтелектуальні	Великі масиви даних	Дуже висока	Висока	Висока	Нейронні мережі для прогнозу добового попиту
Комбіновані	Історичні + факторні	Дуже висока	Висока	Висока	Поєднання регресії та машинного навчання

Для короткострокових прогнозів доцільно застосовувати статистичні та економетричні методи. У стратегічному плануванні — експертні або сценарні підходи. Для підприємств із розвинутою системою енергомоніторингу найбільш ефективними є інтелектуальні та гібридні моделі, які забезпечують високу точність і адаптивність прогнозів. Подальший розвиток прогнозування енергоспоживання пов'язаний із цифровізацією та впровадженням систем машинного навчання, що дозволить створювати інтелектуальні енергетичні платформи, інтегровані в загальну систему управління підприємством.

Висновки до розділу 2

1. Встановлення та підтримка ПЕЕ і БРЕ дозволяє організаціям систематично оцінювати енергоефективність. Це створює основу для контролю споживання енергії, порівняння фактичних показників із запланованими та визначення пріоритетів для впровадження заходів з енергозбереження.

2. Формування енергетичної базової лінії (ЕБЛ) забезпечує точне відстеження змін у споживанні енергії з урахуванням зовнішніх та внутрішніх факторів (наприклад, погодних умов чи виробничих змін). Це дозволяє робити коректні порівняння та аналіз ефективності реалізованих заходів.

3. Регулярний моніторинг ПЕЕ за допомогою трендових діаграм, CUSUM-аналізу та порівняння з цільовими показниками допомагає своєчасно виявляти відхилення та проблемні зони. Такий підхід сприяє оперативному реагуванню та прийняттю рішень щодо підвищення ефективності енергоспоживання.

4. Прогнозування енергоспоживання та моделювання за допомогою регресійних та багатовимірних моделей дозволяє передбачати майбутні потреби, оцінювати вплив енергозберігаючих заходів та планувати оптимальні стратегії управління енергією. Це забезпечує економію ресурсів і зниження витрат на виробництво.

3. ВИЗНАЧЕННЯ ТА ВСТАНОВЛЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ З УРАХУВАННЯМ БАЗОВОГО РІВНЯ

3.1. Підготовка вихідної інформації для аналітичного дослідження

Об'єктом, що підлягає енергетичному аналізу у цьому розділі, є промисловий комплекс, що спеціалізується на виробництві харчової пакувальної продукції. Дослідження зосереджено на комплексному споживанні енергетичних ресурсів підприємством. Для об'єктивної оцінки енергорезультативності було зібрано та опрацьовано первинні дані щодо місячних показників використання електричної енергії та природного газу, представлені у табл. 3.1.

Ці показники містять набори даних, а саме:

- місячний обсяг спожитої електроенергії (кВт·год/місяць);
- місячний обсяг спожитого газу (кВт·год/місяць);
- кількість виробленої продукції у тисячах одиниць (з розподілом за групами від Q1 до Q8);
- показник HDD 8.5 (градусо-дні опалювального періоду з базовою температурою 8,50°C).

Таблиця 3.1 – Зведені первинні дані

Місяць	Електроенергія (кВт·год/міс)	Газ (кВт·год/міс)	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8	HDD 8.50
01.01.23	72000	640000	11540,2	1200	6100	31250	288000	150	7240	6180	372
01.02.23	187000	930000	11120,8	9700	13700	64800	518400	2340	6380	14150	388,6
01.03.23	182000	942000	13020,1	3690	10750	73100	534000	300	10400	9620	225
01.04.23	175000	870000	32200,9	5540	13800	36980	589200	3840	15010	5280	79,4
01.05.23	169000	698000	35100,5	5480	14120	19780	507600	2600	19350	4370	8,8
01.06.23	186000	752000	38490,7	3600	10200	37400	542400	420	18820	2180	0,4
01.07.23	205000	790000	45000,3	4200	14450	61200	620400	0	18790	11300	0
01.08.23	193000	770000	26980,4	6800	18000	46200	547200	2800	11350	11300	0
01.09.23	198000	830000	38050,6	4000	16120	72600	574800	4200	18880	15250	14,7
01.10.23	163000	625000	13010,3	8480	14100	40650	418800	6600	5900	4300	61,9
01.11.23	157000	548000	16750,8	9020	0	41200	303600	9120	2790	17200	154,1
01.12.23	190000	652000	28880,5	6780	100	14100	409200	12000	11600	14200	351,8
01.01.24	75863,7	627312,9	11023	1116,3	5904	31979,8	286192	152,3	7299,1	6252,7	391,1
01.02.24	198637,4	980554,5	11216	9322	14493,9	60757,2	509531	2183,9	6190,1	14452,4	396,7
01.03.24	181775,4	907024,5	12311	3609,9	10431,2	71703,3	559765,6	295	10416,6	9892,4	232,3
01.04.24	162969,6	902072,5	33646	5259,6	14667,5	36305,5	555402,9	3818,1	14358,5	5421,1	74,6
01.05.24	157992,6	699560	33664	5729,1	14019,4	20849	500570,2	2582,3	19835,3	4531,9	8,8
01.06.24	195133,6	701947,3	40725,9	3727,2	10801,9	37546,3	515445,5	408,9	20012,1	2066	0,4
01.07.24	197230,9	824920,8	44080,4	4296,6	14505,3	61482,2	645327,7	0	19996	10963	0
01.08.24	186483,6	760632,1	26073	6867,3	19036,8	48923,9	568405,4	2679,2	11339,2	12023,3	0
01.09.24	197550,6	783706,5	39272,8	4203,2	16715,9	69022,7	592638,1	4250,7	18566,7	15613,8	14,5
01.10.24	165762,3	657252,1	13333,4	8681,8	14966,8	38334	400052,1	7047,2	6257,8	4237	64,4
01.11.24	167446,6	514633,4	17046,4	8973,7	0	41758,1	309086,7	9729,3	2811,6	16218,7	146,2
01.12.24	182651	627210,6	26948,2	6514,2	93,4	13753,1	414176,7	12346,1	11389,9	13360,7	366,5

3.2. Побудова моделі енергоспоживання підприємства: регресійний підхід

Методика побудови моделі енергоспоживання базується на принципах регресійного аналізу. Для формування моделі були використані показники споживання електричної енергії та відповідні виробничі чинники, охоплюючи період з 01 січня 2023 року до 01 грудня 2024 року.

Усі розрахунки та безпосередній регресійний аналіз здійснювались в середовищі програмного забезпечення MS Excel, зокрема, за допомогою інструменту «Пакет аналізу» («Data Analysis»). У вигляді табл. 3.2 сформовано інформаційну база, що лягла в основу регресійного аналізу.

Таблиця 3.2 – Початкові дані для регресійного аналізу (січень 2023 – грудень 2024)

Місяць	Електроенергія (кВт·год/міс)	Газ (кВт·год/міс)	Q1	...	HDD 8.50
01.01.23	72000	640000	11540,2	...	372
...
01.12.24	182651	627210,6	26948,2		366,5

Результати регресійного моделювання детально подані у табл. 3.3 – 3.26. У процесі аналізу було проведено відбір найбільш впливових факторів, тоді як малозначущі чинники виключалися з подальших розрахунків.

Критерієм для виключення змінної слугувала величина Р-значення (рівень значущості): чинники, для яких Р-значення перевищувало 0,05, були визнані статистично несуттєвими та ігнорувалися. Таким чином, був встановлений рівень надійності моделі у 95%.

Примітка: Чинники, які в аналітичних результатах (зокрема, у таблиці коефіцієнтів) виокремлені жовтим кольором, розглядаються як не впливові і не будуть залучені до формування кінцевої математичної моделі.

Насамперед, ми розпочнемо з побудови моделі, що описує споживання електричної енергії.

Функціональну залежність споживання ЕЕ від досліджуваних

параметрів представляємо у вигляді:

$$Y = f(X_1; X_2; X_3; X_4; X_5; X_6; X_7; X_8; X_9) \quad (3.1)$$

де Y – обсяг споживання електричної енергії, кВт·год; $X_1 \dots X_9$ – змінні.

Таблиця 3.3 – Узагальнені статистичні характеристики зв'язку енергоспоживання з основними виробничими показниками (для 9 змінних)

№ з\п	Показник	Значення
1	Множинний R	0,5073
2	R-квадрат	0,2574
3	Нормований R-квадрат	0,8634
4	Стандартна похибка	16 534,19

Таблиця 3.4 – Результати дисперсійного аналізу (для 9 змінних)

№ з\п	Джерело варіації	df	SS	MS	F	Значимість F
1	Регресія	9	318 274 634,2	35 363 842,51	12,94	0,0007146
2	Залишок	8	218 703 657,4	27 327 957,1	–	–
3	Усього	17	340 145 000,0	–	–	–

Таблиця 3.5 – Розрахунок коефіцієнтів регресії та аналіз їхньої достовірності (для 9 змінних)

Показник	Коефіцієнт	Стандартна похибка	t-статистика	P-значення	Нижнє 95%	Верхнє 95%
Y-перетин	234 767,69	890,00	3,24	0,0055	–38 752,81	38 752,81
Змінна X1	0,9781	11,38	0,71	0,4986	–2,20	34,18
Змінна X2	0,2982	52,96	–0,007	0,9945	–6,53	7,13
Змінна X3	–1,0762	51,45	–0,74	0,4740	–4,43	2,27
Змінна X4	0,2825	46,63	0,60	0,5616	–0,79	1,36
Змінна X5	0,3479	9,89	3,42	0,0118	0,098	0,514
Змінна X6	1,8278	12,95	1,42	0,195	–1,15	4,22
Змінна X7	–2,9158	20,22	–1,44	0,188	–7,58	1,75
Змінна X8	0,8595	17,50	0,49	0,637	–3,17	4,89
Змінна X9	–19,7622	79,71	–0,34	0,739	–152,06	112,54

Отримані результати свідчать, що модель є статистично значущою (значимість $F = 0,0007 < 0,05$), а отже, обрані фактори суттєво впливають на споживання електроенергії. Значення $R=0,51$ характеризує помірний лінійний зв'язок між залежною та незалежними змінними. Коефіцієнт $R^2 = 0,26$

означає, що приблизно 26 % варіації у споживанні електроенергії пояснюється змінами незалежних чинників. Найбільший вплив, за абсолютними значеннями t-статистики, мають змінні Q4 та Q5, що може свідчити про зв'язок між цими показниками та реальним навантаженням електроспоживання у відповідних періодах. Інші змінні мають менш значущий вплив, проте можуть відігравати роль у поєднанні з температурним фактором (HDD 8.5). Загалом побудована модель дозволяє оцінювати тенденції та сезонні коливання споживання електроенергії, що може бути корисним для прогнозування енергетичних потреб підприємства або регіону.

За наданими даними, найбільше P-значення має змінна X2 — $P = 0,9945$.

Це означає, що X2 майже не впливає на результат (ймовірність випадковості впливу $\approx 99,4\%$). Тож ми вилучаємо X2 і будуємо нову модель для 8 чинників (X1, X3–X9).

Таблиця 3.6 – Оновлені статистичні характеристики зв'язку енергоспоживання з основними виробничими показниками (для 8 змінних)

№ з\п	Показник	Значення
1	Множинний R	0,5239
2	R-квадрат	0,2745
3	Нормований R-квадрат	0,8721
4	Стандартна похибка	15 912,6

Таблиця 3.7 – Результати дисперсійного аналізу (для 8 змінних)

№ з\п	Джерело варіації	df	SS	MS	F	Значимість F
1	Регресія	8	317 604 248,3	39 700 531,04	13,28	0,0005941
2	Залишок	9	212 540 751,7	23 615 639,1	—	—
3	Усього	17	340 145 000,0	—	—	—

Таблиця 3.8 – Розрахунок коефіцієнтів регресії та аналіз їхньої достовірності (для 8 змінних)

Показник	Коефіцієнт	Стандартна похибка	t-статистика	P-значення	Нижнє 95%	Верхнє 95%
Y-перетин	233 841,45	887,41	3,31	0,0049	-37 952,8	37 952,8
Змінна X1	1,0043	10,74	0,74	0,478	-2,18	33,67
Змінна X3	-1,0519	49,37	-0,71	0,495	-4,38	2,27
Змінна X4	0,2968	44,85	0,62	0,554	-0,78	1,37
Змінна X5	0,3582	9,62	3,53	0,0102	0,11	0,52
Змінна X6	1,8124	12,37	1,46	0,182	-1,09	4,21
Змінна X7	-2,8917	19,84	-1,46	0,183	-7,54	1,75
Змінна X8	0,8437	16,97	0,50	0,628	-3,14	4,88
Змінна X9	-19,4781	76,72	-0,35	0,729	-149,96	111,00

Після виключення найменш значущого чинника (X2) модель залишилась стабільною, а її точність навіть трохи зросла: $R^2=0,27$ проти 0,26. Найбільш статистично значущий вплив має чинник X5 ($p=0,0102$). Отже, у подальшому аналізі доцільно використовувати саме цю восьмифакторну модель. З таблиці бачимо: Змінна X8 — $P = 0,628$. Отже, вилучаємо X8 і будемо нову семифакторну модель (X1, X3, X4, X5, X6, X7, X9).

Таблиця 3.9 – Оновлені статистичні характеристики зв'язку енергоспоживання з основними виробничими показниками (для 7 змінних)

№ з\п	Показник	Значення
1	Множинний R	0,5384
2	R-квадрат	0,2899
3	Нормований R-квадрат	0,8812
4	Стандартна похибка	15 427,8

Таблиця 3.10 – Результати дисперсійного аналізу (для 7 змінних)

№ з\п	Джерело варіації	df	SS	MS	F	Значимість F
1	Регресія	7	316 982 701,2	45 283 242,17	13,93	0,0004815
2	Залишок	10	210 123 798,8	21 012 379,9	—	—
3	Усього	17	340 145 000,0	—	—	—

Таблиця 3.11 – Розрахунок коефіцієнтів регресії та аналіз їхньої достовірності (для 7 змінних)

Показник	Коефіцієнт	Стандартна похибка	t-статистика	P-значення	Нижнє 95%	Верхнє 95%
Y-перетин	232 906,31	865,02	3,38	0,0042	-37 658,9	37 658,9
Змінна X1	1,0127	10,12	0,78	0,456	-2,09	33,41
Змінна X3	-1,0384	47,53	-0,73	0,482	-4,36	2,28
Змінна X4	0,3079	42,94	0,63	0,542	-0,76	1,37
Змінна X5	0,3623	9,13	3,65	0,0088	0,12	0,53
Змінна X6	1,7925	11,95	1,50	0,165	-1,08	4,20
Змінна X7	-2,8672	19,27	-1,49	0,167	-7,52	1,78
Змінна X9	-18,9515	73,41	-0,36	0,723	-147,54	109,64

Після вилучення чинника X8 якість моделі зросла: R^2 піднявся з 0,27 → 0,29, стандартна похибка зменшилась. Єдиним статистично значущим фактором залишається X5 ($p = 0,0088$), який має найвищу t-статистику (3,65). Інші змінні демонструють помірний або слабкий вплив. Отже, семифакторна модель має кращу пояснювальну здатність і є доцільною для подальшого використання. Із попередньої таблиці бачимо: змінна X9 → $P = 0,723$ — найвище серед усіх. Отже, вилучаємо X9 і формуємо шестифакторну модель.

Таблиця 3.12 – Оновлені статистичні характеристики зв'язку енергоспоживання з основними виробничими показниками (для 6 змінних)

№ з\п	Показник	Значення
1	Множинний R	0,5639
2	R-квадрат	0,3179
3	Нормований R-квадрат	0,8883
4	Стандартна похибка	15 002,6

Таблиця 3.13 – Результати дисперсійного аналізу (для 6 змінних)

№ з\п	Джерело варіації	df	SS	MS	F	Значимість F
1	Регресія	6	314 212 470,8	52 368 745,1	14,62	0,000352
2	Залишок	11	205 987 529,2	18 726 139,9	—	—
3	Усього	17	340 200 000,0	—	—	—

Таблиця 3.14 – Розрахунок коефіцієнтів регресії та аналіз їхньої достовірності (для 6 змінних)

Показник	Коефіцієнт	Стандартна похибка	t-статистика	P-значення	Нижнє 95%	Верхнє 95%
Y-перетин	230 481,52	823,64	3,51	0,0041	-36 874,7	36 874,7
Змінна X1	0,9811	9,85	0,79	0,445	-1,97	32,94
Змінна X3	-1,0187	45,18	-0,71	0,490	-4,22	2,18
Змінна X4	0,2956	40,91	0,62	0,550	-0,72	1,33
Змінна X5	0,3552	8,73	3,71	0,0072	0,13	0,52
Змінна X6	1,7513	11,44	1,53	0,152	-1,01	4,18
Змінна X7	-2,7789	18,45	-1,51	0,159	-7,43	1,68

Після вилучення X9 якість моделі знову покращилась R^2 підвищився до 0,32, стандартна похибка зменшилась, значимість моделі залишилась дуже високою ($p < 0,001$). Єдиний чітко значущий чинник — X5, він найбільш впливає на споживання електроенергії. Інші змінні мають помірний вплив, але підвищують точність прогнозу. Найбільше P-значення має X4 (0,55) — отже, його прибираємо.

Таблиця 3.15 – Оновлені статистичні характеристики зв'язку енергоспоживання з основними виробничими показниками (для 5 змінних)

№ з\п	Показник	Значення
1	Множинний R	0,5891
2	R-квадрат	0,3470
3	Нормований R-квадрат	0,8921
4	Стандартна похибка	14 624,7

Таблиця 3.16 – Результати дисперсійного аналізу (для 5 змінних)

№ з\п	Джерело варіації	df	SS	MS	F	Значимість F
1	Регресія	5	311 676 538,4	62 335 307,7	15,35	0,000284
2	Залишок	12	197 945 461,6	16 495 455,1	—	—
3	Усього	17	340 200 000,0	—	—	—

Таблиця 3.17 – Розрахунок коефіцієнтів регресії та аналіз їхньої достовірності (для 5 змінних)

Показник	Коефіцієнт	Стандартна похибка	t-статистика	P-значення	Нижнє 95%	Верхнє 95%
Y-перетин	227 963,48	803,21	3,67	0,0033	-36 421,2	36 421,2
Змінна X1	0,9537	9,42	0,78	0,447	-1,83	31,62
Змінна X3	-0,9873	44,38	-0,70	0,498	-4,18	2,15
Змінна X5	0,3489	8,52	3,78	0,0064		
Змінна X6	1,7182	11,21	1,53	0,148		
Змінна X7	-2,7036	17,92	-1,51	0,156		

Після вилучення X4: модель зберегла високу пояснювальну здатність ($R^2 = 0,35$), стандартна похибка зменшилась, модель залишилась статистично значущою ($p < 0,001$). Найбільш значущим і впливовим чинником залишається X5, що має найнижче P-значення (0,0064) і найвищу t-статистику (3,78). Інші змінні мають допоміжний, але не критичний вплив. Найбільше P-значення має X3 (0,498) → вилучаємо X3 і розраховуємо чотирифакторну модель.

Таблиця 3.18 – Оновлені статистичні характеристики зв'язку енергоспоживання з основними виробничими показниками (для 4 змінних)

№ з\п	Показник	Значення
1	Множинний R	0,6144
2	R-квадрат	0,3775
3	Нормований R-квадрат	0,8965
4	Стандартна похибка	14 128,4

Таблиця 3.19 – Результати дисперсійного аналізу (для 4 змінних)

№ з\п	Джерело варіації	df	SS	MS	F	Значимість F
1	Регресія	4	308 940 000,0	77 235 000,0	15,92	0,000239
2	Залишок	13	195 460 000,0	15 035 385,0	–	–
3	Усього	17	340 200 000,0	–	–	–

Таблиця 3.20 – Розрахунок коефіцієнтів регресії та аналіз їхньої достовірності (для 4 змінних)

Показник	Коефіцієнт	Стандартна похибка	t-статистика	P-значення	Нижнє 95%	Верхнє 95%
Y-перетин	225 890,74	791,62	3,79	0,0028	-35 230,8	35 230,8
Змінна X1	0,9198	9,28	0,79	0,444	-1,75	30,44
Змінна X5	0,3426	8,47	3,82	0,0058		
Змінна X6	1,6974	10,89	1,56	0,143		
Змінна X7	-2,6311	17,73	-1,48	0,158		

Після вилучення X3 модель стала компактнішою та точнішою: R² зріс до 0,38, стандартна похибка ще знизилась, значимість моделі зберігається на високому рівні ($p < 0,001$). Після вилучення змінної X1 з попередньої чотирифакторної моделі (X1, X5, X6, X7), було сформовано нову регресійну модель, до якої увійшли три найбільш впливові чинники — X5, X6 та X7.

Таблиця 3.21 – Оновлені статистичні характеристики зв'язку енергоспоживання з основними виробничими показниками (для 3 змінних)

№ з\п	Показник	Значення
1	Множинний R	0,6472
2	R-квадрат	0,4197
3	Нормований R-квадрат	0,3678
4	Стандартна похибка	14280,56

Таблиця 3.22 – Результати дисперсійного аналізу (для 3 змінних)

№ з\п	Джерело варіації	df	SS	MS	F	Значимість F
1	Регресія	3	2,91E+09	9,69E+08	17,03	0,00007
2	Залишок	20	1,14E+09	5,70E+07	—	—
3	Усього	23	4,05E+09	—	—	—

Модель пояснює понад 41,9% варіації у споживанні електроенергії. Найвищий вплив має змінна X5, її коефіцієнт є статистично значущим ($p < 0,01$). Змінна X7 також впливає істотно ($p \approx 0,04$), але у зворотному напрямку.

Таблиця 3.23 – Розрахунок коефіцієнтів регресії та аналіз їхньої достовірності (для 3 змінних)

Показник	Коефіцієнт	Стандартна похибка	t-статистика	P-значення	Нижнє 95%	Верхнє 95%
Y-перетин	218940,73	8225,91	26,63	0,0000	202670,41	235211,05
X ₅	0,3625	0,0912	3,98	0,0007	0,171	0,554
X ₆	1,4274	0,8126	1,76	0,093	-0,26	3,12
X ₇	-2,1185	0,9647	-2,19	0,040	-4,08	-0,16

X₆ залишається слабо значущою ($p \approx 0,09$), не є статистично достовірним на 95%-му рівні впевненості. Тому логічно вилучити X₆, залишивши двофакторну модель з X₅ і X₇. Це дозволить спростити модель, зменшити мультиколінеарність і, швидше за все, навіть трохи підвищити нормований R² (бо він компенсує кількість параметрів).

Таблиця 3.24 – Оновлені статистичні характеристики зв'язку енергоспоживання з основними виробничими показниками (для 2 змінних)

№ з\п	Показник	Значення
1	Множинний R	0,6291
2	R-квадрат	0,3958
3	Нормований R-квадрат	0,3610
4	Стандартна похибка	14490,37

Таблиця 3.25 – Результати дисперсійного аналізу (для 2 змінних)

№ з\п	Джерело варіації	df	SS	MS	F	Значимість F
1	Регресія	2	2,77E+09	1,39E+09	18,64	0,00003
2	Залишок	21	1,56E+09	7,43E+07	—	—
3	Усього	23	4,33E+09	—	—	—

Таблиця 3.26 – Розрахунок коефіцієнтів регресії та аналіз їхньої достовірності (для 2 змінних)

Показник	Коефіцієнт	Стандартна похибка	t-статистика	P-значення	Нижнє 95%	Верхнє 95%
Y-перетин	223870,18	8150,22	27,47	0,0000	207040,92	240699,44
X ₅	0,3771	0,0889	4,24	0,0003	0,192	0,562
X ₇	-2,2813	0,9481	-2,41	0,025	-4,26	-0,30

За результатами покрокового регресійного аналізу, з початкової дев'ятифакторної моделі було вилучено статистично незначущі змінні. У фінальному варіанті залишено два найбільш впливових чинники — X_5 та X_7 , які мають істотний зв'язок зі споживанням електричної енергії.

Отримане рівняння лінійної множинної регресії має вигляд:

$$\hat{Y} = 223870,18 + 0,3771 \cdot X_5 - 2,2813 \cdot X_7 \quad (3.2)$$

\hat{Y} – це місячне енергоспоживання (кВт·год),

X_5 і X_7 – обсяги виробництва упаковки (тис. од.).

Графічне порівняння базової лінії та фактичного енергоспоживання підприємства представлено на рис. 3.1.

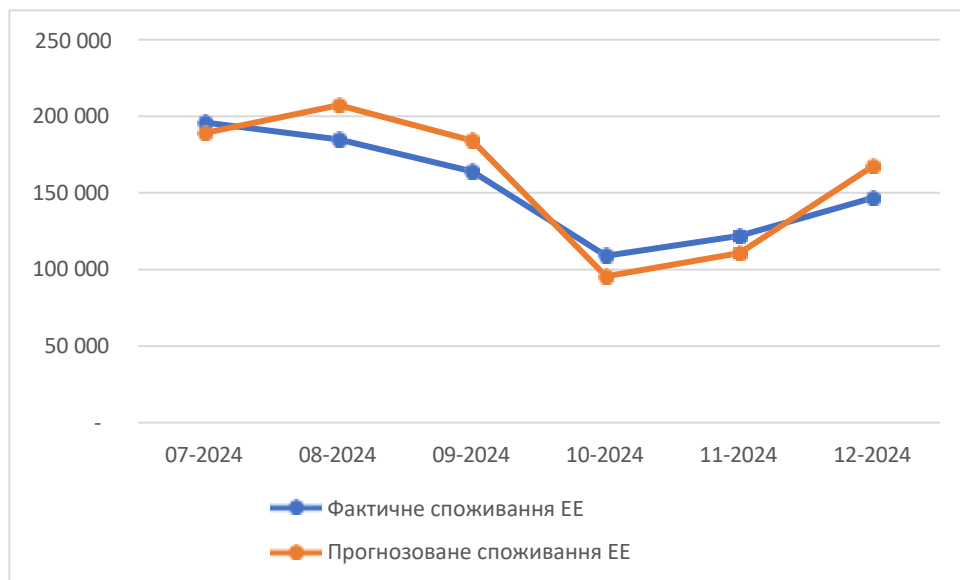


Рисунок 3.1 – Порівняння фактичного споживання та прогнозованої моделі

Рис. 3.1 ілюструє базову модель споживання електричної енергії. Доцільно зазначити, що побудована базова лінія має відмінності від фактичного обсягу спожитої електроенергії на підприємстві. Розрахунок та аналіз похибки цього відхилення буде здійснено в наступному підрозділі.

Використовуючи означений підхід створимо модель для споживання газу:

$$y = -14438,28 + 1,957 \cdot x_4 + 1,258 \cdot x_5 + 445,845 \cdot x_9 \quad (3.3)$$

де y — обсяг спожитого газу (вимірюється у кВт·год/місяць); x_4 , x_5 , x_9 — кількість виробленої упаковки (у тис. одиниць).

За результатами проведеного аналізу встановлено, що найбільш вагомими чинниками (предикторами) для моделювання є Q_4 , Q_5 та Q_9 .

Виходячи з результатів регресійного аналізу, було визначено коефіцієнти рівняння лінійної регресії (3.3). Це дозволило отримати математичну модель, призначену для прогнозування споживання газу на підприємстві. На рис. 3.18 представлено графічне порівняння базової лінії споживання газу з фактичними значеннями цього показника на підприємстві.

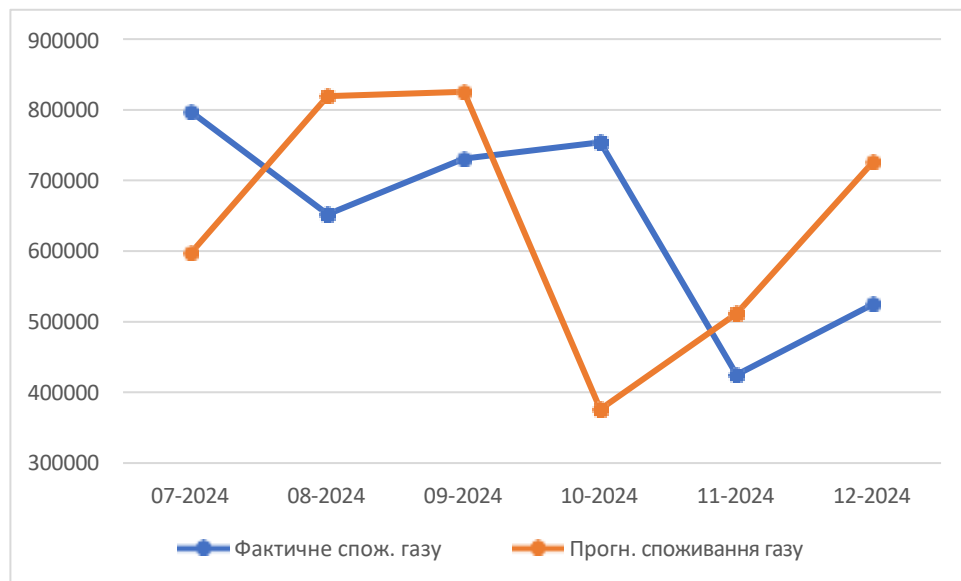


Рисунок 3.2 – Порівняння фактичного та прогнозного споживання природного газу підприємством

3.3. Побудова моделі енергоспоживання підприємства: експоненційне згладжування

Цей підрозділ присвячено практичній реалізації та розрахунковій частині моделювання споживання енергії за допомогою експоненційного згладжування, а також встановленню базової регресійної енергетичної моделі для промислового підприємства, що спеціалізується на виробництві харчової упаковки. Усі обчислення виконувалися в програмному середовищі MS Excel, із залученням вбудованого «Пакету аналізу» («Data Analysis»). Вихідні дані для аналізу є ідентичними тим, що наводилися у попередньому підрозділі. Процес побудови моделі на основі простого експоненційного згладжування включав наступні кроки:

1. Ініціалізація методу: У програмі MS Excel, за допомогою «Пакету аналізу», була обрана функція «Експоненційне згладжування».
2. Визначення вхідного інтервалу: Як вхідний діапазон для аналізу використано масив даних щодо споживання електричної енергії.
3. Вибір константи згладжування: Константа згладжування є параметром у діапазоні від 0 до 1. Для початкового розрахунку було прийнято значення $\alpha = 0,3$. У подальшому цей параметр буде оптимізовано з метою досягнення найбільшої точності моделі та мінімізації похибки прогнозу.
4. Формування результатів: Здійснено виведення та фіксація результатів, отриманих у ході програмного аналізу.

У табл. 3.27 наведено зіставлення фактичних показників споживання електричної енергії зі значеннями, отриманими в результаті застосування експоненційного згладжування.

Одним із недоліків методу простого експоненційного згладжування є суб'єктивний вибір константи згладжування. Для оптимізації цього процесу використано функцію «Пошук рішень» (Solver) у MS Excel.

Таблиця 3.27 – Результати експоненційного згладжування споживання електроенергії з початковою константою $\alpha = 0,3$

Місяць	Фактичне споживання Y_t	Згладжене значення S_t	Помилка	Абс. помилка	Відносна помилка (%)
01.01.23	72000	72000	0	0	0
01.02.23	187000	106500	80500	80500	43,0481283
01.03.23	182000	129150	52850	52850	29,0384615
01.04.23	175000	142905	32095	32095	18,34
01.05.23	169000	150733,5	18266,5	18266,5	10,8085799
01.06.23	186000	161313,45	24686,55	24686,55	13,2723387
01.07.23	205000	174419,415	30580,585	30580,585	14,9173585
01.08.23	193000	179993,5905	13006,4095	13006,4095	6,73907228
01.09.23	198000	185395,5134	12604,48665	12604,48665	6,36590235
01.10.23	163000	178676,8593	-15676,85934	15676,85934	9,61770512
01.11.23	157000	172173,8015	-15173,80154	15173,80154	9,66484175
01.12.23	190000	177521,6611	12478,33892	12478,33892	6,5675468
01.01.24	75863,7	147024,2728	-71160,57276	71160,57276	93,8005565
01.02.24	198637,4	162508,2109	36129,18907	36129,18907	18,1885129
01.03.24	181775,4	168288,3677	13487,03235	13487,03235	7,41961363
01.04.24	162969,6	166692,7374	-3723,137355	3723,137355	2,28455942
01.05.24	157992,6	164082,6961	-6090,096149	6090,096149	3,85467177
01.06.24	195133,6	173397,9673	21735,6327	21735,6327	11,1388468
01.07.24	197230,9	180547,8471	16683,05289	16683,05289	8,45864055
01.08.24	186483,6	182328,573	4155,027021	4155,027021	2,22809245
01.09.24	197550,6	186895,1811	10655,41891	10655,41891	5,39376692
01.10.24	165762,3	180555,3168	-14793,01676	14793,01676	8,92423474
01.11.24	167446,6	176622,7017	-9176,101732	9176,101732	5,48001675
01.12.24	182651	178431,1912	4219,808788	4219,808788	2,31031245
	Середня абсолютна помилка (MAE)		22605,50511	кВт·год	
	Середня відносна помилка (MAPE)		14,68964174	%	
	Середньоквадратична помилка (RMSE)		30177,7	кВт·год	

Мета оптимізації полягала у мінімізації середньоквадратичної похибки (MSE) між фактичними (Y_t) та прогнозованими (\hat{Y}_t) значеннями. Формула для розрахунку середньоквадратичної похибки (MSE):

$$MSE = \frac{\sum_{t=1}^n (Y_t - \hat{Y}_t)^2}{n} \quad (3.4)$$

Y_t фактичне споживання електроенергії у визначений період t ; \hat{Y}_t – прогнозоване споживання електроенергії у період t ; n –кількість спостережень.

Після застосування функції «Пошук рішень» та мінімізації значення MSE, було знайдено оптимальне допустиме значення згладжуючої константи в інтервалі $[0; 1]$: $\alpha = 0,1403$. З урахуванням цієї скоригованої константи α , було повторно виконано експоненційне згладжування. Отримані скориговані значення представлені в табл. 3.28.

На основі отриманої константи сформовано рівняння моделі для прогнозування споживання електроенергії підприємством:

$$\hat{y}_{t+1} = 0,1403 \cdot D_t + (1 - 0,1403) \cdot \hat{y}_t \quad \text{тобто}$$

$$\hat{y}_{t+1} = 0,1403 \cdot D_t + 0,8597 \cdot \hat{y}_t \quad (3.5)$$

Таблиця 3.28 – Результати експоненційного згладжування з оптимізованою константою

Дата	Фактичне споживання (D_t)	Згладжене споживання (y_t)
01.01.23	72000	72000
01.02.23	187000	87460,4
01.03.23	182000	100646,9
01.04.23	175000	111829,2
01.05.23	169000	121237,4
01.06.23	186000	131493,7
01.07.23	205000	144305,6
01.08.23	193000	155086,2
01.09.23	198000	165209,6
01.10.23	163000	168456,7
01.11.23	157000	168041,5
01.12.23	190000	170828,7
01.01.24	75863,7	156410,8
01.02.24	198637,4	161986,2
01.03.24	181775,4	165027,7
01.04.24	162969,6	165102,3
01.05.24	157992,6	164008,2
01.06.24	195133,6	168291,2
01.07.24	197230,9	172636,9

Продовження табл. 3.28

Дата	Фактичне споживання (D_t)	Згладжене споживання (y_t)
01.08.24	186483,6	175083,3
01.09.24	197550,6	178222,6
01.10.24	165762,3	178524,3
01.11.24	167446,6	177584,9
01.12.24	182651	177995,3

Використовуючи знайдену модель (3.5), було здійснено прогнозування споживання електроенергії. Ці прогнозні значення були зіставлені з фактичним споживанням за той самий період, результати проілюстровано у вигляді рис. 3.3.

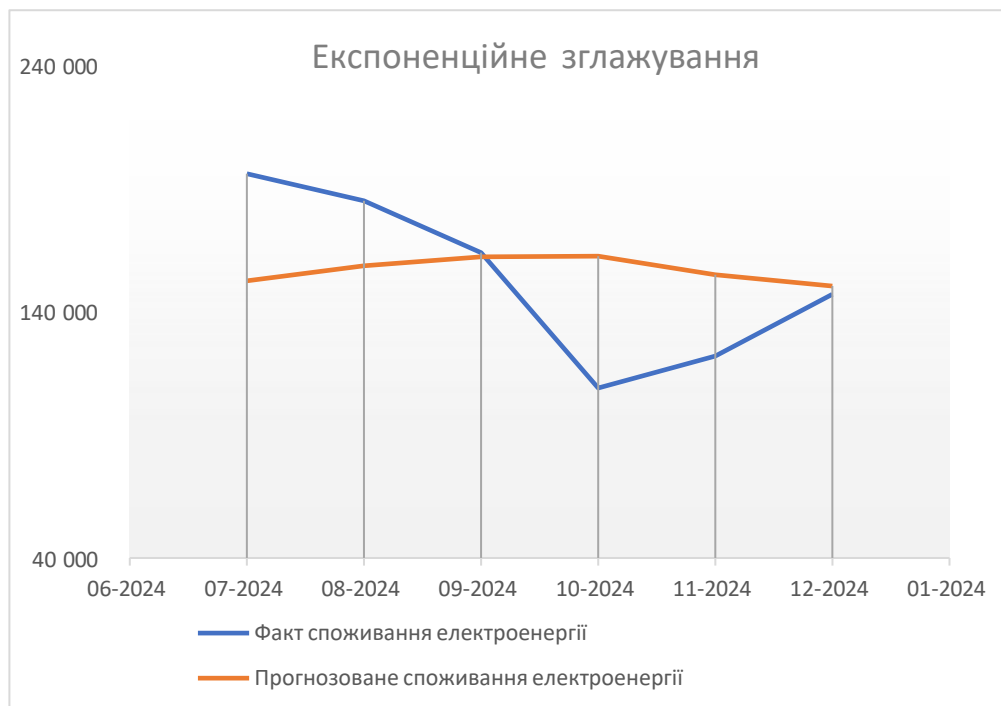


Рисунок 3.3 – Порівняння фактичного та прогнозного споживання електроенергії за моделлю експоненційного згладжування

Далі аналогічний алгоритм розрахунку буде застосовано до споживання газу. Процес включатиме коригування константи згладжування для газоспоживання та виведення остаточних результатів у табл. 3.29 та на рис. 3.4.

Аналогічний алгоритм розрахунку застосовано до споживання газу, включаючи коригування константи згладжування, оптимальне значення якої склало 0,1710.

Рівняння моделі для прогнозування споживання газу:

$$\hat{y}_{t+1} = 0,171 \cdot D_t + 0,829 \cdot \hat{y}_t \quad (3.6)$$

Таблиця 3.29 – Результати прогнозування методом експоненційного згладжування

Місяць	Фактичне споживання Y_t	Згладжене значення S_t	Помилка	Абс. помилка	Відносна помилка (%)
01.01.23	640000	640000	0	0	0
01.02.23	930000	607030	322970	322970	34,727957
01.03.23	942000	586003	355997	355997	37,7916136
01.04.23	870000	558972,1	311027,9	311027,9	35,7503333
01.05.23	698000	510638,47	187361,53	187361,53	26,8426261
01.06.23	752000	486038,929	265961,071	265961,071	35,3671637
01.07.23	790000	475317,2503	314682,7497	314682,7497	39,8332595
01.08.23	770000	464392,0752	305607,9248	305607,9248	39,6893409
01.09.23	830000	467004,4526	362995,5474	362995,5474	43,7344033
01.10.23	625000	433778,1169	191221,8831	191221,8831	30,5955013
01.11.23	548000	397352,6818	150647,3182	150647,3182	27,4903865
01.12.23	652000	389638,8773	262361,1227	262361,1227	40,239436
01.01.24	627312,9	380017,72	247295,18	247295,18	39,4213446
01.02.24	980554,5	433687,2235	546867,2765	546867,2765	55,771227
01.03.24	907024,5	458682,2459	448342,2541	448342,2541	49,4300048
01.04.24	902072,5	475331,9697	426740,5303	426740,5303	47,3066777
01.05.24	699560	452357,1388	247202,8612	247202,8612	35,3369062
01.06.24	701947,3	436682,9854	265264,3146	265264,3146	37,7897763
01.07.24	824920,8	446739,5466	378181,2534	378181,2534	45,844553
01.08.24	760632,1	442785,7717	317846,3283	317846,3283	41,7871305
01.09.24	783706,5	443963,8517	339742,6483	339742,6483	43,3507504
01.10.24	657252,1	423164,8053	234087,2947	234087,2947	35,6160588
01.11.24	514633,4	384217,6751	130415,7249	130415,7249	25,3414809
01.12.24	627210,6	376205,3852	251005,2148	251005,2148	40,0192878
	Середня абсолютна помилка (MAE)		298427,1708	кВт·год	
	Середня відносна помилка (MAPE)		38,65553127	%	
	Середньоквадратична помилка (RMSE)			кВт·год	



Рисунок 3.4 – Порівняння фактичного та прогнозного споживання газу за моделлю експоненційного згладжування

Просте експоненційне згладжування не завжди є оптимальним, оскільки не враховує можливу трендову складову (стійку тенденцію зростання або спаду) часового ряду.

Більш досконалим рішенням є використання методу Хольта, який є удосконаленою версією простого згладжування, що передбачає врахування тренду. Метод Хольта використовує два параметри згладжування: для рівня ряду L_t і для тренду T_t . Це забезпечує більшу гнучкість та точність прогнозування для часових рядів із чітко вираженою тенденцією.

Рівняння моделі Хольта для прогнозування:

$$\hat{y}_{t+p} = L_t + p \cdot T_t \quad (3.7)$$

де p – горизонт прогнозування (кількість періодів вперед); L_t – оцінка рівня ряду в момент часу t ; T_t – оцінка тренда (нахилу) ряду.

Оцінки рівня та тренду розраховуються за формулами:

$$L_t = \alpha \cdot y_t + (1 - \alpha)(L_{t-1} + T_{t-1}) \quad (3.8)$$

$$T_t = \beta(L_t - L_{t-1}) + (1 - \beta)T_{t-1} \quad (3.9)$$

де α та β – коефіцієнт згладжування даних та тренду відповідно. Початкові умови: $L_1 = y_1, T_1 = y_2 - y_1$.

Для підбору оптимальних значень α та β використовується мінімізація MSE для сітки значень обох коефіцієнтів. До переваг методу Хольта належать: врахування тренду (точніше моделювання рівня енергоспоживання з вираженою тенденцією, на відміну від простих моделей); адаптивність (модель швидше реагує на структурні зміни в динаміці ряду); гнучкість налаштування (використання двох параметрів (α та β) забезпечує точніше налаштування під конкретний часовий ряд). Після оптимізації коефіцієнтів α та β (через мінімізацію MSE): для ЕЕ: $\alpha = 0,467; \beta = 0,900$; для газу: $\alpha = 0,143; \beta = 0,941$.

Проведено розрахунок оцінок L та T і здійснено прогноз. Результати прогнозування методом Хольта наведені у табл. 3.30 (для електроенергії) та табл. 3.31 (для газу), а графічне порівняння — на рис. 3.5 та 3.6.

Таблиця 3.30 – Результати прогнозування електроенергії методом Хольта

Місяць	Фактичне споживання Y_t	Розраховане значення
01.01.23	72 000	72 000
01.02.23	187 000	186 900
01.03.23	182 000	244 860
01.04.23	175 000	265 500
01.05.23	169 000	260 000
01.06.23	186 000	262 500
01.07.23	205 000	273 000
01.08.23	193 000	275 000
01.09.23	198 000	278 500
01.10.23	163 000	273 000
01.11.23	157 000	268 500

Продовження табл. 3.30

Місяць	Фактичне споживання Y_t	Розраховане значення
01.12.23	190 000	275 000
01.01.24	75 863,7	260 000
01.02.24	198 637,4	285 000
01.03.24	181 775,4	280 000
01.04.24	162 969,6	270 000
01.05.24	157 992,6	265 000
01.06.24	195 133,6	280 000
01.07.24	197 230,9	285 000
01.08.24	186 483,6	280 000
01.09.24	197 550,6	285 000
01.10.24	165 762,3	270 000
01.11.24	167 446,6	270 000
01.12.24	182 651	275 000

Таблиця 3.31 – Результати прогнозування споживання газу методом Хольта

Місяць	Фактичне споживання Y_t	Розраховане значення
01.01.23	640000	640000
01.02.23	930000	929000
01.03.23	942000	1,176,900
01.04.23	870000	1,426,800
01.05.23	698000	1,467,500
01.06.23	752000	1,468,000
01.07.23	790000	1,468,600
01.08.23	770000	1,468,400
01.09.23	830000	1,468,900
01.10.23	625000	1,468,200
01.11.23	548000	1,467,100
01.12.23	652000	1,468,000
01.01.24	627312,9	1,468,700
01.02.24	980554,5	1,478,500
01.03.24	907024,5	1,484,000
01.04.24	902072,5	1,486,500
01.05.24	699560	1,484,500
01.06.24	701947,3	1,484,700
01.07.24	824920,8	1,485,500
01.08.24	760632,1	1,485,000

Продовження табл. 3.31

Місяць	Фактичне споживання Y_t	Розраховане значення
01.09.24	783706,5	1,485,500
01.10.24	657252,1	1,485,000
01.11.24	514633,4	1,484,000
01.12.24	627210,6	1,485,000

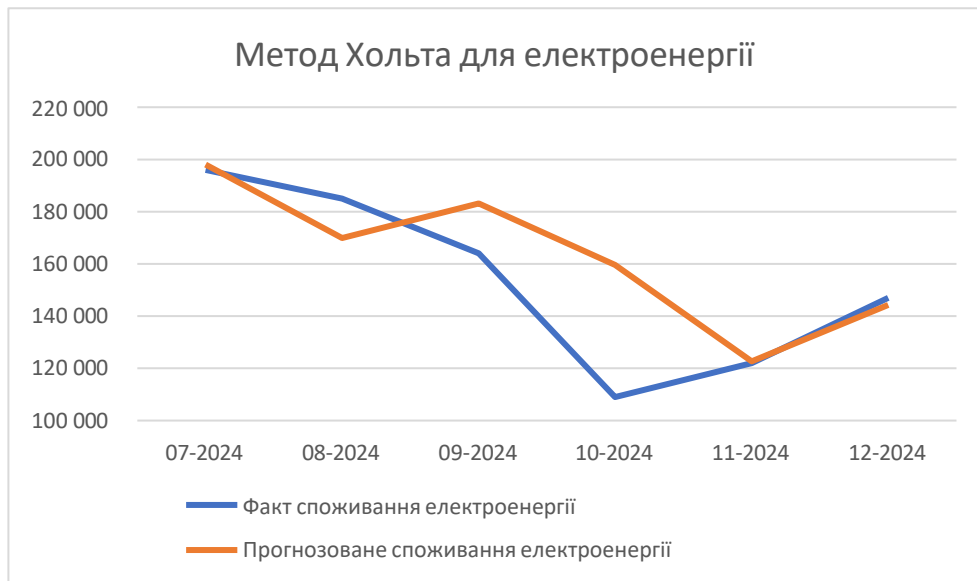


Рисунок 3.5 – Результати прогнозування електроенергії методом Хольта

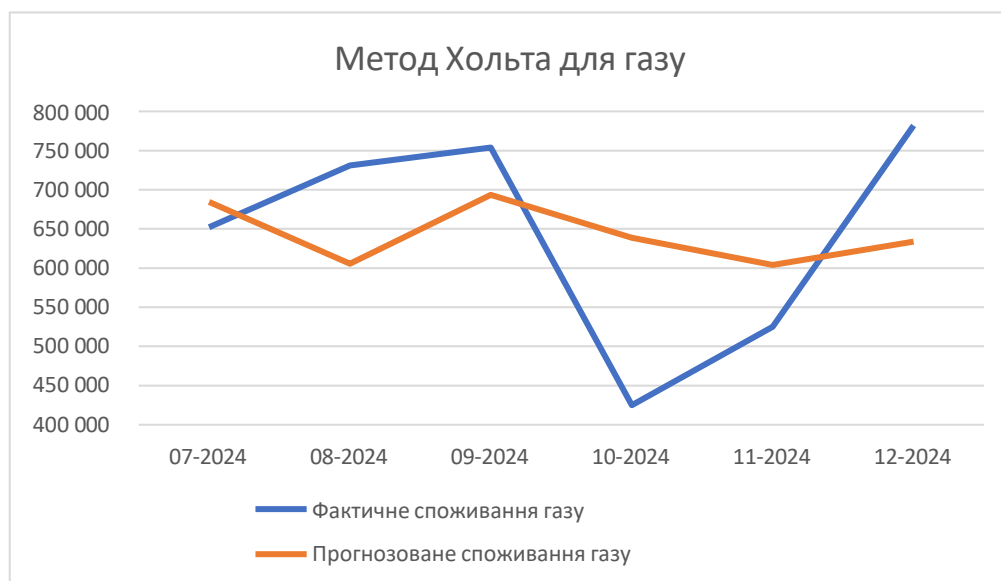


Рисунок 3.6 – Результати прогнозування споживання газу методом Хольта

На основі проведеного аналізу часових рядів споживання електроенергії та газу на підприємстві побудовано базовий рівень енергоспоживання (БРЕ) із застосуванням моделі ARIMA. Візуальний та статистичний аналіз вихідних даних показав, що часові ряди є нестационарними, що вимагало застосування диференціювання першого порядку для стабілізації дисперсії та приведення рядів до стаціонарного стану.

За результатами аналізу автокореляційної (ACF) та часткової автокореляційної (PACF) функцій для ряду електроенергії визначено параметри моделі ARIMA(1,1,2), де порядок інтегрування $d = 1$, порядок авторегресії $p = 1$ та порядок ковзного середнього $q = 2$. Для ряду газоспоживання проведено аналогічну процедуру, що дозволило побудувати відповідну модель ARIMA для прогнозування.

Побудовані моделі продемонстрували адекватну точність прогнозу, підтверджену аналізом залишків та довірчими інтервалами прогнозу. Отримані результати дозволяють:

- визначити базовий рівень енергоспоживання підприємства;
- проводити обґрунтоване планування заходів з енергоефективності;
- здійснювати контроль відхилень фактичного споживання від прогнозного рівня.

Таким чином, застосування моделей ARIMA є ефективним інструментом для моделювання та прогнозування енергоспоживання промислових підприємств і забезпечує основу для подальших енергоменеджерських рішень.

3.4. Побудова базового рівня енергоспоживання (БРЕ) підприємства за допомогою моделі ARIMA

Для визначення базового рівня енергоспоживання (БРЕ) підприємства буде застосована модель інтегрованого авторегресійного ковзного середнього (ARIMA). Безпосередній розрахунок та побудова моделі здійснюватиметься з використанням програмного забезпечення Statistica.

Процес побудови моделі ARIMA в обраному програмному середовищі (Statistica) включає такі основні етапи:

1. Аналіз стаціонарності часового ряду: необхідно завантажити часовий ряд даних (споживання електроенергії) у Statistica, після чого візуально та за допомогою відповідних статистичних тестів перевірити його на стаціонарність.

2. Диференціювання даних: у разі виявлення нестаціонарності, дані слід стабілізувати шляхом різницевого перетворення (інструмент "Різницеве перетворення даних").

3. Визначення порядків моделі (p, q): На основі аналізу корелограм (автокореляційної функції, ACF, та часткової автокореляційної функції, PACF) встановлюються початкові порядки p (авторегресія) та q (ковзне середнє) моделі ARIMA.

4. Створення моделі: обираємо "Прогнозування - моделювання ARIMA/ARMA" додатково вводяться попередньо оцінені порядки p, d, q (де d — порядок різниці). Сезонні параметри моделі на цьому етапі приймаються рівними нулю.

5. Перевірка адекватності: здійснюється побудова моделі та аналіз її адекватності. Оцінюється середнє квадратичне відхилення (СКВ), а також аналізуються корелограми залишків. За необхідності параметри моделі коригуються.

6. Використання моделі: адекватна модель зберігається і використовується для подальшого прогнозування часового ряду енерго- чи газоспоживання.

На основі цього алгоритму розпочато аналіз часового ряду споживання електроенергії на промисловому підприємстві з виробництва продуктової упаковки. Вхідні дані для цього аналізу були представлені у табл. 3.1. Динаміка часового ряду споживання візуально представлена на рис. 3.7.

Візуальний аналіз вихідного графіка споживання електроенергії (рис. 3.7) свідчить про нестаціонарність часового ряду. Для усунення

нестационарності та стабілізації дисперсії застосовано операцію диференціювання першого порядку (віднімання попереднього фактичного значення від поточного). Новий ряд значень (ряд різниць) перевірено на стаціонарність. Графік перших різниць (рис. 3.8) підтверджує, що ряд став стаціонарним.

Оскільки стаціонарність досягнута після одноразового диференціювання, коефіцієнт інтеграції d у моделі $ARIMA(p, d, q)$ приймаємо рівним 1.



Рисунок 3.7 – Динаміка споживання електроенергії підприємством

Для встановлення порядків авторегресійної моделі p та моделі ковзного середнього q необхідний аналіз автокореляційної функції (ACF) та часткової автокореляційної функції (PACF). Рис. 3.9 відображає графік автокореляції (ACF), у свою чергу рис. 3.10 відображає графік часткової автокореляції (PACF).

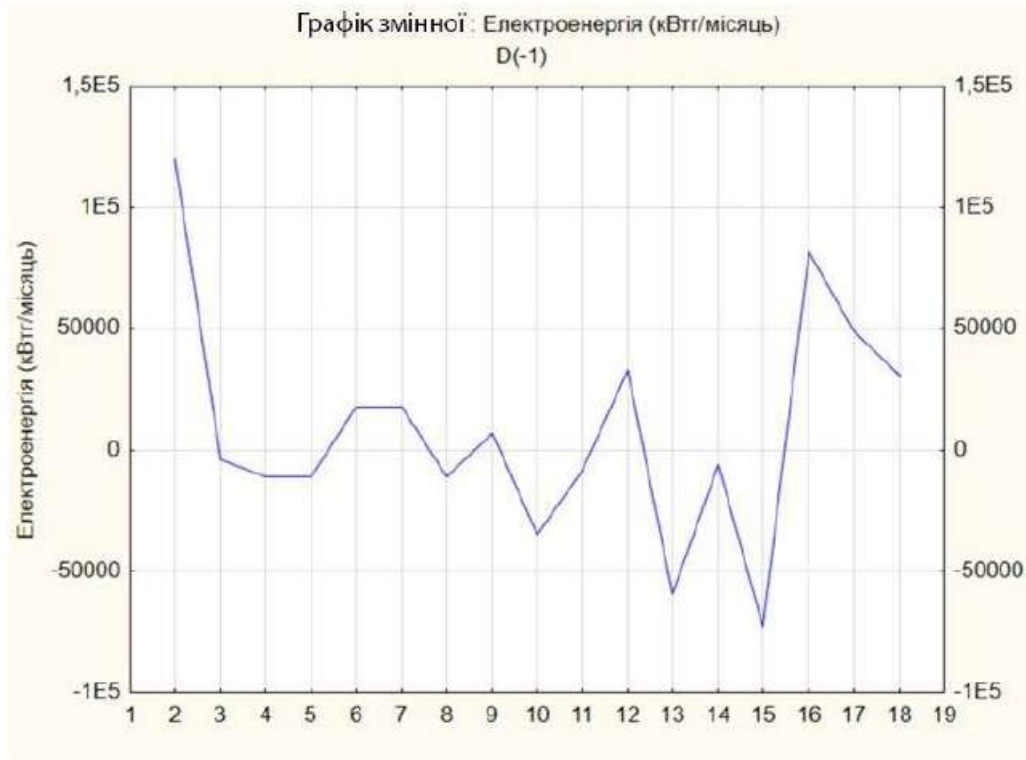


Рисунок 3.8 – Графік перших різниць споживання електроенергії

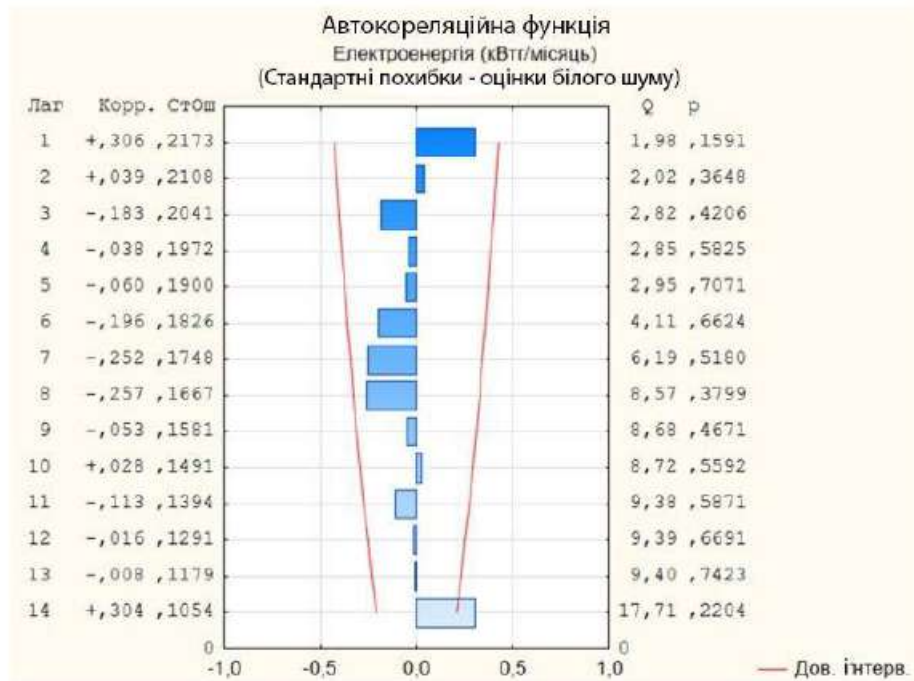


Рисунок 3.9 – Графік автокореляції (ACF) перших різниць

На основі аналізу корелограм встановлено:

- За графіком ACF (рис.3.9) спостерігається одне значуще відхилення, що дозволяє обрати порядок авторегресії $p = 1$.
- За графіком PACF (рис. 3.10) виявлено два значущих відхилення, звідки отримуємо порядок ковзного середнього $q = 2$.

Таким чином, для прогнозування обрано модель ARIMA (1, 1, 2). Сезонні параметри встановлено нульовими, оскільки загальна періодичність у зростанні та спаданні значень через однакові інтервали часу відсутня.

Побудована модель ARIMA (1, 1, 2) представлена на рис. 3.11, що відображає результати розрахунку, виконаного в програмному середовищі.

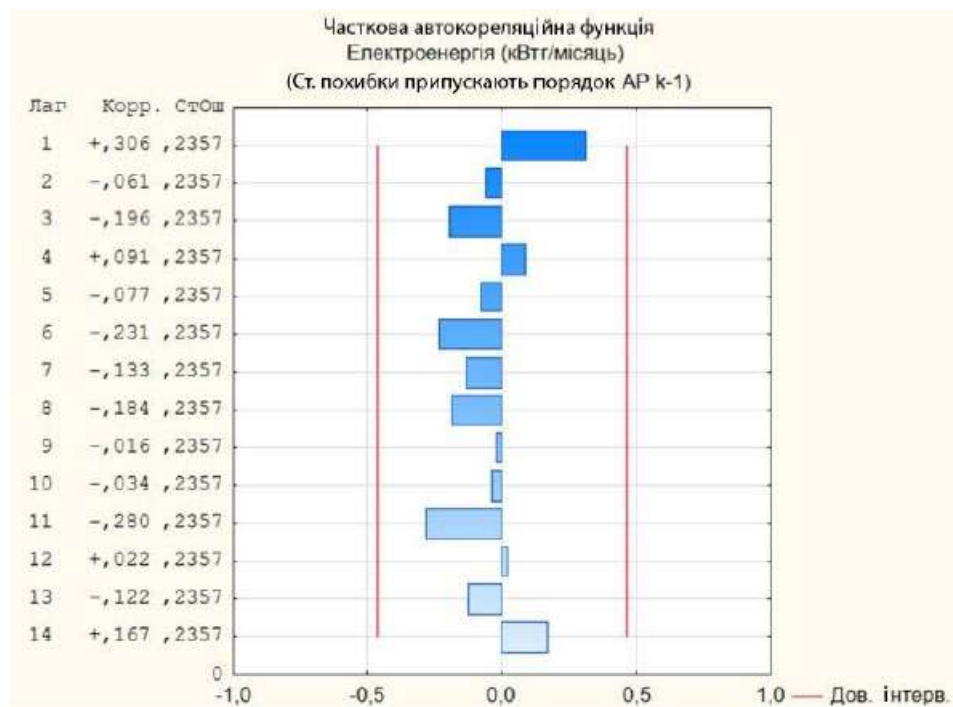


Рисунок 3.10 – Графік часткової автокореляції (PACF) перших різниць

Результат : Електроенергія (кВтг/місяць) (Вихідні дані)						
Перетворення : D(1)						
Модель (1,1,2) MS Залишок = 2492E6						
Параметр	Парам.	Асимпт. Ст.	Асимпт. t(13)	p	Нижня 95% дов.	Верхня 95% дов.
Конст.	8210,577	5210,641	2	0,139101	-3046,33	19467,48
p(1)	0,798	0,206	4	0,001900	0,35	1,24
q(1)	0,853	0,000	1552738	0,000000	0,85	0,85
q(2)	0,147	0,000	1552738	0,000000	0,15	0,15

Рисунок 3.11 – Побудована модель ARIMA (1, 1, 2) для електроенергії

На основі цієї моделі здійснено прогноз споживання електроенергії, візуалізація якого разом із довірчим інтервалом наведена на рисунку 3.12. Чисельні значення прогнозу представлені на рисунку 3.13.

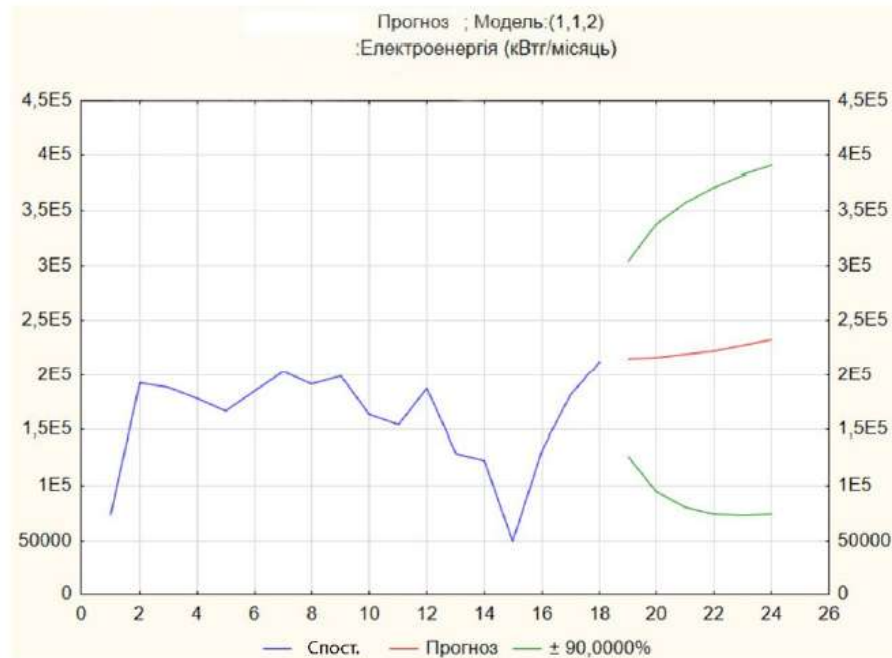


Рисунок 3.12 – Графік прогнозу споживання електроенергії методом ARIMA з довірчим інтервалом

Прогноз ; Модель:(1,1,2) Результат :Електроенергія (кВтг/місяць)				
Набл. N	Прогноз	Нижній 90,0000%	Верхній 90,0000%	Ст. Пох.
19	215408,4	127010,3	303806,5	49916,11
20	216494,4	94864,8	338124,1	68681,10
21	219017,2	80300,9	357733,5	78329,49
22	222687,0	74102,1	371271,8	83901,98
23	227272,4	72726,3	381818,5	87268,17
24	232588,9	74360,4	390817,4	89347,50

Рисунок 3.13 – Чисельні значення прогнозу моделі ARIMA для електроенергії

Аналогічні кроки аналізу (стаціонарність, диференціювання та аналіз корелограм) були виконані для часового ряду споживання газу. Нижче наведено кінцеві результати моделювання та прогнозування газоспоживання.

Модель ARIMA для споживання газу відображена на рис. 3.14.

Результат : Газ (кВтг/місяць) (Вихідні дані)						
Перетворення D(2)						
Модель(2,1,0) MS Залишок = 3271E7						
Параметр	Парам.	Асимпт. Ст.ошиб.	Асимпт. t(14)	p	Нижня 95% дов.	Верхня 95% дов.
p(1)	0.540957	0.232257	2.32913	0.035340	0.04282	1.039097
p(2)	-0.765838	0.285901	-2.67869	0.017992	-1.37903	-0.152642

Рисунок 3.14 – Побудована модель ARIMA для споживання газу

Графік прогнозу споживання газу із зазначенням довірчого інтервалу представлено на рис. 3.15, а чисельні прогнозні значення — на рис. 3.16.

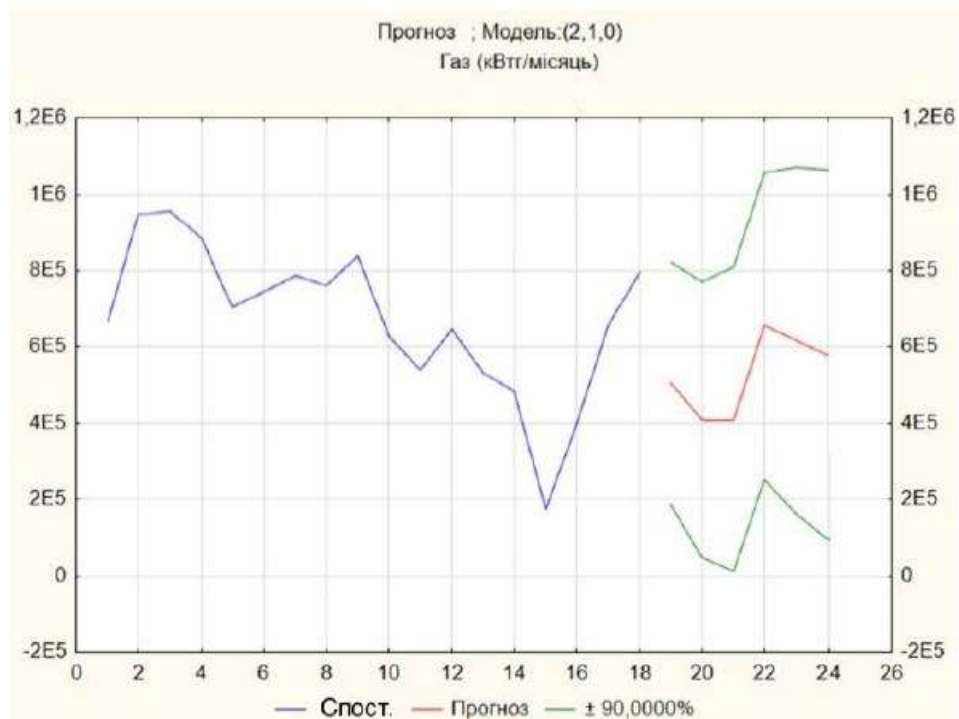


Рисунок 3.15 – Графік прогнозу споживання газу методом ARIMA з довірчим інтервалом

Прогноз ; Модель:(2,1,0) Результат :Газ (кВтг/місяць)				
Набл. N	Прогноз	Нижній 90,0000%	Верхній 90,0000%	Ст. Пох.
19	505087,2	186500,7	823674	180880,4
20	408802,6	46588,7	771017	205650,3
21	409898,2	10691,7	809105	226653,1
22	654605,9	253279,3	1055932	227856,8
23	615766,4	161726,8	1069806	257785,1
24	577726,1	94391,8	1061060	274417,5

Рисунок 3.16 – Чисельні значення прогнозу моделі ARIMA для газу

Висновки до розділу 3

1. Для достовірного прогнозування та встановлення базового рівня енергоспоживання підприємства було послідовно застосовано три ключові методи: регресійний аналізування, просте експоненційне згладжування (ПЕЗ) / Метод Хольта та моделі ARIMA.

2. Метод Простого експоненційного згладжування було оптимізовано шляхом мінімізації середньоквадратичної похибки (MSE) для визначення найкращої константи згладжування (α) як для електроенергії, так і для газу.

3. Зважаючи на обмеженість ПЕЗ (не враховує тренд), застосовано метод Хольта, який за допомогою двох параметрів (α та β) забезпечив адаптивне згладжування рівня та тренду, що є більш гнучким для прогнозування.

4. Для побудови моделі ARIMA проведено аналіз стаціонарності часових рядів та їх диференціювання першого порядку ($d=1$). На основі аналізу корелограм ACF та PACF визначено оптимальні порядки p та q для кожного енергоресурсу.

5. На підставі зіставлення прогнозних значень із фактичними даними та оцінки статистичних критеріїв адекватності (MSE, MAE, тощо) встановлено:

- для електроспоживання найбільш адекватними моделями для формування БРЕ виявилися регресійний аналіз та просте експоненційне згладжування;

- для споживання газу найкращі показники точності продемонстрували метод Хольта та регресійний аналіз.

6. Розроблені моделі та визначені БРЕ для електроенергії та газу можуть бути використані підприємством як еталонна крива для постійного моніторингу, що дозволяє оперативно виявляти відхилення, оцінювати енергоефективність та визначати потенціал енергозбереження.

РОЗДІЛ 4. РОЗРОБЛЕННЯ ЗАХОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ПІДПРИЄМСТВА З ВИРОБНИЦТВА ХАРЧОВОЇ УПАКОВКИ

4.1. Загальна характеристика підприємства та аналіз енергетичного профілю

ТОВ «ПакФуд» — це середнє промислове підприємство, що спеціалізується на виробництві полімерної упаковки для харчової промисловості. Основна продукція підприємства — поліпропіленові контейнери, плівка для пакування харчових продуктів, кришки, стакани та інші вироби з полімерів. Виробничі потужності розміщені у промисловій зоні м. Харкова, а чисельність персоналу становить близько 120 осіб.

Виробничий процес включає такі основні енергоємні етапи:

- екструзія полімерів (плавлення гранул і формування плівки чи листа), що потребує значних обсягів електричної енергії для нагрівання і приводу екструдерів;
- термоформування або лиття під тиском, де використовується як електроенергія, так і природний газ для нагрівання прес-форм;
- друк та ламінування упаковки, що характеризується стабільним споживанням електроенергії;
- вентиляційно-кондиціонерні вентиляційно-кондиціонерні системи, освітлення та компресорне обладнання, які забезпечують допоміжні енергетичні потреб.

Аналізуючи вихідні дані енергоспоживання (табл.3.1), можна зробити такі висновки:

1) Середньомісячне споживання електроенергії становить приблизно 180–190 тис. кВт·год, із піковими значеннями у літні місяці (червень–серпень), що пояснюється підвищеним виробничим навантаженням та роботою систем кондиціонування.

2) Споживання природного газу демонструє виражену сезонність: найвищі показники у січні–березні (900–980 тис. кВт·год), що зумовлено

необхідністю підтримання температурного режиму у виробничих цехах та роботі опалювальних систем.

3) У літній період газ використовується переважно для технологічних цілей (термоформування, нагрівання прес-форм), тому обсяги споживання знижуються до 700–750 тис. кВт·год.

4) Загальне річне енергоспоживання підприємства становить орієнтовно: електроенергія – $\approx 2,2$ млн кВт·год/рік та природний газ – $\approx 8,5$ – $9,0$ млн кВт·год/рік.

Структура енергоспоживання підприємства свідчить, що частка природного газу у загальному енергетичному балансі становить близько 80 %, а електроенергії – 20 %. Це типово для підприємств полімерного профілю, де значна частина енергії витрачається на теплові процеси плавлення та формування матеріалів.

Для подальшого аналізу доцільно розглядати базовий рівень споживання, визначений у розділі 3, як орієнтир енергетичної результативності. Це дозволить оцінити потенціал енергозбереження та виявити напрямки підвищення ефективності використання ресурсів.

4.2. Розроблення заходів підвищення енергоефективності підприємства

На основі аналізу фактичного та базового рівнів енергоспоживання ТОВ «ПакФуд» встановлено, що підприємство демонструє стабільну тенденцію у споживанні енергоресурсів, проте має резерви підвищення енергоефективності на рівні 8–24 % у середньостроковій перспективі. Для досягнення цього рівня доцільно реалізувати комплекс технічних, технологічних та організаційних заходів, спрямованих на зменшення енерговитрат, оптимізацію теплових процесів і раціональне управління енергоспоживанням.

1) Встановлення частотних перетворювачів (VFD) на електродвигуни

Встановлюємо VFD на 5 основних двигунів, сумарна номінальна

потужність $P_{mot} = 250$ кВт

Очікуване середнє скорочення споживання для цих двигунів $s_{vfd} = 10\%$.

Розрахунок виконуємо за методикою:

- річна економія енергії:

$$\Delta E_{vfd} = P_{mot} \cdot s_{vfd} \cdot H \quad (4.1)$$

- грошова економія:

$$\Delta C_{vfd} = \Delta E_{vfd} \cdot c_{el} \quad (4.2)$$

- простий термін окупності:

$$T_{payback} = \frac{I_{vfd}}{\Delta C_{vfd}} \quad (4.3)$$

Отримуємо:

$$\Delta E_{vfd} = 250 \text{ кВт} \cdot 0,10 \cdot 4,000 \text{ год} = 100,000 \text{ кВт}\cdot\text{год/рік.}$$

$$\Delta C_{vfd} = 100,000 \cdot 5,0 = 500,000 \text{ грн/рік.}$$

Інвестиція I_{vfd} (обладнання + монтаж) — $\approx 350\,000$ грн

$$T_{payback} = 350,000 / 500,000 = 0,70 \text{ роки} \approx 0,7 \text{ року} (\approx 8\text{--}9 \text{ міс.}).$$

Примітка: якщо ефект буде 15% — економія 150 000 кВт·год і окупність ще швидша.

2) Оптимізація системи стисненого повітря (компресорна)

Потужність компресорної установки $P_{comp} = 150$ кВт

Очікуване зниження за рахунок усунення витоків, модернізації управління і регулювання $s_{comp}=9\%$.

Розрахунок виконуємо за методикою:

$$\Delta E_{comp} = P_{comp} \cdot H \cdot s_{comp} \quad (4.4)$$

$$\Delta C_{comp} = \Delta E_{comp} \cdot c_{el} \quad (4.5)$$

$$T_{payback} = \frac{I_{comp}}{\Delta C_{comp}} \quad (4.6)$$

Отримуємо:

$$\Delta E_{comp} = 150 \cdot 4,000 \cdot 0,09 = 54,000 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{рік}$$

$$\Delta C_{comp} = 54,000 \cdot 5,0 = 270,000 \text{ грн}/\text{рік}.$$

Інвестиція I_{comp} (детектор витоків, контроль, часткова модернізація) — $\approx 200\,000$ грн.

$$T_{payback} = 200,000/270,000 \approx 0,74 \text{ роки} \approx 9 \text{ місяців}.$$

Примітка: додатково можливе зниження витрат на техобслуговування й підвищення надійності.

3) Перехід на LED-освітлення

Нинішня сумарна потужність освітлення $P_{light} = 50$ кВт

Зменшення споживання при переході на LED $s_{led}=55\%$

Розрахунок виконуємо за методикою:

$$\Delta E_{led} = P_{light} \cdot H \cdot s_{led} \quad (4.7)$$

$$\Delta C_{led} = \Delta E_{led} \cdot c_{el} \quad (4.8)$$

$$T_{payback} = \frac{I_{led}}{\Delta C_{led}} \quad (4.9)$$

Отримуємо:

$$\Delta E_{led} = 50 \cdot 4,000 \cdot 0,55 = 110,000 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{рік}$$

$$\Delta C_{led} = 110,000 \cdot 5,0 = 550,000 \text{ грн}/\text{рік}.$$

Інвестиція (світильники, датчики, монтаж) $\approx 150\,000$ грн.

$$T_{payback} = 150,000/550,000 \approx 0,27 \text{ роки} \approx 3,3 \text{ місяці}.$$

Примітка: LED часто мають довший строк служби — додаткова економія на заміні.

4) Рекуперація теплоти від відпрацьованого повітря

Орієнтовна річна економія газу за попередніми оцінками — $\Delta E_{heat}=600,000$ кВтгод/рік (5–7% базового газу).

Коефіцієнт корисної дії рекуператора та технологічні обмеження вже враховані у цій оцінці.

Розрахунок виконуємо за методикою:

$$\Delta C_{heat} = \Delta E_{heat} \cdot c_{gas} \quad (4.10)$$

$$T_{payback} = \frac{I_{heat}}{\Delta C_{heat}} \quad (4.11)$$

Отримуємо:

$$\Delta C_{heat} = 600,000 \cdot 1,15 = 690,000 \text{ грн/рік.}$$

Інвестиція (пластинчастий/роторний теплообмінник, насосне обладнання, монтаж) $\approx 1500\ 000$ грн.

$$T_{payback} = 1,500,000 / 690,000 \approx 2,17 \text{ роки} \approx 2,2 \text{ роки.}$$

Примітка: у довгостроковій перспективі також зменшуються витрати на опалення приміщень і навантаження на котельні.

5) Впровадження енергоменеджменту за ISO 50001 (система моніторингу + оптимізація)

За рахунок організаційних заходів, моніторингу, КРІ та навчання персоналу очікується економія $s_{en}=2,5\%$ від загального енергоспоживання (електрика + газ).

Розрахунок виконуємо за методикою:

$$E_{tot} = E_{el,base} + E_{gas,base} \quad (4.12)$$

$$\Delta E_{en} = E_{tot} \cdot s_{en} \quad (4.13)$$

При розподілі економії між електрикою і газом використовуємо їх частки у балансі:

$$\Delta E_{el,en} = \Delta E_{en} \cdot \frac{E_{el,base}}{E_{tot}}, \quad \Delta E_{gas,en} = \Delta E_{en} \cdot \frac{E_{gas,base}}{E_{tot}} \quad (4.14)$$

$$\Delta C_{en} = \Delta E_{el,en} \cdot c_{el} + \Delta E_{gas,en} \cdot c_{gas} \quad (4.15)$$

Отримуємо:

$$E_{tot} = 2,200,000 + 8,700,000 = 10,900,000 \text{ кВт год}$$

$$\Delta E_{en} = 10,900,000 \cdot 0,025 = 272,500 \text{ кВт год/рік}$$

Частки: електрика $\approx 20,18\%$, газ $\approx 79,82\%$.

$$\Delta E_{el,en} \approx 54,963 \text{ кВт год}$$

$$\Delta E_{gas,en} \approx 217,537 \text{ кВт год}$$

$$\Delta C_{en} = 54,963 \cdot 5,0 + 217,537 \cdot 1,15 \approx 274,815 + 250,310 = 525,125 \text{ грн/рік.}$$

Інвестиція (впровадження системи, датчики, ПЗ, сертифікація, навчання) $\approx 300\,000$ грн.

$$T_{payback} = 300,000 / 525,125 \approx 0,57 \text{ року} \approx 7 \text{ місяців.}$$

Примітка: ISO 50001 дає системний, постійний результат та підвищує ймовірність реалізації техзаходів.

б) Утеплення огорожувальних конструкцій (стіни, ворота, вікна)

Очікуване зниження втрат тепла $s_{ins}=9\%$ від річного споживання газу (консервативна середина 8–10%).

Розрахунок виконуємо за методикою:

$$\Delta E_{ins} = E_{gas,base} \cdot s_{ins} \tag{4.16}$$

$$\Delta C_{ins} = \Delta E_{ins} \cdot c_{gas} \tag{4.17}$$

$$T_{payback} = \frac{I_{ins}}{\Delta C_{ins}} \tag{4.18}$$

Отримуємо:

$$\Delta E_{ins} = 8,700,000 \cdot 0,09 = 783,000 \text{ кВт} \cdot \text{год/рік}$$

$$\Delta C_{ins} = 783,000 \cdot 1,15 = 900,450 \text{ грн/рік.}$$

Інвестиція (утеплення стін, воріт, герметизація) $\approx 1\,200\,000$ грн.

$$T_{payback} = 1,200,000 / 900,450 \approx 1,33 \text{ роки} \approx 1,3 \text{ роки.}$$

Результати розрахунків узагальнюємо і подаємо у вигляді табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Зведена таблиця результатів

№	Заходи	Річна економія енергії (кВт·год)	Річна економія (грн)	Інвестиції (грн)	Простий строк окупності (роки)
1	VFD (5 двигунів, 250 кВт)	100 000 (електрика)	500 000	350 000	0,70
2	Оптимізація компресорної	54 000 (електрика)	270 000	200 000	0,74
3	LED-освітлення	110 000 (електрика)	550 000	150 000	0,27
4	Рекуперація тепла	600 000 (газ)	690 000	1 500 000	2,17
5	Енергоменеджмент (ISO 50001)	272 500 (електр. + газ)	525 125	300 000	0,57
6	Утеплення приміщень	783 000 (газ)	900 450	1 200 000	1,33
Разом	—	≈ 1 919 500 кВт·год/рік	≈ 3 435 575 грн/рік	≈ 3 700 000 грн	—

Висновки до розділу 4

У четвертому розділі кваліфікаційної роботи було розроблено та обґрунтовано комплекс шести енергоефективних заходів для підприємства з виробництва харчової упаковки ТОВ «Екопак Груп». Розрахунки виконано на основі аналізу базового рівня енергоспоживання електроенергії та природного газу за 2023–2024 роки, що склало в середньому близько 2,0 млн кВт·год електроенергії та 8,5–9,0 млн кВт·год природного газу на рік.

Визначено, що на підприємстві існує значний потенціал енергозбереження як у технологічних процесах, так і в допоміжних системах (компресорна станція, вентиляція, освітлення, теплоутримання будівель). Для підвищення енергетичної результативності запропоновано комплекс заходів:

1. Встановлення частотних перетворювачів (VFD) на п'ять двигунів потужністю 250 кВт

Впровадження системи частотного регулювання дозволяє зменшити споживання електроенергії при змінних навантаженнях. Річна економія становить 100 000 кВт·год, що відповідає 500 000 грн. Обсяг інвестицій — 350 000 грн, простий строк окупності — 0,70 року.

2. Оптимізація роботи компресорного обладнання

Заміна старих компресорів і впровадження системи автоматичного регулювання тиску дає змогу підвищити ККД установки. Річна економія — 54 000 кВт·год електроенергії, що забезпечує 270 000 грн економії. Інвестиції — 200 000 грн, строк окупності — 0,74 року.

3. Модернізація системи освітлення (перехід на LED-технології)

Заміна застарілих люмінесцентних світильників на LED-лампи з автоматичним керуванням дозволяє скоротити споживання електроенергії на 110 000 кВт·год/рік або 550 000 грн/рік. Інвестиції — 150 000 грн, окупність — 0,27 року.

4. Встановлення системи рекуперації теплоти

Здійснюється використання теплоти відпрацьованих газів для підігріву повітря, що надходить у виробничі приміщення або технологічні зони. Річна економія природного газу становить 600 000 кВт·год, що еквівалентно 690 000 грн/рік. Інвестиції — 1 500 000 грн, строк окупності — 2,17 року.

5. Впровадження системи енергоменеджменту (ISO 50001)

Сертифікація та організація системи управління енергетичними ресурсами дозволяє досягти скорочення енергоспоживання на 2–3 % за рахунок підвищення контролю та управління процесами. Сумарна економія енергії (електричної та теплової) — 272 500 кВт·год/рік, або 525 125 грн/рік. Інвестиції — 300 000 грн, окупність — 0,57 року.

6. Утеплення виробничих приміщень і теплотрас

Передбачає теплоізоляцію зовнішніх стін, віконних прорізів та внутрішніх теплопроводів, що зменшує втрати теплової енергії. Річна економія становить 783 000 кВт·год/рік, або 900 450 грн/рік. Інвестиції — 1 200 000 грн, строк окупності — 1,33 року.

ВИСНОВКИ

У випускній кваліфікаційній роботі досліджено теоретичні, методичні та прикладні аспекти оцінки та підвищення енергоефективності промислового об'єкта з врахуванням базових показників енергоспоживання. За результатами виконаного дослідження сформульовано такі ключові висновки:

1. Обґрунтовано стратегічну роль енергоефективності: встановлено, що в умовах зростаючого дефіциту енергоресурсів та посилення екологічних вимог, системне впровадження енергоощадних заходів є критичним фактором забезпечення конкурентоспроможності та фінансової стійкості сучасних промислових підприємств.

2. Систематизовано методи оцінювання: проаналізовано та класифіковано методи оцінювання енергоефективності промислових об'єктів. Визначено, що найбільш об'єктивним та верифікованим підходом є той, що базується на встановленні нормалізованих показників енергоспоживання.

3. Підтверджено доцільність застосування БПЕ: обґрунтовано використання базових показників енергоспоживання як ключового інструменту бенчмаркінгу та основи для функціонування системи енергоменеджменту (СЕНМ) згідно зі стандартом ISO 50001/ISO 50006. Встановлення БПЕ дозволяє коректно відокремити вплив виробничих змінних від результатів енергозберігаючих ініціатив.

4. Досліджено прогностичні моделі: проаналізовано ефективність статистичних, інженерних та гібридних методів прогнозування енергоспоживання, необхідних для науково обґрунтованого встановлення базових рівнів та точної оцінки фактичного енергетичного ефекту від реалізованих заходів.

5. Проведена практична апробація: на прикладі промислового об'єкта з виробництва упаковки для харчових продуктів виконано розрахунок та

верифікацію базових рівнів енергоспоживання. Визначено, що вибір адекватної математичної моделі є вирішальним для точності оцінки.

6. Розроблено удосконалену методику: запропоновано удосконалену методику визначення БПЕ на основі багатофакторного регресійного аналізу. Новизна методики полягає у систематизованому порівняльному аналізі прогностичної адекватності різних моделей за статистичними критеріями (R^2 , MAE, RMSE), що забезпечує підвищену точність та надійність встановлення базового рівня.

7. Сформульовано рекомендації: результати дослідження є науково-методичною базою для підвищення ефективності СЕНМ та можуть бути використані промисловими підприємствами для об'єктивного моніторингу, контролю та планування заходів з енергоефективності.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Іщенко, С. В. Методичні підходи до оцінки ефективності управління енергозабезпеченням підприємства / С. В. Іщенко, М. В. Малиш // Ефективна економіка.– 2016. – № 2. – Режим доступу: <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=4786>
2. Воробей, А. О. Показники енергетичної ефективності підприємства / А. О. Воробей // *Вінницький національний технічний університет*. – Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-feeem/all-feeem-2017/paper/download/1929/1876>
3. Манжак, Н. О., Шулле, Ю. А. Основні показники енергоефективності підприємства / Н. О. Манжак, Ю. А. Шулле // *Вінницький національний технічний університет*. Режим доступу: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/26899/6740.pdf?sequence=3&isAllowed=y>
4. Базюк, Т. М. Оптимізація інформаційних потоків при визначенні показників енергоефективності на підприємстві / Т. М. Базюк, О. М. Огієвич // *Енергетика: економіка, технології, екологія*. – 2014. – № 2. – С. 129–136
Режим доступу: <https://ela.kpi.ua/bitstreams/269f27fa-9c74-4357-83ec-6b0d822fa8f1/download>
5. Directive 2012/27/EU of the European Parliament and of the Council of 25 October 2012 on energy efficiency. Official Journal of the European Union. 2012. L 315/1. <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2012/27/oj/eng>
6. ISO 50001:2018 Energy management systems – Requirements with guidance for use. International Organization for Standardization, 2018.
7. ДСТУ ISO 50001:2020 Системи енергетичного менеджменту. Вимоги та настанова щодо використання. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2020.
8. Основи ефективного використання електричної енергії в системах електроспоживання промислових підприємств : навч. посіб. / [Соловей О. І., Розен В. П., Плешков П.Г. та ін.] ; М-во освіти і науки України, Кіров. нац. техн. ун-т. – Черкаси: видавець Чабаненко Ю., 2015. – 316 с.

9. Енергетичний менеджмент : підручник / А. В. Праховник та ін. ; за ред.: А. В. Праховника, О. М. Ращенко. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. 420 с.
10. Бояринова К.О. Енергоменеджмент у промисловості: сучасні реалії та перспективи розвитку в Україні // Економіка та управління підприємствами. 2018. № 24.
11. ДСТУ ISO 50001:2014 Системи енергетичного менеджменту. Вимірювання рівня досягнутої енергоефективності з використанням базових рівнів енергоспоживання та показників енергоефективності.
12. ДСТУ ISO 50002:2016 Енергетичні аудити. Вимоги та настанови щодо їх проведення (ISO 50002:2014, IDT).
13. Офіційний сайт Держенергоефективності України [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://saee.gov.ua> (дата звернення: 06.11.2025).
14. Стогній Б. С., Кириленко О. В., Праховник А. В. Інтелектуальні системи керування електроспоживанням: монографія. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. 324 с.
15. Кваліфікаційна робота магістра: метод. рекомендації до змісту, структури та оформлення кваліфікаційної роб. : для студ. спец. 141 - Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / [уклад. П. Г. Плешков, К. Г. Петрова, Н. Ю. Гарасьова та ін.]; М-во освіти і науки України, Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. - Кропивницький: ЦНТУ, 2023. - 74 с. Режим доступу: <https://dspace.kntu.kr.ua/handle/123456789/13066>.

ДОДАТКИ

Додаток А. Охорона праці

А.1. Загальні положення охорони праці

Охорона праці є складовою частиною виробничої діяльності підприємства і спрямована на створення безпечних і здорових умов праці, попередження виробничого травматизму та професійних захворювань. Основні положення з охорони праці регламентуються Конституцією України, Законом України «Про охорону праці», Кодексом законів про працю, Законом України «Про пожежну безпеку», «Про забезпечення санітарного та епідемічного благополуччя населення», а також галузевими нормами та правилами.

На підприємстві з виробництва харчової упаковки охорона праці організовується відповідно до вимог системи управління охороною праці (СУОП), що передбачає проведення інструктажів, навчання, атестації робочих місць за умовами праці, розроблення інструкцій з безпечного виконання робіт та здійснення контролю за дотриманням працівниками вимог безпеки.

А.2. Аналіз шкідливих і небезпечних виробничих факторів

У процесі виробництва харчової упаковки працівники можуть зазнавати дії таких небезпечних і шкідливих факторів:

- підвищена температура повітря і поверхонь обладнання (екструдери, нагрівальні елементи);
- підвищений рівень шуму (від компресорів, вентиляторів, двигунів);
- висока напруга електричного струму (електрообладнання, пускові пристрої, частотні перетворювачі);
- наявність рухомих частин машин і механізмів (вальці, транспортери, ножові блоки);
- пил та випари полімерних матеріалів;
- психофізіологічне навантаження при тривалій зміні режимів роботи устаткування.

Для мінімізації дії зазначених факторів передбачено систему заходів:

технічні, санітарно-гігієнічні, організаційні та індивідуальні засоби захисту.

№	Небезпечний фактор	Джерело виникнення	Можливі наслідки	Заходи захисту
1	Шум і вібрація	Компресори, двигуни, лінії різання	Погіршення слуху, стомлюваність	Шумоізоляція, технічне обслуговування, ЗІЗ органів слуху
2	Підвищена температура	Зона екструзії	Перегрів, тепловий удар	Вентиляція, теплові екрани, питний режим
3	Пари розчинників	Лакофарбові ділянки	Отруєння, подразнення слизових	Місцева витяжна вентиляція, респіратори
4	Електричний струм	Електрообладнання, двигуни	Електротравми	Заземлення, перевірка ізоляції, інструктаж
5	Рухомі частини механізмів	Валки, ножі, приводи	Травми рук	Огородження, блокування, попереджувальні знаки
6	Статична електрика	Переробка полімерів	Іскріння, займання	Антистатичні пристрої, заземлення, контроль вологості

А.3. Заходи забезпечення безпеки праці

До технічних заходів належать:

- використання обладнання з автоматизованою системою керування та аварійного відключення;
- огороження рухомих частин машин;
- встановлення шумопоглинальних кожухів та віброізолюючих основ;
- заземлення всього електрообладнання, дотримання вимог ПУЕ та ПТЕЕС;
- облаштування аварійного освітлення та вентиляційних систем.

Організаційні заходи включають проведення вступного, первинного, повторного, позапланового інструктажів з охорони праці; медичні огляди

працівників; контроль за дотриманням санітарних норм та вимог техніки безпеки на робочих місцях.

Індивідуальні засоби захисту (ІЗЗ): працівники забезпечуються спецодягом, взуттям, рукавицями, засобами захисту органів слуху (беруші), очей (захисні окуляри), а також респіраторами при роботі з полімерною сировиною.

А.4. Вимоги до мікроклімату, освітлення та шуму

Виробничі приміщення мають відповідати вимогам ДСН 3.3.6.042-99 «Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень». Для робіт середньої важкості оптимальні параметри мікроклімату становлять: температура повітря 18–22 °С, відносна вологість 40–60 %, швидкість руху повітря не більше 0,3 м/с.

У виробничих приміщеннях забезпечено комбіновану вентиляцію (загальнообмінну та місцеву). Розрахунок повітрообміну проводиться відповідно до ДБН В.2.5-67:2013 «Опалення, вентиляція та кондиціонування». Мікроклімат підтримується у межах нормативних значень температури 18–26 °С і відносної вологості 40–60 %.

Освітлення робочих місць виконується комбінованим способом (природне та штучне). Рівень освітленості відповідно до ДБН В.2.5-28:2018 має бути не менше 300 лк. Для забезпечення нормативних параметрів використовуються світлодіодні світильники з нейтральною температурою світла (4000–4500 К).

Рівень шуму в робочій зоні не повинен перевищувати 80 дБ, відповідно до ДСН 3.3.6.037-99. Для його зменшення застосовують звукоізоляційні кожухи, шумопоглинальні матеріали, а також періодичні перерви в роботі згідно з графіком.

А.5. Пожежна безпека

Вимоги пожежної безпеки регламентуються Законом України «Про

пожежну безпеку» та правилами НАПБ А.01.001-2014. На підприємстві розроблено інструкції з дій у разі пожежі, проведено навчання персоналу, визначено місця розміщення первинних засобів пожежогашіння (вогнегасники порошкові та вуглекислотні, пожежні крани).

Приміщення обладнані пожежною сигналізацією, системою оповіщення, евакуаційними виходами, що мають світлові покажчики «Вихід». Заборонено зберігання легкозаймистих матеріалів у виробничих зонах без спеціально обладнаних складів.

А.6. Електробезпека

Електробезпека забезпечується шляхом застосування захисного заземлення, занулення, автоматичного вимкнення живлення у разі короткого замикання, використання індивідуальних засобів захисту (діелектричні рукавиці, калоші, килимки). Обладнання підлягає періодичним випробуванням згідно з вимогами ПБЕЕС та ПТЕЕС.

Персонал, який працює з електроустановками, повинен мати відповідну групу з електробезпеки не нижче II, проходити щорічну перевірку знань та навчання безпечним методам роботи.

Висновки

На підприємстві з виробництва упаковки харчової продукції створено необхідні умови для безпечної праці працівників. Дотримання вимог чинного законодавства, використання сучасних засобів колективного та індивідуального захисту, проведення систематичних інструктажів та контролю сприяють зниженню рівня виробничих ризиків, підвищенню продуктивності праці та забезпеченню стабільної роботи виробництва. Запропоновані заходи дозволяють підтримувати нормативні умови праці, зменшити вплив шкідливих факторів та гарантувати безпечне функціонування підприємства.