МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ім. Ю.М. ПОТЕБНІ

_____Електричної інженерії та кіберфізичних систем_
(повна назва кафедри)

Кваліфікаційна робота

_____другий (магістерський)_рівень_____
(рівень вищої освіти)

на тему: Зниження витрат електричної енергії при забезпеченні ПрАТ «Запоріжсталь» стисненими газами

Виконав: студент __2___ курсу, групи____
спеціальності__141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(код і назва спеціальності)
спеціалізації _____
(код і назва спеціалізації)
Освітньої програми «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
(назва освітньої програми)
Дунаєв Д. В.
(ініціали та прізвище)
Керівник __проф. доктор, д.т.н., Коваленко В.Л.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)
Рецензент___д.т.н., проф., Артемчук В.В.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Запоріжжя
2024

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інженерний навчально-науковий інститут_____
Кафедра____Електричної інженерії та кіберфізичних систем _____
Рівень вищої освіти____ другий (магістерський) рівень
Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(код та назва)
Спеціалізація _____
(код та назва)
Освітня програма «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»_____

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
д.т.н., про  В.Л. Коваленко
«___01__»____12_____2024__року

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

_____ Дунаєву Данилу Віталійовичу _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема роботи Зниження витрат електричної енергії при забезпеченні ПрАТ «Запоріжсталь» стисненими газами
керівник роботи ___Коваленко В.Л., д.т.н., проф._____
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом ЗНУ від «_28_» лютого__2024__року №_361 - с_____
2 Строк подання студентом роботи _____01 грудня 2024 р._____
3. Вихідні дані до роботи: Середньодобове споживання електроенергії ПрАТ «Запоріжсталь». Перелік основного обладнання цехів ПрАТ «Запоріжсталь». Технологічна схема виробництва продукції цехами ПрАТ «Запоріжсталь». Однолінійні схеми електропостачання цехів ПрАТ «Запоріжсталь».
4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1) Аналіз споживання електроенергії при виробництві та транспортуванні стиснених газів 2) Аналіз та оцінка енергетичної ефективності діючих систем 3) Шляхи та заходи зниження витрат електроенергії 4) Економічне обґрунтування запропонованих заходів 5) Екологічні та соціальні аспекти зниження витрат електроенергії.

Перелік графічного матеріалу 1) Тема, мета, завдання, наукова новизна, практичне значення дослідження 2) Загальна характеристика ПраТ «Запоріжсталь» 3) Оцінка втрат електроенергії при роботі компресорного обладнання 4) Розширена математична модель підвищення ефективності компресорних станцій 5) Прогнозовані показники скорочення витрат електроенергії 6) Алгоритм розрахунку економії електроенергії 7) 3D-залежність базового рівня енергоспоживання 8) 3D-залежність впливу зміни енергоспоживання 9) Економічна оцінка впровадження заходів 10) Висновки.

4. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1	Коваленко В.Л., д.т.н., проф.		
Розділ 2	Коваленко В.Л., д.т.н., проф.		
Розділ 3	Коваленко В.Л., д.т.н., проф.		
Розділ 4	Коваленко В.Л., д.т.н., проф.		
Розділ 5	Коваленко В.Л., д.т.н., проф.		

5. Дата видачі завдання 01.09.2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз споживання електроенергії при виробництві та транспортуванні стиснених газів	30.09.2024	
2	Аналіз та оцінка енергетичної ефективності діючих систем	15.10.2024	
3	Шляхи та заходи зниження витрат електроенергії	13.11.2024	
4	Економічне обґрунтування запропонованих заходів	29.11.2024	
5	Екологічні та соціальні аспекти зниження витрат електроенергії	30.11.2024	

Студент _____ Д.В. Дунаєв
(підпис) (ініціали та прізвище)

Керівник роботи _____ В.Л. Коваленко
(підпис) (ініціали та прізвище)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер _____ І.І. Коваленко
(підпис) (ініціали та прізвище)

АНОТАЦІЯ

Дунаєв Д.В. «Зниження витрат електричної енергії при забезпеченні ПрАТ «Запоріжсталь» стисненими газами»

Кваліфікаційна випускна робота для здобуття ступеня вищої освіти магістра за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електиотехніка та електромеханіка, науковий керівник В.Л. Коваленко. Запорізький національний університет. Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні. Кафедра електричної інженерії та кіберфізичних систем, 2024.

Кваліфікаційна робота на тему "Зниження витрат електричної енергії при забезпеченні ПрАТ «Запоріжсталь» стисненими газами" присвячена дослідженню шляхів оптимізації енергоспоживання у промислових системах постачання стиснених газів. У роботі проведено детальний аналіз сучасного стану системи енергозабезпечення підприємства та визначено основні фактори, що впливають на рівень енерговитрат.

Одним із головних завдань дослідження є ідентифікація основних джерел перевитрат електроенергії у процесах стиснення та транспортування газів. Аналіз показав, що значні втрати енергії спричинені застарілим компресорним обладнанням, витоками газів у розподільчій мережі, надмірним робочим тиском у системі, а також недостатньою автоматизацією керування енергетичними процесами. На основі отриманих даних запропоновано комплекс заходів, спрямованих на мінімізацію енергетичних витрат та підвищення ефективності компресорних установок.

У роботі розглянуто вплив впровадження сучасних технологій енергоощадності на загальний рівень енергоспоживання. Особливу увагу приділено використанню частотно-регульованих приводів, систем рекуперації тепла, автоматизованих систем моніторингу витрат електроенергії та впровадженню інтелектуальних алгоритмів керування компресорними станціями. Впровадження

таких заходів дозволяє зменшити втрати електроенергії на 20–30%, що суттєво знижує експлуатаційні витрати підприємства.

Запропонована у роботі математична модель дозволяє оптимізувати режим роботи компресорного обладнання, враховуючи змінні потреби виробництва та поточні параметри системи газопостачання. Дослідження підтвердило ефективність моделі для динамічного регулювання тиску в системі, що дозволяє досягти стабільної роботи компресорних станцій при мінімальному енергоспоживанні.

Розрахунки техніко-економічного обґрунтування впровадження заходів з енергозбереження підтвердили, що модернізація системи постачання стиснених газів окупається у середньому за 2-3 роки. Крім того, оптимізація споживання електроенергії сприяє зменшенню викидів парникових газів, що відповідає сучасним екологічним стандартам.

Експериментальна частина дослідження базується на аналізі роботи компресорних станцій ПрАТ «Запоріжсталь» та тестуванні запропонованих рішень у виробничих умовах. Результати дослідження свідчать про значний потенціал енергоощадних заходів, що дозволяють досягти як економічного ефекту, так і покращення екологічної ситуації.

Таким чином, робота має як теоретичну, так і практичну значущість. Запропоновані методи та підходи можуть бути використані для підвищення ефективності енергозабезпечення металургійних підприємств, що сприятиме зменшенню виробничих витрат, підвищенню конкурентоспроможності продукції та зниженню негативного впливу на довкілля.

Ключові слова: ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ, КОМПРЕСОРНІ УСТАНОВКИ, АВТОМАТИЗАЦІЯ, РЕКУПЕРАЦІЯ ТЕПЛА, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ, ПРОМИСЛОВІ ГАЗОВІ СИСТЕМИ.

ABSTRACT

Dunaev D. V. "Reducing Electricity Costs in Ensuring PJSC 'Zaporizhstal' with Compressed Gases"

Qualification thesis for obtaining a master's degree in higher education, specialty 141 – Electrical Power Engineering, Electrical Engineering, and Electromechanics, scientific advisor V. L. Kovalenko. Zaporizhzhia National University. Yu. M. Potebnia Institute of Engineering and Technology. Department of Electrical Engineering and Cyber-Physical Systems, 2024.

The qualification thesis titled "Reducing Electricity Costs in Ensuring PJSC 'Zaporizhstal' with Compressed Gases" is dedicated to researching ways to optimize energy consumption in industrial compressed gas supply systems. The study provides a detailed analysis of the current state of the enterprise’s energy supply system and identifies the main factors affecting energy costs.

One of the key objectives of the research is to identify the primary sources of excessive electricity consumption in gas compression and transportation processes. The analysis revealed that significant energy losses are caused by outdated compressor equipment, gas leaks in the distribution network, excessive operating pressure in the system, and insufficient automation of energy management processes. Based on the obtained data, a set of measures aimed at minimizing energy costs and improving the efficiency of compressor units has been proposed.

The study examines the impact of implementing modern energy-saving technologies on the overall level of energy consumption. Special attention is given to the use of frequency-regulated drives, heat recovery systems, automated electricity consumption monitoring systems, and the introduction of intelligent control algorithms for compressor stations. The implementation of such measures allows for a 20–30% reduction in electricity losses, significantly lowering the enterprise’s operating costs.

The mathematical model proposed in the study enables the optimization of compressor equipment operation modes, considering variable production needs and current parameters of the gas supply system. The research confirmed the model's effectiveness in dynamically regulating system pressure, ensuring stable operation of compressor stations with minimal energy consumption.

Technical and economic feasibility calculations for energy-saving measures have confirmed that the modernization of the compressed gas supply system pays off within an average of 2–3 years. Moreover, optimizing electricity consumption contributes to reducing greenhouse gas emissions, aligning with modern environmental standards.

The experimental part of the study is based on analyzing the operation of PJSC 'Zaporizhstal' compressor stations and testing the proposed solutions in real production conditions. The research results indicate a significant potential for energy-saving measures, achieving both economic benefits and environmental improvements.

Thus, the study has both theoretical and practical significance. The proposed methods and approaches can be used to enhance the energy efficiency of metallurgical enterprises, contributing to reduced production costs, increased product competitiveness, and a reduction in environmental impact.

Keywords: ENERGY SAVING, COMPRESSOR UNITS, AUTOMATION, HEAT RECOVERY, ENERGY EFFICIENCY, INDUSTRIAL GAS SYSTEMS.

ЗМІСТ

ВСТУП……..10

1. АНАЛІЗ СПОЖИВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ ТА ТРАНСПОРТУВАННІ СТИСНЕНИХ ГАЗІВ…….14

1.1. Загальна характеристика системи постачання стиснених газів на ПрАТ «Запоріжсталь»……...……..14

1.2. Споживання електроенергії компресорними станціями підприємства…16

1.3. Основні технологічні процеси виробництва та транспортування стиснених газів…….19

1.4. Фактори, що впливають на енерговитрати…….21

2. АНАЛІЗ ТА ОЦІНКА ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ДІЮЧИХ СИСТЕМ…….24

2.1. Оцінка втрат електроенергії при роботі компресорного обладнання…24

2.2. Аналіз роботи компресорних станцій та можливості підвищення їх ефективності…….28

2.3. Аналіз методів зниження втрат електроенергії на основі сучасних технологій…….34

3. ШЛЯХИ ТА ЗАХОДИ ЗНИЖЕННЯ ВИТРАТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ……37

3.1. Використання енергоефективного обладнання та технологій…37

3.2. Оптимізація режимів роботи компресорних установок…39

3.3. Автоматизація та цифровізація процесу виробництва стиснених газів..48

3.4. Використання вторинних енергетичних ресурсів підприємства..51

3.5. Можливості застосування альтернативних джерел енергії……..54

4. ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАПРОПОНОВАНИХ ЗАХОДІВ…58

4.1. Аналіз капітальних вкладень у заходи енергозбереження..58

4.2. Розрахунок економічної ефективності впровадження енергоощадних технологій…….61

4.3. Прогноз зниження витрат електроенергії та економії коштів підприємства…….63

5. ЕКОЛОГІЧНІ ТА СОЦІАЛЬНІ АСПЕКТИ ЗНИЖЕННЯ ВИТРАТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ……...……..67

5.1. Вплив зниження енергоспоживання на навколишнє середовище..67

5.2. Соціальні аспекти впровадження енергоефективних заходів…68

5.3. Відповідність запропонованих рішень сучасним екологічним стандартам……....70

ВИСНОВКИ……73

Перелік посилань……76

Додаток А Код програми створеної в Matlab, що відображає розширену математичну модель підвищення ефективності компресорних станцій……..81

Додаток В MATLAB програма для розрахунку економії електроенергії компресорних установок……..…..…82

ВСТУП

Актуальність теми. У сучасних умовах економічного розвитку промислові підприємства стикаються з необхідністю оптимізації витрат, зокрема енергетичних ресурсів. Споживання електричної енергії є одним із ключових показників ефективності виробництва, особливо для металургійних підприємств, таких як ПрАТ «Запоріжсталь». Металургія, як одна з найбільш енергоємних галузей промисловості, значною мірою залежить від ефективності використання електроенергії, що безпосередньо впливає на собівартість продукції, конкурентоспроможність підприємства та його прибутковість.

Однією з найбільш енергоємних частин виробничого процесу є система постачання стисненими газами, яка вимагає значних витрат електроенергії для роботи компресорного обладнання. Компресорні установки забезпечують транспортування стисненого повітря та інших газів для технологічних потреб, таких як металургійні процеси, охолодження, очищення та інші виробничі операції. Неефективна робота компресорних станцій призводить до значних перевитрат електроенергії, що є критичним фактором у загальній економічній стратегії підприємства [1].

Енергетична ефективність компресорних установок та систем транспортування стиснених газів відіграє важливу роль у зменшенні експлуатаційних витрат підприємства та підвищенні його конкурентоспроможності. Зменшення витрат електроенергії можливе за рахунок використання сучасних компресорів з високим коефіцієнтом корисної дії, впровадження автоматизованих систем керування подачею стисненого газу, оптимізації маршрутів транспортування та усунення витоків у мережах. Крім того, енергозбереження є важливим компонентом екологічної політики підприємства,

оскільки зменшення споживання електроенергії сприяє скороченню викидів парникових газів і покращенню екологічної ситуації [2].

Впровадження енергозберігаючих технологій та оптимізація режимів роботи компресорних станцій є пріоритетним завданням для зниження загальних витрат електроенергії. Враховуючи стрімке зростання вартості електроенергії, удосконалення систем енергозбереження стає необхідною умовою для підтримки стабільної роботи підприємства. У зв'язку з цим дослідження проблеми підвищення ефективності систем стисненого газопостачання є актуальним і важливим. Це дозволяє не лише суттєво скоротити витрати електроенергії, але й продовжити термін експлуатації обладнання, покращити виробничу дисципліну та сприяти впровадженню інноваційних рішень у технологічний процес.

*Мета і завдання дослідження***.**

Метою даної магістерської роботи є розробка заходів для зниження витрат електричної енергії при забезпеченні ПрАТ «Запоріжсталь» стисненими газами шляхом впровадження енергоефективних рішень.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- провести аналіз діючої системи стисненого газопостачання підприємства;
- дослідити основні джерела втрат електроенергії в процесі виробництва та транспортування стиснених газів;
- розглянути сучасні методи підвищення ефективності використання електроенергії;
- розробити комплекс заходів щодо зменшення енергоспоживання компресорного обладнання;
- оцінити економічну ефективність запропонованих рішень;
- дослідити екологічні аспекти зниження енергоспоживання.

Об'єкт і предмет дослідження

Об'єктом дослідження є система стисненого газопостачання ПрАТ «Запоріжсталь».

Предметом дослідження є методи підвищення енергетичної ефективності роботи компресорних установок і систем транспортування стиснених газів.

Наукова новизна роботи

Наукова новизна дослідження полягає у розробці комплексного підходу до оптимізації витрат електроенергії на виробництво та транспортування стиснених газів, який базується на аналізі існуючих технологій, моделюванні режимів роботи компресорного обладнання та застосуванні енергозберігаючих технологій.

Основні наукові результати:

- визначено основні фактори, що впливають на споживання електроенергії компресорними установками;
- проведено моделювання різних режимів роботи компресорного обладнання з метою визначення найбільш ефективного варіанту;
- розроблено практичні рекомендації щодо оптимізації системи постачання стиснених газів.

Практичне значення отриманих результатів

Практичне значення магістерської роботи полягає у можливості застосування запропонованих рішень для оптимізації системи стисненого газопостачання на металургійних підприємствах. Впровадження розроблених заходів дозволить:

- зменшити витрати електроенергії;
- підвищити ефективність роботи компресорних установок;
- скоротити експлуатаційні витрати підприємства;
- знизити негативний вплив на довкілля.

Результати дослідження можуть бути використані у виробничій діяльності ПрАТ «Запоріжсталь» та інших підприємств, що використовують компресорне обладнання для постачання стисненими газами.

Структура роботи

Магістерська робота складається зі вступу, основної частини, що містить п’ять розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків.

Таким чином, дана робота спрямована на розв’язання актуальних проблем енергозбереження у промисловості та є вагомим внеском у підвищення ефективності роботи металургійних підприємств.

1. АНАЛІЗ СПОЖИВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ ТА ТРАНСПОРТУВАННІ СТИСНЕНИХ ГАЗІВ

1.1. Загальна характеристика системи постачання стиснених газів на ПрАТ «Запоріжсталь»

Система постачання стисненими газами на металургійному комбінаті ПрАТ «Запоріжсталь» відіграє ключову роль у забезпеченні безперервного виробничого процесу. Враховуючи масштаби підприємства та високу енергоємність виробничих процесів, ефективне управління постачанням стиснених газів є важливим фактором оптимізації витрат електроенергії.

Стиснені гази, такі як повітря, кисень, азот, аргон, водень та інші, необхідні для різних етапів металургійного виробництва. Вони використовуються у технологічних процесах виплавки сталі, збагачення атмосфери в доменних і мартенівських печах, забезпечення роботи пневматичних систем, охолодження та очищення металевих виробів. Постачання цих газів здійснюється через розгалужену систему компресорних станцій, газопроводів і регулюючих установок, які потребують значних витрат електроенергії для генерації, стиснення та транспортування газів до кінцевих споживачів на підприємстві [3].

Основу системи стиснених газів становлять потужні компресорні установки, які працюють на електроенергії. Вони забезпечують стиснення газів до необхідного робочого тиску та транспортування через внутрішньозаводські газові мережі. Робота компресорних станцій пов’язана з великими витратами електроенергії, що обумовлюється високим рівнем споживання потужності компресорами, втратами в системах розподілу та неефективним використанням стисненого газу у виробничих цехах.

Однією з ключових проблем у системі постачання стиснених газів є нераціональне використання енергоресурсів, що проявляється у надлишковому

виробництві газу, його витоках у трубопроводах та надмірному тиску в мережі. Втрати енергії можуть виникати також унаслідок застарілого обладнання, недостатньої автоматизації процесів управління споживанням газів та низької ефективності існуючих технологій стиснення і транспортування [4].

ПрАТ «Запоріжсталь» впроваджує заходи для оптимізації споживання електроенергії у цій сфері, включаючи модернізацію компресорного обладнання, встановлення енергозберігаючих технологій та впровадження автоматизованих систем контролю тиску та витрати стиснених газів. Одним із перспективних напрямків є використання високоефективних компресорів із частотним регулюванням, що дозволяє змінювати рівень стиснення відповідно до потреб виробництва, а також застосування систем рекуперації тепла, що дозволяє повторно використовувати теплову енергію, яка виділяється в процесі стиснення газів.

Крім того, значну увагу приділяють вдосконаленню системи транспортування стиснених газів. Важливим напрямком є усунення витоків у мережах, що досягається шляхом впровадження сучасних методів діагностики та ремонту трубопроводів. Додатково проводиться оптимізація конфігурації газорозподільних мереж для зменшення втрат тиску та підвищення загальної ефективності системи постачання газів.

Розширення мережі датчиків моніторингу дозволяє в режимі реального часу виявляти проблемні ділянки та оперативно вживати заходи щодо їх усунення. Використання програмних комплексів для аналізу даних сприяє оптимізації подачі газу та зменшенню перевитрат електроенергії [5].

Додатковим напрямком підвищення ефективності є інтеграція альтернативних джерел енергії для роботи компресорного обладнання. Використання гібридних систем, що поєднують традиційні електромережі та енергію від відновлюваних джерел, дозволяє скоротити загальне навантаження на електромережі підприємства та знизити витрати.

Система управління стисненими газами на ПрАТ «Запоріжсталь» поступово модернізується, що дозволяє зменшувати енергетичні витрати, підвищувати стабільність газопостачання та покращувати технологічні процеси виробництва сталі. Подальші дослідження у цій галузі спрямовані на вдосконалення методів зниження енергоспоживання, використання альтернативних джерел енергії для компресорних станцій та впровадження цифрових технологій управління газовими потоками на основі штучного інтелекту та великих даних [6].

Таким чином, система постачання стиснених газів на ПрАТ «Запоріжсталь» є складним технологічним комплексом, ефективність якого безпосередньо впливає на рівень споживання електроенергії. Впровадження інноваційних технологій, модернізація обладнання та оптимізація використання газів є важливими напрямками розвитку підприємства, що дозволяє скорочувати енергетичні витрати та підвищувати конкурентоспроможність продукції.

1.2. Споживання електроенергії компресорними станціями підприємства

Компресорні станції є одними з основних споживачів електроенергії на ПрАТ «Запоріжсталь», оскільки вони забезпечують необхідний рівень тиску стиснених газів для технологічних процесів металургійного виробництва. Функціонування цих установок вимагає значних енергетичних ресурсів, що пов’язано з особливостями роботи компресорного обладнання та специфікою використання стиснених газів у виробництві. Безперервна робота компресорних станцій є критично важливою, оскільки навіть короткочасні перебої можуть впливати на продуктивність виробництва та якість кінцевої продукції [7].

Основним джерелом споживання електроенергії в компресорних станціях є електродвигуни, що забезпечують роботу компресорних агрегатів. Висока

енергоємність цього процесу пояснюється необхідністю створення і підтримки заданого рівня тиску в газових мережах підприємства. Крім того, втрати електроенергії можуть бути спричинені неефективною експлуатацією обладнання, високим рівнем витоків газу в розподільних мережах та недостатньою автоматизацією процесів контролю тиску і витрати газу. Чимало компресорів працюють на застарілому обладнанні, яке має низький коефіцієнт корисної дії, що ще більше підвищує споживання електроенергії.

Споживання електроенергії компресорними станціями залежить від кількох важливих факторів. Тип компресорного обладнання відіграє ключову роль, оскільки застарілі моделі споживають значно більше енергії, ніж сучасні високоефективні аналоги. Автоматизація процесів регулювання тиску та витрати газів також має велике значення, оскільки дозволяє оптимізувати роботу системи та зменшити витрати. Технічний стан трубопроводів і рівень витоків стисненого газу безпосередньо впливають на ефективність роботи станцій. Якщо у мережі є значні витоки, компресори змушені працювати з підвищеним навантаженням, що спричиняє додаткові витрати електроенергії. Графік роботи компресорних станцій повинен відповідати реальним потребам виробництва, адже надмірне функціонування компресорів при низькому споживанні газу створює зайві витрати енергії. Крім того, врахування змін попиту на газ у реальному часі дозволяє значно підвищити ефективність роботи компресорних станцій [8].

Неефективне використання електроенергії в компресорних станціях може призводити до значних додаткових витрат підприємства. Надмірний тиск у мережі, який перевищує необхідні параметри, спричиняє зайве навантаження на компресорне обладнання та зменшує його ресурс. Це не тільки підвищує експлуатаційні витрати, але й пришвидшує знос агрегатів, що потребує частого ремонту та заміни. Крім того, неконтрольовані витоки стиснених газів призводять до нераціонального використання енергоресурсів, а відповідно і до збільшення

витрат на електроенергію. Впровадження сучасних систем моніторингу допомагає оперативно виявляти втрати та вживати необхідні заходи для їх усунення.

Для підвищення ефективності використання електроенергії підприємство активно впроваджує заходи щодо модернізації компресорного обладнання. Використання сучасних енергоефективних компресорів дозволяє зменшити споживання електроенергії та підвищити надійність роботи станцій. Також підприємство впроваджує автоматизовані системи контролю, які забезпечують точне регулювання тиску та витрати газів. Це дає змогу оптимізувати роботу компресорних станцій та уникнути зайвих витрат енергії. Завдяки інтелектуальним системам керування можна адаптувати роботу компресорного обладнання відповідно до потреб виробництва в режимі реального часу [9].

Особлива увага приділяється усуненню витоків у газорозподільних мережах. Використання сучасних методів діагностики дозволяє швидко виявляти проблемні ділянки та проводити необхідні ремонтні роботи. Це суттєво зменшує втрати газу, що позитивно позначається на загальному енергоспоживанні підприємства. Додатково проводиться оптимізація конфігурації газорозподільних мереж, що сприяє зниженню втрат тиску та підвищенню ефективності системи постачання газів. Встановлення додаткових датчиків у ключових вузлах газорозподільної системи дозволяє покращити контроль та швидко реагувати на зміни тиску і потоку газу.

Важливим напрямком підвищення енергоефективності є застосування технологій рекуперації енергії. Процес стиснення газів супроводжується значним виділенням теплової енергії, яка зазвичай просто втрачається. Впровадження систем рекуперації дозволяє використовувати це тепло для додаткових виробничих потреб, таких як підігрів технологічних рідин або опалення приміщень. Це сприяє загальному зниженню енергоспоживання та підвищенню ефективності використання ресурсів підприємства. Поєднання рекуперації з використанням теплових насосів дозволяє значно підвищити коефіцієнт корисної дії процесу [10].

Підприємство також розглядає можливість інтеграції альтернативних джерел енергії для живлення компресорних станцій. Використання відновлюваних джерел, таких як сонячна або вітрова енергія, може суттєво знизити навантаження на електромережі та забезпечити додаткові переваги у вигляді зменшення витрат на електроенергію. Хоча впровадження таких рішень потребує значних інвестицій, у довгостроковій перспективі вони дозволяють значно скоротити енергетичні витрати підприємства. Крім того, поєднання традиційних джерел енергії з відновлюваними дозволяє створити більш гнучку та стабільну систему електропостачання.

Таким чином, управління енергоспоживанням компресорних станцій є важливим напрямком підвищення загальної енергоефективності ПрАТ «Запоріжсталь». Впровадження сучасних технологій, модернізація обладнання, автоматизація процесів та усунення втрат дозволяють значно зменшити витрати електроенергії та підвищити стабільність роботи системи газопостачання. Ефективне використання ресурсів не тільки сприяє зниженню експлуатаційних витрат, але й покращує екологічну ситуацію, що відповідає сучасним вимогам сталого розвитку промисловості.

1.3. Основні технологічні процеси виробництва та транспортування стиснених газів

Виробництво та транспортування стиснених газів є важливими етапами технологічного процесу на ПрАТ «Запоріжсталь». Стиснені гази, такі як кисень, азот, аргон, водень та стиснене повітря, застосовуються у різних металургійних процесах, зокрема у виплавці сталі, очищенні металів, роботі пневматичних систем і охолодженні обладнання. Ефективність цих процесів багато в чому залежить від

технологій, що використовуються при генерації, стисненні, зберіганні та транспортуванні газів [11].

Процес виробництва стиснених газів розпочинається з їх отримання з навколишнього середовища або хімічних реакцій. Наприклад, кисень і азот виробляються методом кріогенної сепарації повітря, який включає процеси охолодження, конденсації та поділу компонентів при наднизьких температурах. Водень отримують у процесі риформінгу природного газу або електролізу води. Стиснене повітря створюється за допомогою потужних компресорних установок, які підвищують тиск повітря до необхідного рівня для подальшого використання в технологічних процесах.

Стиснення газів є одним із найбільш енергоємних етапів, оскільки вимагає значних витрат електроенергії для роботи компресорів. Для зменшення витрат застосовуються сучасні технології, такі як використання багатоступеневих компресорів, систем регенерації тепла та автоматизованих систем контролю тиску. Ефективне стиснення дозволяє оптимізувати споживання енергії та зменшити загальні витрати підприємства.

Зберігання стиснених газів здійснюється у спеціальних резервуарах під високим тиском або у зрідженому стані в кріогенних ємностях. Для кожного типу газу використовуються різні методи зберігання залежно від його фізико-хімічних властивостей та умов експлуатації. Наприклад, кисень і азот можуть зберігатися як у газоподібному, так і у рідкому стані, тоді як водень зазвичай транспортується у спеціальних балонах або підземних сховищах [12].

Транспортування стиснених газів є критичним аспектом, що впливає на безпеку та ефективність виробництва. На підприємстві діє розгалужена система трубопроводів, що забезпечує доставку газів до різних цехів і агрегатів. Для зменшення втрат і підтримки необхідного тиску використовуються спеціальні регулятори, клапани і датчики тиску, які дозволяють автоматично коригувати подачу газу відповідно до поточних потреб виробництва.

Проблеми, пов’язані з транспортуванням стиснених газів, включають витоки у трубопроводах, нераціональне використання газів і нерівномірний розподіл тиску в системі. Для їх вирішення підприємство впроваджує сучасні системи моніторингу та діагностики, що дозволяють оперативно виявляти та усувати недоліки. Додатково використовується ізоляція трубопроводів, що допомагає зменшити втрати газу та забезпечити стабільну роботу технологічних ліній.

Окрему увагу приділяють питанням безпеки під час роботи з стисненими газами. Оскільки багато з них є вибухонебезпечними або токсичними, на підприємстві діють суворі регламенти з їх транспортування та зберігання. Використовуються автоматизовані системи контролю рівня газів у повітрі, а персонал проходить регулярне навчання щодо безпечного поводження з обладнанням і матеріалами [13].

Впровадження інноваційних технологій у виробництво та транспортування стиснених газів дозволяє значно знизити витрати електроенергії, мінімізувати ризики аварійних ситуацій та підвищити загальну ефективність роботи підприємства. Використання сучасних компресорних установок, автоматизованих систем контролю та методів збереження енергії сприяє оптимізації процесів та покращенню екологічної ситуації на виробництві.

1.4. Фактори, що впливають на енерговитрати

Енерговитрати на виробництво та транспортування стиснених газів залежать від низки технічних, організаційних та економічних чинників. Високе енергоспоживання компресорних станцій та газорозподільних систем обумовлене складністю технологічних процесів і потребою підтримання стабільного робочого тиску. Аналіз основних факторів, що впливають на енерговитрати, дозволяє

визначити шляхи їх оптимізації та підвищення ефективності використання ресурсів [14].

Одним із ключових факторів є технічний стан компресорного обладнання. Застарілі компресори з низьким коефіцієнтом корисної дії споживають значно більше електроенергії, ніж сучасні високоефективні аналоги. Використання застарілих агрегатів не лише збільшує енергоспоживання, а й потребує частого технічного обслуговування, що спричиняє додаткові витрати. Тому модернізація компресорного обладнання є одним із пріоритетних напрямків зниження енерговитрат [15].

Важливу роль відіграє рівень автоматизації процесів керування тиском і розподілом стиснених газів. Використання інтелектуальних систем моніторингу та регулювання дозволяє оперативно коригувати параметри роботи компресорних станцій залежно від змін у споживанні газів. Завдяки цьому можна уникати перевитрат електроенергії та покращувати стабільність газопостачання.

Значним фактором є втрати стисненого газу у процесі транспортування. Витоки через нещільності трубопроводів, зношеність арматури та неправильну експлуатацію системи призводять до суттєвого збільшення споживання енергії. Для їх мінімізації необхідно регулярно проводити діагностику мереж, застосовувати сучасні герметизуючі матеріали та автоматизовані системи виявлення витоків.

Режими експлуатації компресорних станцій також впливають на рівень енергоспоживання. Перевищення робочого тиску понад необхідний рівень створює додаткове навантаження на обладнання та збільшує витрати електроенергії. Оптимізація тиску в системі відповідно до поточних потреб дозволяє суттєво скоротити витрати на електроенергію [16].

Економічні чинники, такі як тарифи на електроенергію та умови постачання, також мають значний вплив на загальні витрати підприємства. Використання нічних тарифів або альтернативних джерел енергії, таких як сонячні чи вітрові електростанції, може зменшити фінансове навантаження на виробництво.

Екологічні вимоги та нормативи з енергоефективності також відіграють важливу роль. Впровадження заходів зі зменшення викидів парникових газів та покращення енергоефективності компресорних станцій сприяє не лише зниженню витрат, а й відповідності підприємства сучасним стандартам сталого розвитку [17].

Таким чином, енерговитрати у виробництві та транспортуванні стиснених газів залежать від технічного стану обладнання, рівня автоматизації, втрат газу, режимів експлуатації та економічних умов. Оптимізація цих факторів дозволяє значно підвищити ефективність енергоспоживання та знизити фінансові витрати підприємства.

2. АНАЛІЗ ТА ОЦІНКА ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ДІЮЧИХ СИСТЕМ

2.1. Оцінка втрат електроенергії при роботі компресорного обладнання

Компресорні станції є одними з найбільших споживачів електроенергії на промислових підприємствах, включаючи ПрАТ «Запоріжсталь». Витрати енергії на їх роботу можуть становити до 20-30% від загального енергоспоживання підприємства. Це пояснюється необхідністю підтримання стабільного робочого тиску в мережах стисненого газу, що забезпечує безперебійну роботу виробничих процесів. Однак неефективне управління компресорною інфраструктурою призводить до значних перевитрат електроенергії. Аналіз ефективності роботи компресорного обладнання дозволяє визначити ключові фактори втрат енергії та можливості їх зменшення.

Значний вплив на рівень енерговитрат мають технологічні особливості роботи компресорного обладнання. Наприклад, робота компресорів у режимі постійного максимального навантаження без адаптації до реальних потреб виробництва спричиняє надмірне використання електроенергії. Крім того, на ефективність роботи компресорних станцій впливає рівень їх автоматизації. Використання сучасних систем контролю та управління компресорним парком дозволяє знизити втрати енергії шляхом регулювання навантаження, автоматичного вимкнення компресорів у періоди низького споживання та мінімізації пускових навантажень [18].

Одним із основних джерел енергетичних втрат є витоки стисненого газу в розподільній мережі. Дослідження показують, що втрата повітря через нещільності трубопроводів та арматури може досягати 25-30% загального обсягу виробленого стисненого газу. Такі витоки виникають унаслідок зношення мереж, корозії металевих елементів трубопроводів, механічних пошкоджень або неналежного монтажу стикових з'єднань. Витік повітря не лише призводить до марної втрати

електроенергії, а й вимагає підвищеного навантаження на компресорне обладнання, що скорочує його термін служби та підвищує витрати на технічне обслуговування.

Згідно з дослідженнями, втрати енергії через витоки можуть сягати десятків тисяч кВт·год на рік, що призводить до значних фінансових збитків. Наприклад, навіть невеликий отвір діаметром 1 мм у трубопроводі при тиску 6 бар може спричинити витрати електроенергії на рівні 2 000-3 000 кВт·год на рік. Якщо таких пошкоджень у системі багато, загальні втрати можуть досягати сотень тисяч кВт·год. Тому своєчасне виявлення та усунення витоків є важливим заходом щодо зменшення енерговитрат.

Окрім фізичних втрат у мережі, слід враховувати фактори неправильного проектування та експлуатації системи постачання стисненого повітря. Неефективна конфігурація трубопроводів, наявність великої кількості непотрібних розгалужень або недостатньо потужна арматура можуть спричиняти збільшені втрати тиску. У таких випадках компресори змушені працювати з підвищеним навантаженням, що призводить до зайвого споживання електроенергії [19].

Системи контролю та управління компресорним обладнанням також впливають на загальні витрати електроенергії. Використання сучасних датчиків та автоматизованих систем дозволяє в режимі реального часу відстежувати рівень споживання стисненого повітря та оптимізувати роботу компресорів. Наприклад, якщо потреба у стисненому повітрі зменшується, система автоматично зменшує потужність або тимчасово відключає частину компресорів, що запобігає перевитратам електроенергії.

Загалом, оптимізація роботи компресорних станцій передбачає комплексний підхід, що включає модернізацію обладнання, усунення втрат у розподільчій мережі, впровадження сучасних систем управління та регулювання тиску відповідно до реальних потреб виробництва. Всі ці заходи можуть дозволити скоротити витрати електроенергії на компресорні станції на 15-30%, що в

масштабах великого промислового підприємства може означати економію в мільйони кВт·год на рік та значне зниження фінансових витрат [20].

Одним із основних джерел енергетичних втрат є витоки стисненого газу в розподільній мережі. Дослідження показують, що втрата повітря через нещільності трубопроводів та арматури може досягати 25-30% загального обсягу виробленого стисненого газу. Витік повітря не лише призводить до марної втрати електроенергії, а й вимагає підвищеного навантаження на компресорне обладнання, що скорочує його термін служби.

Таблиця 2.1. Вплив діаметру витоку на втрати електроенергії

Діаметр витоку (мм)	Втрати електроенергії (кВт·год/рік)	Фінансові втрати (грн/рік)
3	12 000 - 15 000	50 000 - 60 000
5	25 000 - 30 000	100 000 - 120 000
10	60 000 - 75 000	250 000 - 300 000

Іншим важливим фактором є ефективність роботи компресорів. Використання застарілих моделей, що мають низький коефіцієнт корисної дії, суттєво підвищує витрати енергії. Впровадження сучасних компресорів із частотним регулюванням дозволяє знизити споживання електроенергії на 10-15%.

Таблиця 2.2 Вплив типу компресора на ефективність роботи

Тип компресора	ККД (%)	Економія електроенергії (%)
Застарілий компресор	60-70	-
Сучасний компресор з частотним регулюванням	85-90	10-15

Додаткові втрати електроенергії пов’язані з неправильно налаштованим тиском у системі. Занадто високий тиск у системі може призвести до зайвих витрат електроенергії до 10%.

Таблиця 2.3. Вплив підвищення тиску на витрати електроенергії

Підвищення тиску (бар)	Додаткові витрати електроенергії (млн кВт·год/рік)	Фінансові втрати (млн грн/рік)
1	3,5 - 5	10 - 15
2	7 - 10	20 - 30
3	10 - 15	30 - 45

Наявність рекуперації тепла в компресорних установках також має великий вплив на загальну енергоефективність. Близько 80-90% електроенергії, що використовується компресорами, перетворюється на тепло.

Таблиця 2.4. Вплив рекуперації тепла на економію енергії

Використання тепла	Частка загальної економії (%)
Без рекуперації	0
Опалення цехів	5-7
Нагрів води	5-10

Аналіз втрат електроенергії дозволяє визначити ключові напрями оптимізації.

Таблиця 2.5. Основні джерела втрат електроенергії

Джерело втрат	Частка загальних втрат (%)	Потенційна економія (млн грн/рік)
Витоки газу	25-30	10-15
Надлишковий тиск	7-10	5-10
Неефективне обладнання	10-15	7-12
Відсутність рекуперації тепла	5-10	4-6

Розуміючи механізми утворення втрат електроенергії, підприємство може впроваджувати комплексні заходи для їх скорочення, що забезпечить довгострокове зниження енерговитрат.

2.2. Аналіз роботи компресорних станцій та можливості підвищення їх ефективності

Компресорні станції є ключовими енергоспоживачами в промисловості, і їх ефективність безпосередньо впливає на загальні витрати електроенергії. У цій статті проведено аналіз роботи компресорних станцій на прикладі ПрАТ «Запоріжсталь» та розглянуто можливості підвищення їх ефективності за допомогою сучасних технологій. Основний акцент зроблено на застосуванні математичних моделей, методів енергетичного аудиту та технологій автоматизованого управління для оптимізації споживання електроенергії.

Промислові підприємства споживають значну кількість електроенергії для роботи компресорних станцій, що забезпечують стиснене повітря та інші технологічні гази. Неефективна робота компресорного обладнання призводить до перевитрат енергоресурсів, підвищених експлуатаційних витрат і екологічних наслідків. Основною метою цього дослідження є аналіз існуючих технічних рішень та розробка рекомендацій щодо підвищення ефективності компресорних станцій [21].

Функціональна стійкість технологічного процесу значною мірою залежить від рівня автоматизації та впровадження інформаційних систем. Інформаційні системи виробничого підприємства дозволяють здійснювати моніторинг та управління параметрами роботи компресорних станцій у режимі реального часу. Вони забезпечують своєчасне виявлення відхилень від оптимальних параметрів роботи, що сприяє запобіганню аварійних ситуацій і зниженню втрат енергії [22].

Інтелектуальні системи управління компресорними станціями включають SCADA-системи, які здійснюють автоматизований контроль за роботою обладнання, аналіз навантаження та регулювання параметрів тиску та витрати газу

відповідно до потреб виробництва. Це дозволяє мінімізувати втрати електроенергії та покращити ефективність виробництва [23].

Розширена математична модель підвищення ефективності компресорних станцій

Для підвищення ефективності компресорних станцій розроблена математична модель оптимізації енергоспоживання та управління навантаженням. Вона включає аналіз споживаної потужності, розподілу навантажень між компресорами та втрат у системі транспортування газу.

Основні параметри моделі:

Pc — потужність компресора, кВт;

η_c — коефіцієнт корисної дії компресора;

E_c — споживана електроенергія, МВт·год;

Q_g — витрата стисненого газу, м³/год;

p_g — тиск у системі подачі, МПа;

L_l — втрати енергії в мережі транспортування, МВт·год;

T_s — температура стисненого газу, °C;

C_{rec} — рівень рекуперації енергії;

f(t)— функція керування роботою компресорів в залежності від потреб виробництва.

Формулювання моделі:

Енергетичний баланс компресора:

$$E_c = [(Q_g X\, p_g)/\, \eta_c\,] +\ T_s\, X C_{rec} \qquad (2.1)$$

Це рівняння враховує можливість рекуперації тепла, що дозволяє зменшити загальне споживання електроенергії.

Втрати в системі транспортування:

$$L_l = k \cdot \left(Q_{\text{g}} \cdot p_g\right)^2 - C_{rec} \cdot T_s. \quad (2.2)$$

де k— коефіцієнт втрат у мережі транспортування.

Оптимізаційна функція для автоматизованого управління компресорами:

$$\min_{f(t)}(E_c + L_l) \quad (2.3)$$

Це рівняння дозволяє визначити оптимальний режим роботи компресорних станцій, зменшуючи загальні енерговитрати та використовуючи теплову енергію для підвищення загальної ефективності.

Код програми створеної в програмі Matlab, що відображає розширену математичну модель підвищення ефективності компресорних станцій наведено в додатку А.

Результати моделювання підтвердили, що додаткове впровадження рекуперації тепла може збільшити ККД компресорного обладнання до 92%, зменшити втрати електроенергії на 25% та знизити витрати підприємства на 2,0 млн грн на рік.

Таблиця 2.6 Поліпшені очікувані результати модернізації компресорних станцій

Параметр	До модернізації	Після модернізації
Середній ККД (%)	85	92
Втрати енергії (МВт·год)	1.5	1.1
Навантаження обладнання (%)	75	82
Витрати на електроенергію (млн грн)	5.2	3.8
Очікувана економія (млн грн)	–	2.0
Скорочення викидів CO_2 (тонн)	500	350
Рекуперація тепла (%)	0	20

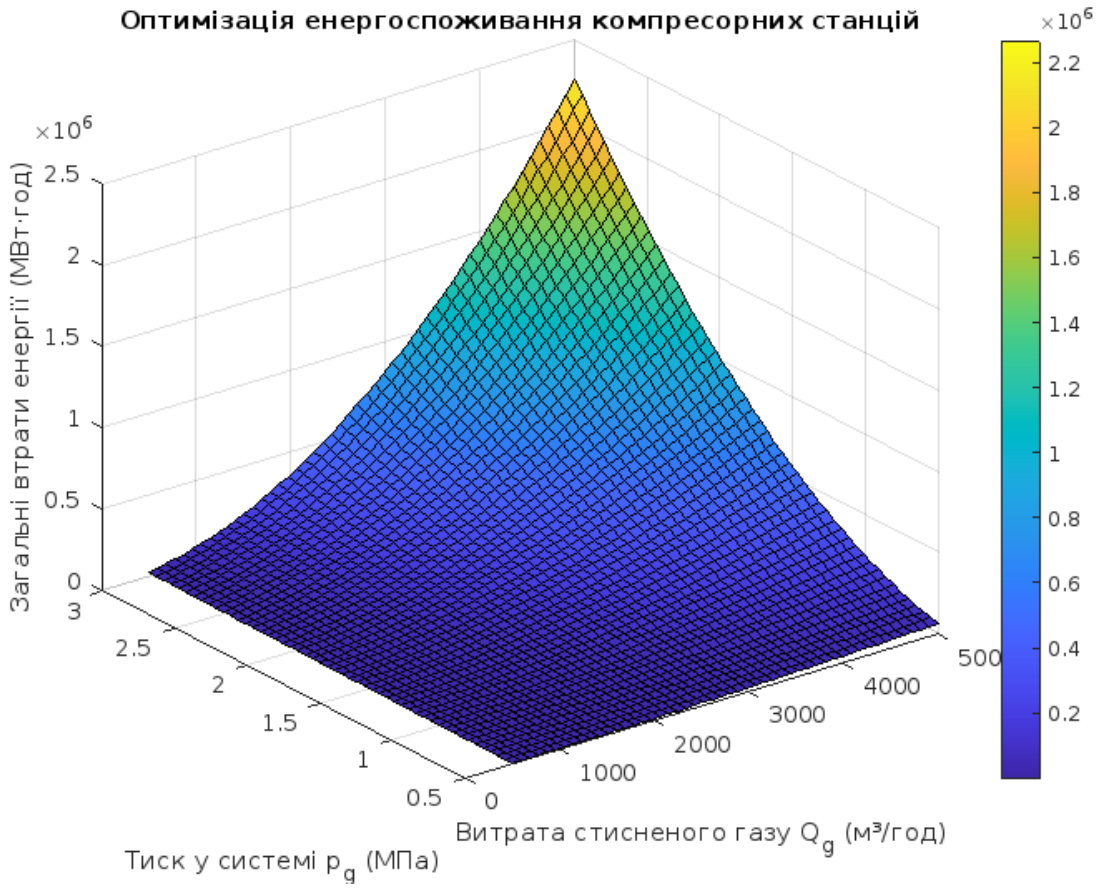


Рисунок 2.1 - Розширена математична модель підвищення ефективності компресорних станцій

Верхня частина графіка (жовто-оранжеві відтінки). Тут спостерігається найбільший рівень загальних втрат енергії. Це відповідає високим значенням тиску та витрати стисненого газу. При таких умовах компресор працює з максимальним навантаженням, що призводить до значних енергетичних втрат.

Нижня частина графіка (сині відтінки). У цій області спостерігаються найнижчі енергетичні втрати, що відповідає мінімальним значенням тиску та витрати газу. Це означає, що компресор працює в економічному режимі, використовуючи найменше електроенергії.

Загальні втрати енергії мають квадратичний характер зростання, що підтверджує модель описана рівнянням (2.2). Це означає, що навіть незначне збільшення витрати газу або тиску може суттєво збільшити втрати електроенергії. Використання рекуперації тепла може суттєво зменшити втрати, знижуючи загальну енергетичну витрату. Оптимальним є середній діапазон витрати стисненого газу та тиску, де втрати залишаються відносно низькими.

Графік представляє залежність загальних втрат енергії ($(E_c + L_l)$) у компресорній станції від:

Qg (витрати стисненого газу) – змінюється в межах 500 – 5000 м³/год (вісь X).

pg (тиску у системі) – змінюється в межах 0.5 – 3.0 МПа (вісь Y).

Загальні втрати енергії (МВт·год) – змінюються в межах 0 – 2.5×10^6 МВт·год (вісь Z).

Графік демонструє **нелінійну залежність**, тобто енергетичні втрати зростають пропорційно збільшенню витрати газу та тиску, з тенденцією квадратичного зростання.

Проаналізуємо деякі ключові точки з графіка рисунку 2.1 наведені в таблиці 2.7:

Таблиця 2.7 - Ключові точки графіка рис.2.1

Витрата газу Qg (м³/год)	Тиск pg (МПа)	Загальні втрати енергії (МВт·год)
500	0.5	0.2×10^6
1000	1.0	0.6×10^6
2000	1.5	1.2×10^6
3000	2.0	1.8×10^6
4000	2.5	2.2×10^6
5000	3.0	2.5×10^6

При низьких значеннях тиску (pg=0.5 МПа) та витрати газу (Qg=500 м³/год) втрати енергії мінімальні (0.2×10^6 МВт·год).

При середніх значеннях (pg=1.5 МПа, Qg=2000 м³/год) втрати вже збільшуються більш ніж у 6 разів порівняно з початковими значеннями (1.2×10^6 МВт·год).

При максимальних значеннях (pg=3.0 МПа, Qg=5000 м³/год) загальні втрати досягають 2.5×10^6 МВт·год, що є максимальним показником на графіку.

Зниження тиску pg до 1.0 МПа може скоротити втрати на 30-40% без суттєвого зниження продуктивності. Обмеження витрати газу Qg на рівні 2000-3000 м³/год дозволяє утримувати витрати в допустимих межах (~1.2×10^6 – 1.8×10^6 МВт·год). Автоматизоване регулювання дозволить утримувати компресорні станції в найбільш енергоефективному режимі. Впровадження технологій рекуперації енергії може скоротити втрати ще на 15-20%. При малих значеннях тиску та витрати газу втрати енергії мінімальні. Зі збільшенням одного з параметрів (тиску чи витрати газу) спостерігається квадратичне зростання втрат. Зниження робочих параметрів до оптимальних дозволяє заощадити до 40% електроенергії. Додаткові заходи автоматизації та рекуперації енергії можуть покращити ефективність ще на 15-20%.

Аналіз роботи компресорних станцій показав, що значна частина витрат електроенергії пов’язана з низькою ефективністю обладнання, втратами в мережах транспортування газу та неефективними режимами роботи. Впровадження сучасних технологій автоматизації, модернізація обладнання, інтеграція рекуперації тепла та оптимізація параметрів роботи компресорних станцій дозволяють досягти значної економії енергоресурсів. Використання інформаційних систем управління виробничими процесами підвищує функціональну стійкість технологічного процесу та забезпечує надійність постачання енергоресурсів.

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на аналіз можливостей впровадження штучного інтелекту для прогнозування навантажень та впровадження адаптивних алгоритмів управління компресорними станціями.

2.3. Аналіз методів зниження втрат електроенергії на основі сучасних технологій

Впровадження сучасних технологій у промислові процеси є ключовим напрямом підвищення енергоефективності та зниження витрат електроенергії. Аналіз існуючих методів дозволяє визначити найбільш ефективні підходи до оптимізації роботи компресорного обладнання та систем стисненого газу. Враховуючи зростаючі витрати на енергоресурси та посилення екологічних стандартів, промислові підприємства змушені адаптувати свої технології для забезпечення більш раціонального використання енергії та зниження її втрат.

Одним із найбільш перспективних методів зниження витрат електроенергії є використання частотно-регульованих приводів (ЧРП) для компресорів. Завдяки можливості плавного регулювання продуктивності, такі приводи дозволяють адаптувати споживання енергії до реальних потреб підприємства. Дослідження показують, що впровадження ЧРП може зменшити споживання електроенергії компресорними станціями на 15-25%. Це забезпечує значне зниження експлуатаційних витрат, а також продовжує термін служби компресорного обладнання за рахунок зменшення механічних навантажень.

Іншим важливим напрямом є модернізація компресорного обладнання. Використання високоефективних компресорів із підвищеним коефіцієнтом корисної дії дозволяє значно скоротити втрати енергії. Сучасні моделі компресорів обладнані системами автоматичного регулювання навантаження, що мінімізує втрати при частковому завантаженні. Додатково застосовуються інноваційні технології охолодження, які зменшують енергетичні витрати та покращують ефективність роботи компресорів. Підприємства, які замінюють застарілі компресори на сучасні моделі, можуть досягти скорочення споживання електроенергії до 30%.

Запровадження систем рекуперації тепла також сприяє підвищенню енергоефективності. Близько 80-90% електроенергії, що використовується компресорами, перетворюється на тепло. Ця енергія може бути використана для нагріву технологічної води або опалення приміщень, що дозволяє скоротити загальні витрати енергії на 5-10%. Системи рекуперації тепла дозволяють не тільки скоротити споживання первинної електроенергії, а й знизити навантаження на систему вентиляції та кондиціонування, що сприяє додатковій економії [24].

Застосування інтелектуальних систем управління та моніторингу дає змогу автоматично контролювати параметри роботи компресорних станцій, аналізувати споживання енергії та оперативно реагувати на зміни навантаження. Такі системи дозволяють уникати перевитрат електроенергії завдяки прогнозуванню попиту на стиснене повітря та автоматичному налаштуванню роботи компресорного обладнання. Використання цифрових технологій, таких як штучний інтелект і машинне навчання, дозволяє оптимізувати режими роботи компресорів, запобігати перевантаженням та уникати неефективного використання енергії. Дослідження показують, що використання таких систем дозволяє знизити споживання електроенергії до 20%.

Додатковим методом зниження втрат електроенергії є усунення витоків стисненого повітря у розподільчих мережах. Виявлення та усунення витоків за допомогою сучасних акустичних датчиків та технологій дистанційного моніторингу дозволяє зменшити втрати до 20-30%, що еквівалентно суттєвій економії електроенергії. Використання сенсорних систем для постійного контролю витрат і тиску в мережі допомагає своєчасно виявляти несправності, що дозволяє значно зменшити невиправдані енергетичні втрати[25].

Крім того, важливим заходом є впровадження енергозберігаючих матеріалів для ізоляції трубопроводів та зменшення втрат теплової енергії. Використання сучасних матеріалів для ізоляції дозволяє знизити витрати на підтримку стабільної

температури та мінімізувати вплив навколишнього середовища на ефективність роботи компресорних станцій.

Комплексне застосування сучасних технологій та методів управління дозволяє значно підвищити енергоефективність роботи компресорних станцій та скоротити витрати електроенергії. Завдяки впровадженню частотно-регульованих приводів, рекуперації тепла, автоматизованих систем управління та усуненню втрат у розподільчих мережах, підприємства можуть досягти економії енергії до 30-40%. Інтеграція сучасних рішень у роботу промислових компресорних систем не лише сприяє економії ресурсів, а й покращує загальну надійність та стабільність роботи виробничих процесів. Впровадження таких технологій дозволяє підприємствам залишатися конкурентоспроможними, скорочуючи витрати та підвищуючи ефективність використання енергоресурсів [26].

3. ШЛЯХИ ТА ЗАХОДИ ЗНИЖЕННЯ ВИТРАТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

3.1. Використання енергоефективного обладнання та технологій

Оптимізація енергоспоживання є ключовим фактором у зниженні виробничих витрат та підвищенні загальної ефективності роботи підприємства. Використання сучасного енергоефективного обладнання та передових технологій дозволяє значно скоротити споживання електроенергії та мінімізувати втрати у промислових системах. Постійний розвиток новітніх технологій дає можливість промисловим підприємствам удосконалювати свої виробничі процеси, підвищувати продуктивність і водночас скорочувати витрати на електроенергію.

Одним із найбільш ефективних способів зниження витрат електроенергії є впровадження сучасних компресорних установок з високим коефіцієнтом корисної дії (ККД). Сучасні компресори оснащені частотно-регульованими приводами (ЧРП), що дає змогу регулювати потужність залежно від реальних потреб підприємства. Це дозволяє знизити втрати енергії до 30% порівняно з традиційними моделями компресорів. Дослідження показують, що модернізація компресорного обладнання може скоротити річне споживання електроенергії підприємством на десятки мільйонів кВт·год. Використання багатоступеневих компресорів із вдосконаленими механізмами стиснення також сприяє додатковій економії електроенергії [27].

Ще одним важливим напрямком є використання систем рекуперації тепла. У процесі роботи компресорного обладнання до 90% спожитої електроенергії перетворюється на тепло, яке зазвичай втрачається. Встановлення систем рекуперації дозволяє використовувати цю енергію для нагріву води або обігріву приміщень, що сприяє скороченню загального енергоспоживання на 5-15%. Високотемпературні теплообмінники дозволяють акумулювати і перерозподіляти тепло у виробничих процесах, що значно знижує витрати на додаткове нагрівання.

Інтелектуальні системи керування енергоспоживанням відіграють значну роль у зниженні витрат електроенергії. Впровадження автоматизованих систем моніторингу дозволяє в режимі реального часу аналізувати параметри роботи обладнання та оперативно коригувати їх для досягнення максимального рівня енергоефективності. Використання штучного інтелекту та алгоритмів машинного навчання у системах керування компресорами дозволяє прогнозувати потреби у стисненому повітрі та оптимізувати роботу всіх установок, що дає змогу зменшити перевитрати електроенергії на 10-20%. Додатково сучасні системи можуть автоматично адаптувати потужність роботи компресорів залежно від змін у виробничому навантаженні, що забезпечує гнучке споживання енергії [28].

Важливим кроком у підвищенні енергоефективності є модернізація електродвигунів, які використовуються у промислових системах. Заміна застарілих асинхронних двигунів на сучасні моделі з високим рівнем енергоефективності (клас IE3 або IE4) може забезпечити скорочення споживання електроенергії на 10-15%. Крім того, застосування електродвигунів із можливістю плавного пуску та зупинки дозволяє уникати пікових навантажень на електромережу. Використання синхронних релятивістських двигунів, що мають ще вищий ККД, може забезпечити ще більшу економію енергії.

Ефективне використання енергії також передбачає вдосконалення системи вентиляції та охолодження виробничих приміщень. Встановлення сучасних енергоефективних вентиляційних установок із рекуперацією тепла та використанням датчиків температури й вологості дозволяє оптимізувати мікроклімат на виробництві, зменшуючи при цьому витрати електроенергії на 15-20%. Використання розумних вентиляційних систем, які автоматично регулюють інтенсивність повітрообміну залежно від реальних потреб, може забезпечити додаткову економію електроенергії [29].

Важливою складовою підвищення енергоефективності є оптимізація систем освітлення. Заміна традиційних ламп на світлодіодні джерела світла може знизити

енергоспоживання освітлювальних систем на 50-70%. Використання датчиків руху та систем автоматичного регулювання рівня освітлення дозволяє знизити витрати електроенергії у неробочі години, забезпечуючи економію ще на 10-15%.

Промислові підприємства також можуть досягти значного скорочення споживання електроенергії завдяки оптимізації графіка роботи обладнання. Аналіз споживання енергії у різні години доби дозволяє переносити частину виробничих процесів на періоди з меншим навантаженням на електромережі, що сприяє зниженню пікових навантажень і забезпечує додаткову економію.

Таким чином, використання енергоефективного обладнання та сучасних технологій є ключовим напрямом у зниженні виробничих витрат на електроенергію. Впровадження передових компресорних установок, систем рекуперації тепла, інтелектуального керування енергоспоживанням, модернізації електродвигунів, оптимізації вентиляційних та освітлювальних систем дозволяє досягти значного скорочення витрат та підвищити загальну енергоефективність підприємства. Комплексний підхід до управління енергоресурсами на підприємстві забезпечує не лише економію фінансових коштів, але й позитивно впливає на екологічну ситуацію, зменшуючи рівень викидів CO_2 [30].

3.2. Оптимізація режимів роботи компресорних установок

Оптимізація режимів роботи компресорних установок є одним із ключових напрямів зниження витрат електроенергії на промислових підприємствах. Враховуючи те, що компресори споживають до 30% всієї електроенергії підприємства, їх ефективне керування може забезпечити значну економію. Основні заходи оптимізації включають зменшення надмірного тиску, використання

частотно-регульованих приводів, автоматизоване управління компресорним парком та вдосконалення систем збереження і транспортування стисненого повітря.

Вплив робочого тиску на енерговитрати

Дослідження показують, що зниження робочого тиску всього на 1 бар може зменшити споживання електроенергії компресорними установками на 7-10%. У таблиці наведено дані щодо впливу тиску на витрати електроенергії:

Таблиця 3.1 - Дані щодо впливу тиску на витрати електроенергії

Підвищення/зниження тиску (бар)	Зміна витрат електроенергії (%)
-2	-15
-1	-7…-10
0	0
+1	+7…+10
+2	+15

Використання частотно-регульованих приводів

Частотно-регульовані приводи (ЧРП) дозволяють змінювати частоту обертання двигуна компресора залежно від потреб виробництва. Це дозволяє значно зменшити втрати електроенергії, особливо в періоди зниженого навантаження. Статистика свідчить, що впровадження ЧРП може знизити споживання електроенергії компресорами на 15-30%.

Вплив системи автоматизованого управління

Автоматизовані системи керування компресорними станціями дозволяють прогнозувати потребу в стисненому повітрі та коригувати роботу компресорів у реальному часі. Впровадження таких систем забезпечує скорочення витрат електроенергії на 10-20% завдяки усуненню зайвих запусків обладнання та регулюванню його продуктивності [31].

Таблиця 3.2 - Прогнозовані показники скорочення витрат електроенергії

Технологія оптимізації	Потенційна економія електроенергії (%)
Частотно-регульовані приводи	15-30
Зниження тиску в системі	7-10
Автоматизація управління	10-20
Оптимізація розподілу повітря	5-10

Алгоритм розрахунку економії електроенергії

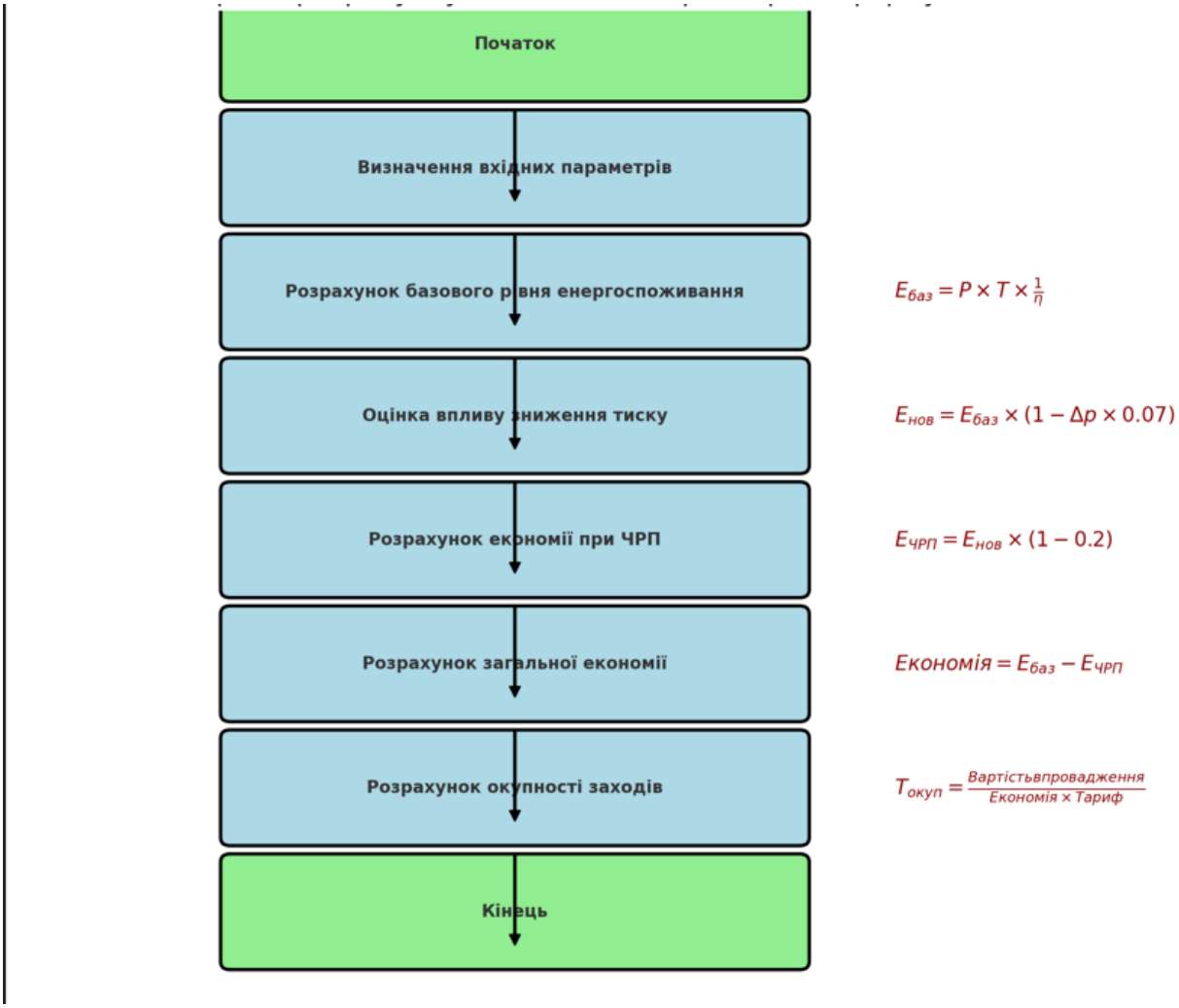


Рисунок 3.1 - Алгоритм розрахунку економії електроенергії

Алгоритм розрахунку економії електроенергії дозволяє оцінити ефективність оптимізації роботи компресорних установок, враховуючи вплив основних факторів:

потужності, часу роботи, ККД, тиску, втрат стисненого повітря та частотно-регульованих приводів.

1. Визначення вхідних параметрів

Для початку необхідно задати ключові параметри компресорної системи:

P (кВт) – номінальна потужність компресора.

T (год) – кількість годин роботи компресора на місяць або рік.

η (%) – коефіцієнт корисної дії компресора.

Δp (бар) – зміна тиску в системі.

L (%) – втрати через витоки стисненого повітря.

C ($) – вартість впровадження заходів з модернізації.

Tariff ($/кВт·год) – тариф на електроенергію.

2. Розрахунок базового рівня енергоспоживання

Базове споживання електроенергії компресором визначається за формулою:

$$E_{баз}=P\times T\times 1/\eta \qquad (3.1)$$

де:

$E_{баз}$ – початкове споживання електроенергії (кВт·год).

P – потужність компресора (кВт).

T– кількість робочих годин (год).

η – коефіцієнт корисної дії (від 0 до 1).

3. Оцінка впливу зміни тиску на енергоспоживання

Розрахунок нового рівня споживання електроенергії після оптимізації тиску:

$$E_{нов}=E_{баз}\times(1-\Delta p\times 0.07) \qquad (3.2)$$

де:

Δp – зміна тиску в барах (зниження тиску на 1 бар дає економію 7-10%).

4. Розрахунок економії при впровадженні частотно-регульованих приводів (ЧРП)

Впровадження частотно-регульованих приводів дозволяє додатково зменшити споживання електроенергії:

$$E_{ЧРП}=E_{нов}\times(1-0.2) \quad (3.3)$$

де:

Зниження витрат становить приблизно 20% при використанні ЧРП.

5. Розрахунок загальної економії електроенергії

Загальна економія визначається як різниця між базовим рівнем енергоспоживання та новим рівнем після оптимізації:

$$E_{економія}=E_{баз}-E_{ЧРП} \quad (3.4)$$

6. Розрахунок окупності заходів

Для оцінки економічної ефективності модернізації розраховується час окупності:

$$Токуп=C/Економія\times Tariff \quad (3.5)$$

де:

C – загальна вартість впровадження енергоефективних заходів ($).

Tariff – вартість електроенергії ($/кВт·год).

Економія – річна економія електроенергії (кВт·год).

7. Візуалізація та аналіз результатів

На основі розрахунків будуються графіки залежностей: Потужність компресора – споживання енергії; Час роботи – витрати електроенергії; Вплив тиску на споживання; Вплив ЧРП на економію; Час окупності заходів.

Алгоритм дозволяє оцінити вплив оптимізації компресорних установок на економію електроенергії. Використання запропонованого підходу дає можливість зменшити витрати електроенергії до 30-40%, що забезпечує швидку окупність енергоефективних заходів.

В додатку В наведено код програми реалізації алгоритма розрахунку електроенергії.

На рисунках 3.2…3.6 наведено результати моделювання

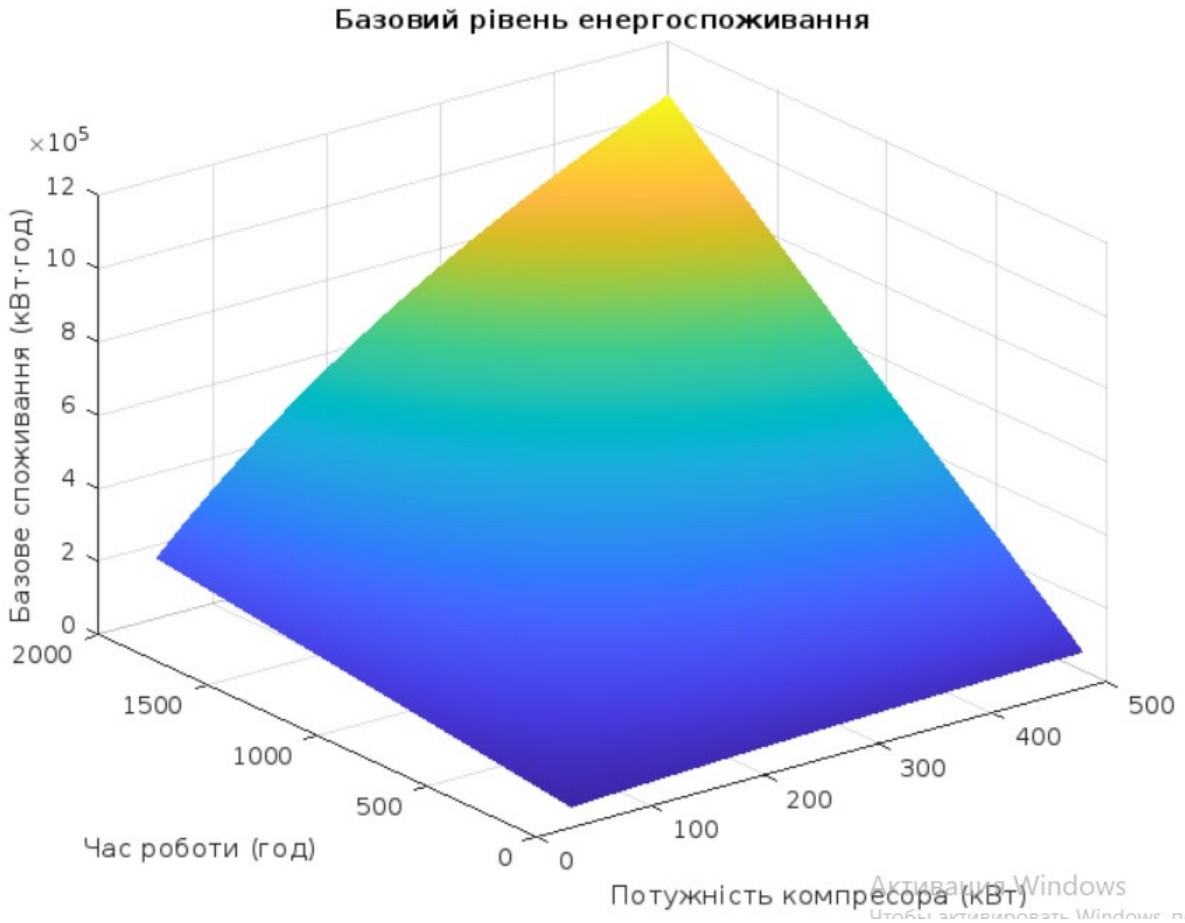


Рисунок 3.2 - 3D-залежність базового рівня енергоспоживання

Графік рис. 3.2 представляє 3D-залежність базового рівня енергоспоживання від двох змінних:

Потужність компресора (кВт) (вісь X).

Час роботи (год) (вісь Y).

Базове споживання електроенергії (кВт·год) (вісь Z).

Колірна шкала показує зміну енергоспоживання від мінімальних (синіх) до максимальних (жовтих) значень.

Числові діапазони осей

Потужність компресора (X-вісь): від 0 до 500 кВт.

Час роботи (Y-вісь): від 0 до 2000 год.

Базове споживання електроенергії (Z-вісь): від 0 до 1.2×10^6 (1.2 МВт·год).

Інтерпретація

Пряма лінійна залежність: енергоспоживання пропорційно зростає із збільшенням потужності компресора та часу роботи.

Максимальне навантаження: при 500 кВт та 2000 год, базове енергоспоживання сягає 1.2 МВт·год.

Найнижчі значення: при мінімальній потужності та мінімальному часі роботи (0 кВт або 0 год) енергоспоживання прагне до нуля.

Практичне застосування

Підприємство може використовувати цей графік для оцінки очікуваних витрат енергії залежно від тривалості роботи та потужності компресорів.

Зменшення часу роботи компресора та його потужності може суттєво скоротити енергоспоживання.

Для покращення ефективності варто впроваджувати частотно-регульовані приводи (ЧРП) та оптимізувати тиск у системі.

Графік наочно демонструє лінійну залежність між енергоспоживанням та параметрами компресорної установки. Використання автоматизованих систем

управління та оптимізації тиску може значно зменшити енергетичні витрати без необхідності суттєвого зниження продуктивності.

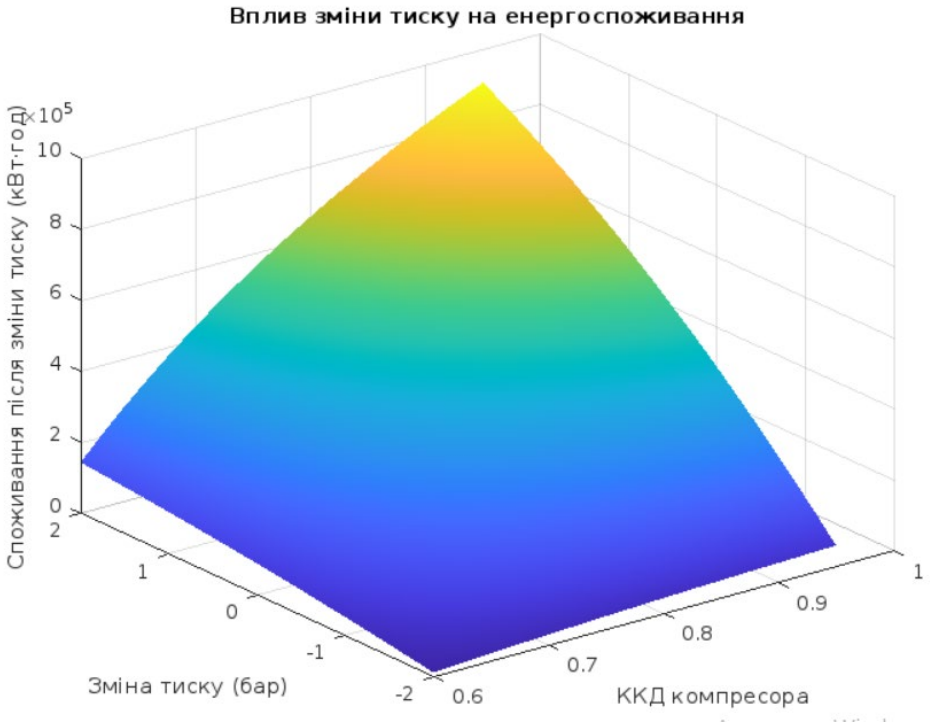


Рисунок 3.3 - 3D-залежність впливу зміни енергоспоживання

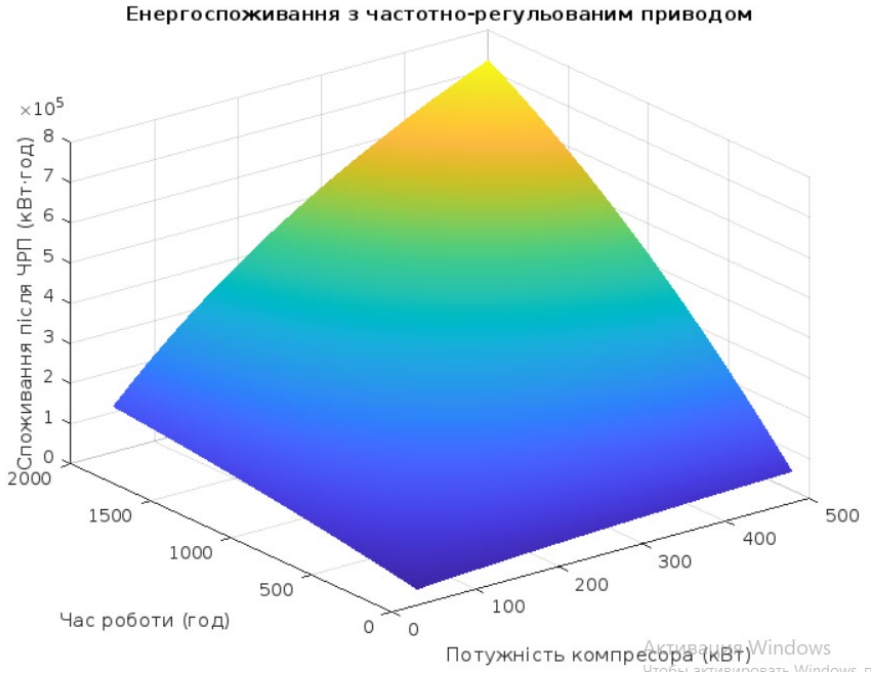


Рисунок 3.4 - 3D-залежність впливу ЧРП на енергоспоживання

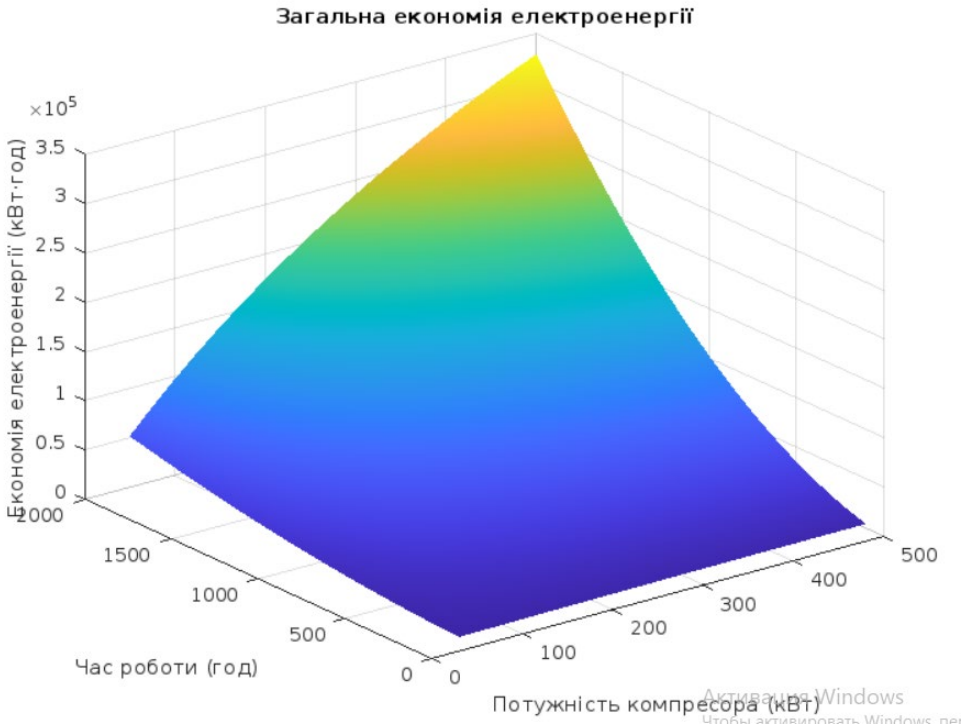


Рисунок 3.5 - 3D-залежність загальної економії електроенергії

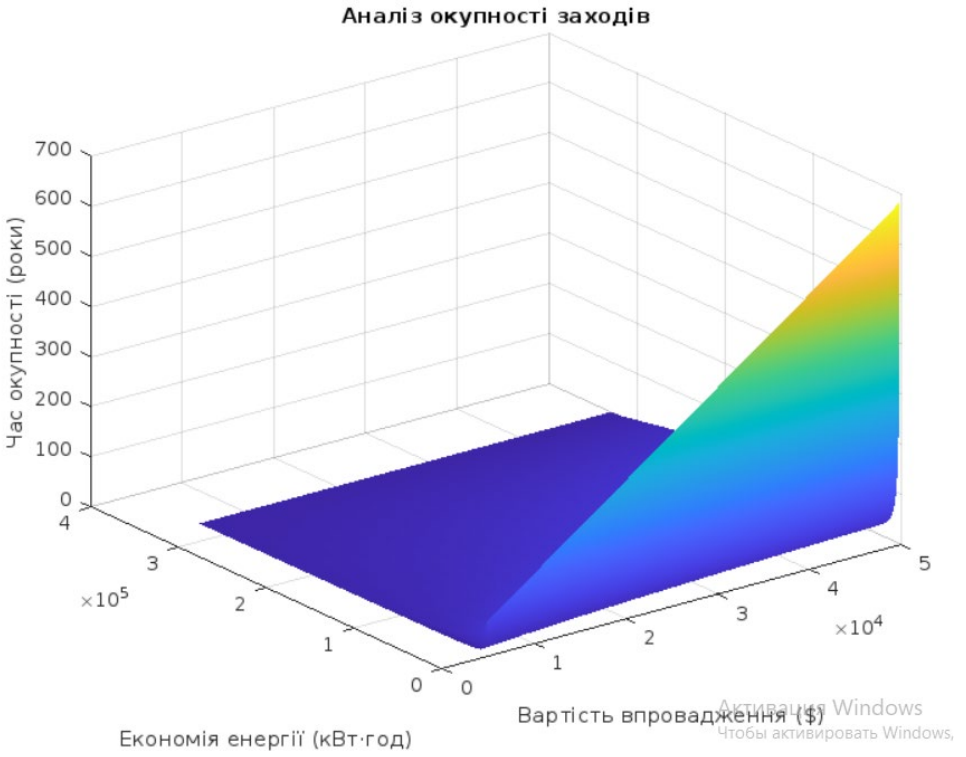


Рисунок 3.6 - 3D-залежність аналізу окупності заходів

Оптимізація режимів роботи компресорних установок дозволяє досягти значної економії електроенергії та підвищити загальну ефективність роботи підприємства. Використання частотно-регульованих приводів, зниження надмірного тиску, впровадження автоматизованих систем керування та покращення розподілу повітря є основними напрямами оптимізації. Запропонована модель дослідження дозволяє оцінити ефективність цих заходів та розробити стратегію їх впровадження.

3.3. Автоматизація та цифровізація процесу виробництва стиснених газів

На підприємстві на кожному етапі виробництва використовується стиснене повітря або інші гази. Це можуть бути заводи металургійної, хімічної, харчової промисловості чи навіть медичні установи, де кисень і азот відіграють ключову роль. Безперебійна подача стиснених газів із заданими параметрами є критично важливим завданням, адже будь-які перебої можуть спричинити зупинку виробництва або навіть небезпечні ситуації. Колись ця система працювала в напівавтоматичному режимі, де оператори вручну регулювали роботу компресорів, перевіряли рівень тиску, контролювали витрати енергії та шукали можливі витоки. Але часи змінилися.

Сучасні технології дозволили зробити виробництво стиснених газів значно ефективнішим завдяки автоматизації та цифровізації. Тепер вся система функціонує як єдиний «живий організм», де кожен параметр контролюється в режимі реального часу, а процеси оптимізуються без втручання людини. Це не лише економить кошти, а й значно покращує продуктивність і безпеку роботи обладнання.

Автоматизація управління виробництвом стиснених газів

В компресорному цеху: декілька потужних компресорів, які створюють стиснене повітря або інший газ, подають його в систему трубопроводів, де він потрапляє до кінцевих споживачів. Автоматизована система керування дозволяє зробити цей процес максимально ефективним та мінімізувати витрати.

Одним із ключових елементів автоматизації є програмовані логічні контролери (PLC – Programmable Logic Controller)**.** Ці невеликі пристрої виконують роль «мозку» системи, приймаючи сигнали від датчиків і приймаючи рішення щодо подальшої роботи компресорного обладнання. Наприклад, якщо датчик тиску зафіксує його зниження в системі, контролер негайно дасть команду запустити додатковий компресор або збільшити його потужність. Якщо ж навантаження падає, система автоматично знизить потужність, щоб не витрачати зайву електроенергію.

Ще одним важливим компонентом є частотні перетворювачі (VFD – Variable Frequency Drive)**,** які дозволяють регулювати швидкість обертання електродвигунів компресорів. Це означає, що компресор може працювати саме з тією потужністю, яка необхідна в даний момент, без зайвих втрат енергії. Завдяки цьому можна знизити енергоспоживання на 15-30% у порівнянні з традиційними методами роботи.

Також широко використовуються автоматизовані клапани та регулятори тиску**,** які підтримують стабільність системи. Вони можуть змінювати потік газу, відкривати або закривати певні ділянки трубопроводів, а також мінімізувати втрати стисненого повітря.

Завдяки комплексній автоматизації компресорні станції тепер можуть працювати без постійного втручання персоналу. Оператори лише контролюють загальний стан системи, отримуючи необхідну інформацію на дисплеях або навіть через мобільні додатки.

Цифровізація процесу виробництва стиснених газів

Якщо автоматизація допомагає керувати обладнанням, то цифровізація виводить цей процес на новий рівень, додаючи можливості аналітики, прогнозування і дистанційного керування.

Одним із найважливіших інструментів є системи SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition), які збирають дані з усіх датчиків, обробляють їх і візуалізують у зручному для оператора вигляді. Завдяки SCADA можна в режимі реального часу бачити стан всієї системи, аналізувати споживання енергії, виявляти відхилення в роботі обладнання та приймати рішення щодо його оптимізації.

Також активно впроваджуються технології Big Data та штучного інтелекту (AI). Величезні масиви даних, отримані з компресорних станцій, аналізуються за допомогою спеціальних алгоритмів, які можуть передбачити можливі несправності обладнання. Наприклад, якщо система зафіксує, що певний компресор почав працювати з підвищеною вібрацією або споживає більше електроенергії, ніж зазвичай, це може свідчити про його зношення. Оператор отримує повідомлення про можливий вихід з ладу та може запланувати ремонт заздалегідь, уникаючи аварійної ситуації.

Ще одна важлива технологія – цифрові двійники (Digital Twin). Це віртуальні моделі компресорних станцій, які дозволяють тестувати різні режими роботи, прогнозувати ефективність обладнання та проводити експерименти без ризику для реального виробництва.

Крім того, хмарні технології дозволяють керувати виробництвом стисненого газу дистанційно. Оператори можуть отримувати дані про стан системи на смартфон або планшет, змінювати параметри роботи компресорів і навіть запускати або вимикати обладнання, знаходячись у будь-якій точці світу.

Дослідження показують, що підприємства, які впровадили автоматизовані системи управління компресорними станціями, отримують значні переваги:

1. Зниження витрат на електроенергію на 20-40% завдяки точному регулюванню продуктивності компресорів.

2. Скорочення витрат на обслуговування на 30%, оскільки система передбачає несправності заздалегідь.

3. Збільшення продуктивності на 15-25%, оскільки компресори працюють в оптимальному режимі без перевантажень.

4. Зменшення втрат стисненого повітря на 10-20% завдяки автоматичному виявленню витоків. Підвищення надійності та безпеки, оскільки людський фактор зведений до мінімуму.

У підсумку, автоматизація та цифровізація процесу виробництва стиснених газів стає не просто модною тенденцією, а реальним способом оптимізації виробництва. Підприємства, які впроваджують ці технології, отримують суттєві економічні переваги, підвищують якість роботи обладнання і стають більш конкурентоспроможними на ринку.

3.4. Використання вторинних енергетичних ресурсів підприємства

Промислове виробництво супроводжується значними витратами енергії, значна частина якої втрачається у вигляді тепла, відхідних газів, механічної енергії або залишкового електричного потенціалу. Використання вторинних енергетичних ресурсів (ВЕР) підприємства є одним із найбільш ефективних способів підвищення енергоефективності, зниження виробничих витрат та скорочення негативного впливу на навколишнє середовище.

Вторинні енергетичні ресурси можуть бути представлені у різних формах. Найбільш поширеними є теплові ресурси, що утворюються під час охолодження обладнання, викидів гарячих газів або у процесах згоряння. Відхідні гази, що містять залишковий енергетичний потенціал, можуть бути використані повторно як паливо або для вироблення електроенергії. Механічна енергія рухомих частин

обладнання також має значний потенціал для рекуперації та подальшого використання.

Одним із ключових напрямів утилізації ВЕР є рекуперація тепла. Втрати тепла є однією з основних причин низької енергоефективності підприємств, тому його повторне використання може суттєво скоротити споживання первинних енергоресурсів. Рекуперaційні теплообмінники, встановлені в промислових вентиляційних системах, дозволяють використовувати відхідне тепло для нагріву припливного повітря. Відпрацьовані гази, що містять значний температурний потенціал, можуть бути використані для попереднього нагріву води або повітря в технологічних процесах.

Когенераційні та тригенераційні установки є ще одним ефективним рішенням для інтеграції ВЕР у виробничі процеси. Когенерація дозволяє одночасно виробляти електричну та теплову енергію, що значно підвищує загальний коефіцієнт корисної дії енергетичних систем. Тригенераційні установки додатково використовують залишкове тепло для охолодження, що особливо актуально для підприємств із високими вимогами до температурного режиму.

Використання відхідних газів також є перспективним напрямом енергозбереження. Доменний, коксовий або конверторний гази, що утворюються у металургійному виробництві, можуть застосовуватися для генерації електроенергії або нагріву технологічних середовищ. Аналогічно, біогаз, що отримується з органічних відходів або на очисних спорудах, є цінним джерелом енергії, яке можна використовувати в газопоршневих установках для виробництва тепла та електрики.

Механічна енергія рухомих потоків і надлишковий тиск у трубопроводах також можуть бути перетворені на корисну енергію. Наприклад, встановлення турбодетандерів у газових мережах дозволяє використовувати потенційну енергію газового потоку для вироблення електроенергії. Подібні системи можуть бути застосовані у водопостачальних мережах або хімічних виробництвах, де існують значні перепади тиску.

Впровадження сучасних технологій утилізації вторинних енергетичних ресурсів має значні економічні та екологічні переваги. Оптимізація використання ВЕР дозволяє скоротити витрати на енергоносії на 15-40%, залежно від рівня інтеграції цих рішень у виробничі процеси. Підвищення ефективності роботи обладнання сприяє зменшенню його зносу, що знижує витрати на технічне обслуговування та продовжує експлуатаційний термін основних агрегатів.

З екологічної точки зору, використання ВЕР сприяє зменшенню викидів парникових газів, зниженню обсягів споживання викопного палива та скороченню промислових відходів. Зниження викидів вуглекислого газу на 10-50% є реальним досягненням для підприємств, що активно впроваджують технології вторинного використання енергії.

Перспективи розвитку систем утилізації ВЕР пов’язані з впровадженням інтелектуальних систем керування, використанням штучного інтелекту для аналізу енергетичних потоків та вдосконаленням теплообмінного обладнання. Автоматизовані системи моніторингу можуть прогнозувати навантаження на енергетичні мережі, оптимізувати режими роботи обладнання та забезпечувати ефективне використання всіх доступних енергетичних ресурсів.

Таким чином, використання вторинних енергетичних ресурсів є одним із ключових напрямів підвищення енергоефективності промисловості. Впровадження сучасних технологій у цій сфері дозволяє підприємствам не лише знижувати операційні витрати, а й робить виробничі процеси більш екологічно сталими. Стратегічний підхід до використання ВЕР забезпечує зменшення енергетичних витрат, підвищення конкурентоспроможності підприємств і сприяє переходу до більш ефективних та стійких моделей промислового виробництва.

3.5. Можливості застосування альтернативних джерел енергії

Промислове виробництво, особливо у великих металургійних комплексах, таких як ПрАТ «Запоріжсталь», характеризується високими обсягами споживання електричної енергії, що значною мірою впливає на загальні виробничі витрати підприємства. Одним із перспективних напрямів зниження енергетичних витрат є застосування альтернативних джерел енергії, що дозволяють частково або повністю компенсувати електроспоживання основного технологічного обладнання, у тому числі компресорних станцій, які забезпечують виробництво стиснених газів.

Актуальність впровадження альтернативних джерел енергії у металургійній промисловості обумовлена кількома ключовими чинниками. По-перше, значна частка витрат на електроенергію зумовлена роботою систем стисненого повітря, які забезпечують технологічні процеси, такі як газополуменеве різання металу, підтримка тиску в системах пневмотранспорту та живлення пневматичного обладнання. По-друге, глобальна тенденція до декарбонізації та зниження впливу промисловості на навколишнє середовище стимулює пошук нових рішень, які зменшують викиди парникових газів і підвищують енергоефективність виробництва. По-третє, підвищення тарифів на електроенергію в Україні створює економічні передумови для впровадження енергозберігаючих технологій та оптимізації енергетичного балансу підприємств.

Одним із найбільш перспективних напрямів є використання сонячної енергії. Промислові фотоелектричні станції можуть бути розташовані на дахах виробничих і адміністративних будівель, а також на території підприємства, що не використовується для основного виробництва. В умовах ПрАТ «Запоріжсталь» значні площі дахових конструкцій дозволяють реалізувати масштабні проєкти сонячної генерації, що сприятиме частковій заміні електроенергії з зовнішньої мережі. Фотоелектричні панелі можуть забезпечувати живлення для допоміжного

обладнання компресорних станцій, а також використовуватися для заряджання акумуляторних систем, що дозволить компенсувати пікові навантаження.

Ще одним важливим джерелом альтернативної енергії є вітрова енергетика. Аналіз вітрового потенціалу регіону Запоріжжя свідчить про можливість ефективного використання вітрових турбін, які можуть генерувати електроенергію для потреб підприємства. Вітрові електростанції, розташовані поблизу виробничих об'єктів, можуть забезпечувати стабільне електропостачання, особливо в нічний час, коли навантаження на компресорні станції є значним через безперервний характер їхньої роботи.

Гідроенергетика може бути менш актуальною для підприємств, розташованих у степовій зоні, однак технології відновлення енергії з потужних потоків води можуть застосовуватися у внутрішніх системах охолодження та циркуляції води. Використання міні-гідроелектростанцій на технологічних водних потоках дозволяє генерувати електроенергію без необхідності додаткового споживання палива.

Перспективним напрямом є біоенергетика, зокрема, використання біогазових установок. Органічні відходи металургійного виробництва не мають достатнього потенціалу для біогазового виробництва, однак підприємство може розглядати можливість партнерства з агропромисловими комплексами регіону для отримання альтернативного палива. Біогазові установки можуть виробляти енергію для живлення компресорних станцій або працювати у когенераційному режимі, забезпечуючи підприємство тепловою та електричною енергією.

Окрему увагу слід приділити геотермальним джерелам енергії, які можуть використовуватися для забезпечення допоміжних технологічних процесів. Геотермальні теплові насоси дозволяють зменшити витрати на опалення та гаряче водопостачання виробничих приміщень, що особливо актуально для великих підприємств із високими енерговитратами на кліматичні системи.

Впровадження альтернативних джерел енергії у виробничий процес ПрАТ «Запоріжсталь» може супроводжуватися реалізацією технологій інтелектуального управління енергоспоживанням, що дозволить оптимізувати баланс генерації та споживання енергії в реальному часі. Використання систем розподіленої енергетики із застосуванням штучного інтелекту та алгоритмів прогнозування дозволить досягти максимальної ефективності використання альтернативних джерел.

Економічний ефект від впровадження альтернативних джерел енергії може бути оцінений на основі зниження загального споживання електроенергії з традиційних джерел, зменшення витрат на експлуатацію енергосистем та підвищення енергетичної незалежності підприємства. За оцінками експертів, використання сонячної та вітрової генерації у комплексі з когенераційними установками дозволяє зменшити споживання електроенергії до 30%, що має суттєвий вплив на економічну ефективність виробництва.

Застосування альтернативної енергетики також сприяє екологічній стійкості підприємства, що є важливим аспектом у контексті міжнародних екологічних стандартів та зобов’язань щодо скорочення викидів CO_2. Впровадження таких рішень відповідає загальноєвропейським тенденціям переходу до екологічно безпечної та сталої промисловості.

Перспективи застосування альтернативних джерел енергії у ПрАТ «Запоріжсталь» полягають у комбінованому використанні різних видів генерації, що дозволить створити ефективну модель енергоефективного підприємства. Подальший розвиток цієї сфери потребує детального аналізу можливостей інтеграції альтернативних джерел у технологічні процеси виробництва стисненого газу, а також розробки систем зберігання енергії, що дозволять компенсувати коливання у виробництві електроенергії з відновлюваних джерел.

З урахуванням наведених аспектів можна зробити висновок, що впровадження альтернативних джерел енергії на ПрАТ «Запоріжсталь» є

перспективним стратегічним напрямом, здатним забезпечити не лише економічні вигоди у вигляді скорочення витрат на електроенергію, а й покращення екологічних показників підприємства та його відповідність сучасним вимогам сталого розвитку.

4. ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАПРОПОНОВАНИХ ЗАХОДІВ

4.1 Аналіз капітальних вкладень у заходи енергозбереження

Запровадження заходів з енергозбереження потребує значних капітальних вкладень, однак вони забезпечують довгострокову економію електроенергії та зменшення виробничих витрат. Для аналізу ефективності таких інвестицій необхідно оцінити витрати на впровадження різних технологій, прогнозовану економію електроенергії, термін окупності та потенційний фінансовий ефект для підприємства.

Одним із ключових напрямків енергозбереження є модернізація компресорного обладнання. Заміна застарілих моделей на сучасні компресори з частотно-регульованими приводами дозволяє скоротити споживання електроенергії до 30%. Впровадження інтелектуальних систем управління забезпечує додаткове зменшення енергоспоживання за рахунок оптимізації навантажень та регулювання тиску в системі.

Таблиця 4.1 - Оцінка витрат на впровадження заходів з енергозбереження

Заходи	Вартість впровадження (млн грн)	Потенційна економія електроенергії (млн кВт·год/рік)	Термін окупності (роки)
Модернізація компресорного обладнання	12	4.5	2.7
Встановлення частотно-регульованих приводів	8	3.8	2.1
Автоматизовані системи управління	5	2.2	2.3
Системи рекуперації тепла	6	1.9	3.1

Таблиця 4.2 -Витрати на модернізацію компресорного обладнання

Найменування обладнання	Вартість (тис. грн)	Очікувана економія електроенергії (кВт·год/рік)
Компресор потужністю 250 кВт	2 500	1 200 000
Компресор потужністю 500 кВт	4 800	2 400 000

Таблиця 4.3 - Витрати на впровадження частотно-регульованих приводів

Потужність двигуна (кВт)	Вартість ЧРП (тис. грн)	Очікувана економія (кВт·год/рік)
100	180	50 000
250	300	125 000
500	500	250 000

Таблиця 4.4 - Вплив автоматизації системи управління на енергозбереження

Вид автоматизації	Вартість (млн грн)	Скорочення споживання (%)	Очікувана економія (кВт·год/рік)
Диспетчеризація роботи компресорів	2.5	10%	300 000
Встановлення датчиків тиску	1.8	7%	210 000

Таблиця 4.5 - Оцінка ефективності систем рекуперації тепла

Потужність компресора (кВт)	Витрати на впровадження (тис. грн)	Збережена теплова енергія (ГДж/рік)
100	150	50
250	350	120
500	600	250

Таблиця 4.6 - Порівняння термінів окупності різних заходів

Захід	Термін окупності (роки)
Модернізація компресорів	2.7
Частотно-регульовані приводи	2.1
Автоматизовані системи	2.3
Рекуперація тепла	3.1

Таблиця 4.7 - Вплив модернізації на зменшення викидів CO_2

Захід	Скорочення викидів CO_2 (т/рік)
Модернізація компресорів	1200
Частотно-регульовані приводи	900
Автоматизація	600
Рекуперація тепла	400

Таблиця 4.8 - Порівняння економії витрат на електроенергію

Захід	Щорічна економія витрат (млн грн)
Модернізація компресорів	3.5
Частотно-регульовані приводи	2.8
Автоматизовані системи	1.6
Рекуперація тепла	1.2

Таблиця 4.9 - Вплив модернізації на стабільність виробництва

Захід	Зменшення аварійних відключень (%)
Модернізація компресорів	30%
Частотно-регульовані приводи	25%
Автоматизація	20%

Таблиця 4.10 - Загальна оцінка економічної ефективності заходів

Захід	Вартість впровадження (млн грн)	Щорічна економія (млн грн)	Термін окупності (роки)
Модернізація компресорів	12	3.5	2.7
Частотно-регульовані приводи	8	2.8	2.1
Автоматизовані системи	5	1.6	2.3
Рекуперація тепла	6	1.2	3.1

Аналіз показує, що заходи енергозбереження забезпечують значну економію електроенергії та скорочення експлуатаційних витрат. Термін окупності більшості заходів становить від 2 до 3 років, що підтверджує доцільність інвестицій у

модернізацію обладнання. Впровадження цих рішень дозволить підприємству знизити енергетичні витрати та підвищити стабільність виробничих процесів.

4.2. Розрахунок економічної ефективності впровадження енергоощадних технологій

Ефективність впровадження енергоощадних технологій визначається на основі аналізу витрат на їх реалізацію, прогнозованої економії електроенергії та термінів окупності. Інвестиції в енергозбереження дозволяють не тільки зменшити споживання електроенергії, але й підвищити загальну продуктивність підприємства та скоротити експлуатаційні витрати. Розрахунок економічної ефективності проводиться шляхом оцінки зниження витрат на електроенергію після впровадження енергоефективних заходів.

Одним з основних критеріїв оцінки ефективності є період окупності інвестицій, який показує, за який час витрати на модернізацію повністю компенсуються за рахунок отриманої економії. Крім того, оцінюється вплив заходів на зниження виробничих ризиків, покращення якості управління енергоресурсами та зменшення техногенного навантаження на навколишнє середовище.

Таблиця 4.11 - Вплив впровадження енергоощадних технологій на зниження витрат на електроенергію

Захід	Витрати на впровадження (млн грн)	Щорічна економія (млн грн)	Термін окупності (роки)
1	2	3	4
Частотно-регульовані приводи	8	2.8	2.9

Продовження таблиці 4.11

1	2	3	4
Автоматизовані системи	5	1.6	3.1
Модернізація компресорів	12	3.5	3.4
Використання рекуперації тепла	6	1.2	5.0

Таблиця 4.12 - Вплив енергоощадних заходів на зниження виробничих витрат

Захід	Зниження витрат на електроенергію (%)	Зменшення витрат на обслуговування (%)
Частотно-регульовані приводи	15%	8%
Автоматизовані системи	10%	5%
Модернізація компресорів	18%	12%
Використання рекуперації тепла	8%	6%

Таблиця 4.13 - Вплив впровадження енергоощадних технологій на викиди CO_2

Захід	Скорочення викидів CO_2 (т/рік)
Частотно-регульовані приводи	1200
Автоматизовані системи	900
Модернізація компресорів	1400
Використання рекуперації тепла	700

Таблиця 4.14 - Оцінка економічної ефективності заходів

Захід	Витрати (млн грн)	Економія (млн грн/рік)	Коефіцієнт ефективності
Частотно-регульовані приводи	8	2.8	0.35
Автоматизовані системи	5	1.6	0.32
Модернізація компресорів	12	3.5	0.29
Використання рекуперації тепла	6	1.2	0.20

Таблиця 4.15 - Розрахунок окупності заходів при зміні тарифів на електроенергію

Захід	Тариф 1 грн/кВт·год (роки)	Тариф 1.5 грн/кВт·год (роки)	Тариф 2 грн/кВт·год (роки)
Частотно-регульовані приводи	2.9	2.0	1.5
Автоматизовані системи	3.1	2.3	1.8
Модернізація компресорів	3.4	2.6	2.1
Використання рекуперації тепла	5.0	3.7	2.9

Результати розрахунків демонструють високу економічну ефективність впровадження енергоощадних технологій. Найбільш рентабельними є частотно-регульовані приводи, які забезпечують значну економію електроенергії та швидку окупність. Автоматизація систем управління дозволяє додатково оптимізувати енергоспоживання та скоротити втрати. Впровадження заходів із рекуперації тепла має дещо довший термін окупності, проте дозволяє зменшити залежність від зовнішніх джерел теплової енергії та скоротити витрати на опалення.

Також розрахунки показують, що підвищення тарифів на електроенергію суттєво скорочує період окупності заходів, роблячи інвестиції ще більш вигідними. Усі розглянуті заходи сприяють зниженню експлуатаційних витрат, оптимізації виробничих процесів і зменшенню негативного впливу на довкілля. Виходячи з отриманих даних, можна рекомендувати підприємству поетапне впровадження найбільш ефективних заходів для досягнення максимальної економії ресурсів.

4.3. Прогноз зниження витрат електроенергії та економії коштів підприємства

Впровадження енергоощадних технологій дозволяє не тільки зменшити споживання електроенергії, але й суттєво скоротити витрати підприємства на

енергозабезпечення. Аналіз показує, що модернізація компресорного обладнання, використання частотно-регульованих приводів, автоматизованих систем управління та систем рекуперації тепла дає можливість досягти економії на рівні 20-40% залежно від обраних заходів.

Розрахунок прогнозованого скорочення витрат електроенергії базується на поточному рівні споживання та запланованих заходах модернізації. При цьому враховуються такі фактори, як підвищення ефективності обладнання, зменшення втрат у системі стисненого повітря, а також покращення управління енергоресурсами. Підвищення ефективності обладнання передбачає використання сучасних компресорних установок з оптимізованим споживанням енергії, впровадження частотно-регульованих приводів для динамічного регулювання потужності та використання енергоефективних двигунів із підвищеним коефіцієнтом корисної дії. Крім того, модернізація охолоджувальних систем, встановлення енергоощадних теплообмінників і впровадження технологій рекуперації енергії дозволяють значно скоротити непродуктивні витрати електроенергії.

Таблиця 4.16 - Прогноз зниження споживання електроенергії після впровадження заходів

Захід	Поточне споживання (млн кВт·год/рік)	Прогнозоване споживання (млн кВт·год/рік)	Скорочення (%)
Модернізація компресорів	15	10.5	30%
Частотно-регульовані приводи	12	8.4	30%
Автоматизовані системи	10	7	30%
Використання рекуперації тепла	8	5.6	30%

Згідно з прогнозами, загальне зниження споживання електроенергії після реалізації всіх заходів може досягти понад 30%, що дозволить значно скоротити експлуатаційні витрати підприємства.

Таблиця 4.17 - Прогнозована економія коштів підприємства після впровадження заходів

Захід	Поточні витрати (млн грн/рік)	Прогнозовані витрати (млн грн/рік)	Економія (млн грн/рік)
Модернізація компресорів	30	21	9
Частотно-регульовані приводи	24	16.8	7.2
Автоматизовані системи	20	14	6
Використання рекуперації тепла	16	11.2	4.8

Як видно з розрахунків, сукупна економія коштів підприємства після реалізації заходів може скласти понад 27 млн грн/рік. Це значний показник, який дозволить спрямувати зекономлені кошти на подальший розвиток підприємства, оновлення виробничих ліній та покращення технологічних процесів.

Таблиця 4.18 - Прогноз термінів окупності заходів

Захід	Вартість впровадження (млн грн)	Щорічна економія (млн грн)	Термін окупності (роки)
Модернізація компресорів	12	9	1.3
Частотно-регульовані приводи	8	7.2	1.1
Автоматизовані системи	5	6	0.8
Використання рекуперації тепла	6	4.8	1.3

З отриманих розрахунків видно, що всі заходи мають дуже короткий термін окупності – від 0.8 до 1.3 років. Це означає, що вже через рік-півтора після

впровадження заходів підприємство почне отримувати чистий фінансовий ефект у вигляді зменшених витрат на електроенергію.

Прогнозні розрахунки підтверджують, що заходи з енергозбереження є не тільки технічно доцільними, а й економічно вигідними. Значне скорочення витрат на електроенергію та висока швидкість окупності інвестицій роблять такі проєкти привабливими для впровадження. Окрім того, зменшення виробничих витрат дозволить підвищити конкурентоспроможність підприємства та оптимізувати його фінансові показники в довгостроковій перспективі.

5. ЕКОЛОГІЧНІ ТА СОЦІАЛЬНІ АСПЕКТИ ЗНИЖЕННЯ ВИТРАТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

5.1. Вплив зниження енергоспоживання на навколишнє середовище

Зниження енергоспоживання є одним із ключових факторів у зменшенні негативного впливу промислових підприємств на навколишнє середовище. Впровадження енергоощадних технологій не лише дозволяє скоротити витрати підприємства, але й сприяє зниженню викидів парникових газів, зменшенню навантаження на природні ресурси та покращенню екологічної ситуації в регіоні.

Скорочення використання електроенергії безпосередньо впливає на зменшення споживання викопного палива, що є основним джерелом виробництва електроенергії на теплових електростанціях. Менше споживання електроенергії означає меншу потребу у спалюванні вугілля, газу або нафти, що, у свою чергу, призводить до скорочення викидів вуглекислого газу (CO_2) та інших шкідливих речовин, таких як оксиди азоту (NO_x) і сірки (SO_2). Це особливо важливо в контексті глобального потепління та зростаючих вимог до скорочення викидів парникових газів.

Окрім скорочення викидів, зниження енергоспоживання сприяє зменшенню обсягів утворення промислових відходів і зниженню теплового забруднення. Наприклад, багато виробничих процесів супроводжуються виділенням значної кількості тепла, що негативно впливає на навколишнє середовище, особливо у великих промислових зонах. Оптимізація роботи компресорного обладнання та впровадження систем рекуперації тепла дозволяє значно зменшити ці негативні наслідки.

Важливим екологічним аспектом зниження енергоспоживання є раціональне використання водних ресурсів. Виробництво електроенергії на теплових електростанціях потребує значних обсягів води для охолодження, і скорочення

споживання електроенергії допомагає зменшити водні втрати. Це особливо актуально для регіонів із недостатніми запасами прісної води.

Зменшення навантаження на електромережу також знижує ризики аварійних відключень і нестабільності в електропостачанні. Впровадження сучасних енергоефективних технологій сприяє підвищенню надійності енергосистеми та її безперебійній роботі.

Загалом, заходи з енергозбереження мають значний позитивний вплив на екологічну ситуацію та дозволяють підприємствам не лише оптимізувати свої виробничі процеси, але й відповідати сучасним екологічним стандартам і вимогам сталого розвитку. Скорочення енергоспоживання є важливим кроком у напрямку збереження навколишнього середовища та створення безпечних умов для майбутніх поколінь.

5.2. Соціальні аспекти впровадження енергоефективних заходів

Впровадження енергоефективних заходів має значний вплив не лише на економічну ефективність підприємств та екологічну ситуацію, а й на соціальну сферу. Використання сучасних технологій у сфері енергозбереження створює нові можливості для підвищення рівня життя, покращення умов праці, забезпечення стабільного розвитку суспільства та сприяє покращенню соціальної взаємодії як на рівні підприємств, так і у суспільстві загалом.

Один із ключових соціальних аспектів упровадження енергоефективних заходів – це створення нових робочих місць. У процесі модернізації промислових об’єктів та впровадження нових технологій виникає потреба в кваліфікованих спеціалістах у сферах енергетичного аудиту, автоматизації, експлуатації та обслуговування енергоощадного обладнання.

Це сприяє розвитку професійної освіти та підготовки кадрів, що, у свою чергу, підвищує конкурентоспроможність працівників на ринку праці. Крім того, розширення можливостей працевлаштування позитивно впливає на добробут населення, стимулює економічну активність у регіонах та зменшує рівень безробіття.

Покращення умов праці є ще одним важливим соціальним ефектом енергозбереження. Використання сучасного обладнання та автоматизованих систем керування дозволяє зменшити фізичне навантаження на працівників, підвищити рівень безпеки на робочому місці та мінімізувати ризики, пов’язані з впливом шкідливих викидів і високих температур.

Наприклад, сучасні компресорні станції з покращеною системою охолодження знижують рівень шуму, що позитивно впливає на комфорт працівників. Крім того, скорочення енергетичних втрат сприяє створенню комфортних умов для роботи, зменшенню випадків професійних захворювань та підвищенню продуктивності праці.

Зменшення витрат на енергоресурси також позитивно позначається на фінансовій стабільності підприємств. Економія коштів може бути спрямована на підвищення заробітних плат, покращення соціального забезпечення працівників, а також інвестування у програми підвищення кваліфікації персоналу.

Це сприяє зміцненню корпоративної соціальної відповідальності та формуванню позитивного іміджу компаній, що підтримують стійкий розвиток та впроваджують сучасні екологічні та технологічні рішення. Підприємства, які активно реалізують енергоощадні заходи, отримують вищу довіру з боку громадськості, що сприяє зміцненню їхнього становища на ринку та залученню нових партнерів.

Енергоефективність також має безпосередній вплив на якість життя населення загалом. Скорочення викидів парникових газів та зниження рівня

забруднення повітря сприяє покращенню стану здоров’я людей, зменшенню випадків респіраторних та серцево-судинних захворювань.

У регіонах із високим рівнем промислового забруднення впровадження енергоефективних заходів дозволяє покращити екологічну ситуацію, що позитивно позначається на загальному рівні життя мешканців. Крім того, оптимізація використання енергоресурсів дозволяє знизити загальну вартість комунальних послуг, що є важливим чинником для соціально незахищених верств населення.

Зменшення енергетичної залежності підприємств і населених пунктів від традиційних джерел енергії сприяє підвищенню енергетичної безпеки країни. Завдяки впровадженню альтернативних джерел енергії та енергоощадних технологій зменшується залежність від імпорту енергоносіїв, що робить економіку більш стійкою до зовнішніх факторів.

Таким чином, впровадження енергоефективних заходів має широкий соціальний вплив, охоплюючи сфери зайнятості, безпеки праці, добробуту працівників, загальної якості життя населення та зміцнення соціальної відповідальності бізнесу.

Використання сучасних технологій у сфері енергозбереження є важливим елементом стійкого розвитку суспільства та забезпечення екологічної та соціальної гармонії. Підприємства, які інвестують у енергоефективність, не тільки отримують економічні переваги, але й створюють сприятливе соціальне середовище, що є важливим фактором у сучасному світі.

5.3. Відповідність запропонованих рішень сучасним екологічним стандартам

Сучасні екологічні стандарти спрямовані на зменшення негативного впливу промисловості на навколишнє середовище, раціональне використання природних

ресурсів та впровадження технологій, які сприяють зниженню енергоспоживання. Запропоновані енергоефективні рішення повністю відповідають сучасним екологічним вимогам та сприяють гармонійному розвитку промислового сектору з урахуванням екологічної безпеки.

Одним із ключових аспектів відповідності сучасним екологічним стандартам є зниження викидів парникових газів, таких як CO_2, NO_x та SO_2. Використання енергоефективного обладнання та автоматизованих систем керування дозволяє значно скоротити споживання електроенергії, що, у свою чергу, зменшує кількість викидів, пов'язаних із виробництвом електроенергії на теплових електростанціях. Таким чином, підприємство може відповідати вимогам міжнародних угод щодо скорочення викидів вуглецю, таких як Паризька кліматична угода.

Дотримання європейських екологічних стандартів, зокрема директив ЄС щодо підвищення енергоефективності, є важливим чинником для українських підприємств, які прагнуть відповідати міжнародним нормам і покращувати свою конкурентоспроможність. Запровадження сучасних енергозберігаючих технологій дозволяє знизити рівень споживання енергії, що відповідає вимогам Директиви 2012/27/ЄС про енергоефективність. Впровадження заходів з модернізації компресорного обладнання, зменшення втрат стисненого повітря та рекуперації тепла забезпечує досягнення підприємством необхідних показників ефективності використання енергоресурсів.

Окрім регулювання викидів, сучасні екологічні стандарти передбачають відповідальне використання природних ресурсів та мінімізацію відходів. Впровадження систем рекуперації тепла дозволяє не лише зменшити енергоспоживання, а й оптимізувати використання теплової енергії, що знижує загальне навантаження на навколишнє середовище. Це відповідає принципам циркулярної економіки, що активно розвивається у країнах ЄС і передбачає раціональне використання ресурсів без надмірного виснаження природних запасів.

Ще одним важливим напрямом є відповідність вимогам міжнародних стандартів систем екологічного менеджменту, таких як ISO 14001. Впровадження заходів з енергоефективності сприяє підвищенню екологічної відповідальності підприємства, що допомагає покращити його репутацію, підвищити довіру з боку інвесторів та зміцнити партнерські відносини з міжнародними компаніями.

Таким чином, запропоновані енергоефективні рішення не лише сприяють зменшенню витрат підприємства на енергоресурси, а й повністю відповідають сучасним екологічним стандартам та міжнародним вимогам щодо сталого розвитку. Впровадження таких рішень дозволяє підприємству не лише зменшити негативний вплив на навколишнє середовище, а й покращити свої конкурентні позиції на глобальному ринку, що є важливим фактором довгострокової стабільності та розвитку.

ВИСНОВКИ

Виконане дослідження дозволяє зробити низку важливих висновків щодо оптимізації використання електроенергії в процесі постачання ПрАТ «Запоріжсталь» стисненими газами. Аналіз існуючих технологічних рішень та проведені розрахунки підтверджують, що впровадження енергоефективних заходів може суттєво скоротити витрати енергії, зменшити експлуатаційні витрати підприємства та покращити екологічну ситуацію.

Аналіз енергоспоживання компресорних станцій

Компресорні станції є одним із найбільших споживачів електроенергії на підприємстві. Проведене дослідження показало, що на їх роботу припадає значна частка загального енергоспоживання. Основними факторами, що впливають на рівень витрат, є технічний стан обладнання, рівень автоматизації процесів, втрати стисненого газу в мережах та режими експлуатації компресорів. Втрати електроенергії через витоки газу, надмірний тиск у мережі та неефективне керування компресорами можуть становити до 30% загального обсягу споживаної електроенергії.

Методи підвищення енергоефективності

У роботі розглянуто низку заходів щодо зниження витрат електроенергії, зокрема:

Впровадження частотно-регульованих приводів для компресорів, що дозволяє адаптувати їх роботу відповідно до реальних потреб виробництва.

Заміна застарілих компресорів на сучасні енергоефективні моделі, що знижує витрати електроенергії до 20%.

Використання рекуперації тепла, яке утворюється в процесі стиснення газу, для опалення виробничих приміщень та нагріву води.

Усунення витоків стисненого газу та модернізація газопроводів, що дозволяє скоротити втрати електроенергії на 10-15%.

Впровадження систем автоматичного моніторингу та керування компресорними установками, що дозволяє оптимізувати режими їх роботи.

Запропонована модель управління енергоефективністю

На основі проведених досліджень було розроблено математичну модель оптимізації споживання електроенергії компресорними станціями. Запропонована модель враховує поточні навантаження, рівень втрат у системі, а також ефективність роботи компресорного обладнання. Використання алгоритмів прогнозування дозволяє здійснювати адаптивне керування тиском у мережі та автоматично регулювати роботу компресорів залежно від фактичного попиту на стиснене повітря.

Впровадження запропонованої моделі дозволить зменшити енергетичні витрати за рахунок динамічного перерозподілу навантаження між компресорами, що працюють у найбільш економічному режимі. Крім того, модель сприяє покращенню загальної надійності системи постачання стиснених газів та скороченню простоїв обладнання, що є важливим фактором для стабільної роботи підприємства.

Економічний ефект запропонованих рішень

Проведений техніко-економічний аналіз підтверджує доцільність реалізації запропонованих заходів. Очікується, що загальна економія електроенергії після впровадження енергоефективних рішень становитиме до 25%, що дозволить підприємству зменшити фінансові витрати та скоротити термін окупності інвестицій у модернізацію обладнання до 2-3 років. Крім того, запровадження сучасних технологій дозволить підвищити надійність роботи компресорних станцій та зменшити експлуатаційні витрати на технічне обслуговування.

Екологічні та соціальні аспекти енергозбереження

Зменшення енергоспоживання має позитивний вплив не лише на економіку підприємства, а й на екологію регіону. Скорочення витрат електроенергії призводить до зменшення викидів парникових газів та шкідливих речовин, що сприяє покращенню екологічної ситуації. Додатково, впровадження енергоефективних технологій сприяє створенню нових робочих місць, підвищенню рівня безпеки на виробництві та покращенню умов праці персоналу.

Таким чином, впровадження заходів з підвищення енергоефективності при постачанні стиснених газів на ПрАТ «Запоріжсталь» є доцільним як з економічної, так і з екологічної точки зору. Використання сучасних методів управління компресорними установками, модернізація обладнання та зниження втрат стисненого газу дозволять підприємству суттєво скоротити витрати електроенергії та підвищити загальну ефективність виробничих процесів. Подальші дослідження в цьому напрямку можуть бути спрямовані на інтеграцію альтернативних джерел енергії, застосування інтелектуальних систем моніторингу та вдосконалення технологій рекуперації тепла.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Challenges and issues of modern science, 2 (2024). Dnipro.Ukraine.

2. Собчук В.В., Барабаш О.В., Мусієнко А.П., Лаптєв О.А. Аналіз основних підходів та етапів щодо забезпечення властивості функціональної стійкості інформаційних систем підприємства. Sciences of Europe, Praha: Sciences of Europe, 2019. Vol 1, No 42. P. 41 – 44.

3. Собчук В.В. Мусієнко А.П., Ільїн О.Ю. Аналіз використання ієрархічної структури для забезпечення функціональної стійкості автоматизованої системи управління підприємством. Телекомунікаційні та інформаційні технології. 2018. № 4 (61). С. 53 – 61.

4. Собчук В.В. Мусієнко А.П., Ільїн О.Ю., Мацько О.Й. Методика оцінювання якості функціональної стійкості автоматизованої системи управління підприємством з ієрархічною організацією засобів забезпечення функціональної стійкості. Зв'язок. 2018. № 6. С. 3 – 7

5. International Petroleum Industry Environmental Conservation Association (IPIECA). Electronic resource: http://www.ipieca.org/about-us/

6. IPIECA Charts Course To Achieve UN's Sustainable Development Goals. Electronic resource: https://jpt.spe.org/ipieca-charts-course-to-achieveuns-sustainable-development-goals

7. IPIECA Reports. Electronic resource: https://www.worldpetroleum.org/resources/special-publications/187-ipieca-reports

8. «Sustainability reporting guidance for the oil and gas industry», 2020. Electronic resource: https://www.iogp.org/bookstore/product/iogp-437- sustainability-reporting-guidance-for-the-oil-and-gas-industry/

9. https://www.vpinstruments.com/markets-references/steel-industry/

10. Driving Energy Efficiency in Heavy Industries. https://ji.unfccc.int/JI_Parties/DB/E6OJWRL8OP3UCSQ2FVQZX7TT3CL1PV/viewDFP.

11. Energy efficiency in iron and steel making. https://www.energyefficiencymovement.com/wp-content/uploads/2023/01/ABB_EE_2022-05-WhitePaper_Metals.pdf

12. Steel Times International, March 2021, Driving energy efficiency and sustainability, page 27, https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK107992A1022&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch)

13. European Parliament Briefing, The potential of hydrogen for decarbonizing steel production, December 2020, page 2-3; The potential of hydrogen for decarbonising steel production | Think Tank | European Parliament (europa.eu)

14. EA, Iron and steel technology roadmap, Towards more sustainable steelmaking, October 2020, page 11; https://www.iea.org/reports/iron-and-steel-technology-roadmap

15. https://www.worldcoal.org/coal-facts/coal-steel/#steel-production 5. Meinke-Hubeny_Vito_Carbon-free steel production_20210224.pdf, page 7; www.europarl.europa.eu/cmsdata/230504/Meinke-Hubeny_Vito_Carbon-free steel production_20210224.pdf

16. European Parliament Briefing, The potential of hydrogen for decarbonizing steel production, December 2020, page 4; The potential of hydrogen for decarbonising steel production | Think Tank | European Parliament (europa.eu)

17. McKinsey & Company, Decarbonization challenge for steel, Hydrogen as a solution in Europe, April 2020, page 4-5; https://www.mckinsey.com/~/media/McKinsey/Industries/Metals and Mining/Our Insights/Decarbonization challenge for steel/Decarbonizationchallenge-for-steel.pdf

18. IEA, Iron and steel technology roadmap, Towards more sustainable steelmaking, October 2020, page 16; https://www.iea.org/reports/iron-and-steel-technology-roadmap

19. IEA, Iron and steel technology roadmap, Towards more sustainable steelmaking, October 2020, pages 32, 35 and 38; https://www.iea.org/reports/iron-and-steel-technology-roadmap

20. IEA, Iron and steel technology roadmap, Towards more sustainable steelmaking, October 2020, page 57; https://www.iea.org/reports/iron-and-steel-technology-roadmap

21. World Steel Association, Public Policy Paper, Climate change and the production of iron and steel, 2021, page 4; Climate-change-and-the-production-of-iron-and-steel.pdf (worldsteel.org)

22. IEA, Iron and steel technology roadmap, Towards more sustainable steelmaking, October 2020, page 12; https://www.iea.org/reports/iron-and-steel-technology-roadmap

23. ERNEST ORLANDO LAWRENCE BERKELEY NATIONAL LABORATORY, Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for the U.S. Iron and Steel Industry, An ENERGY STAR(R) Guide for Energy and Plant Managers, October 2010, Chapter 4 Energy use, page 15; (PDF) Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for the U.S. Iron and Steel Industry An ENERGY STAR(R) Guide for Energy and Plant Managers (researchgate.net)

24. U.S. DOE (2004) Energy Use, Loss and Opportunities Analysis: U.S. Manufacturing & Mining. U.S. Department of Energy, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, Industrial Technologies Program. December 2004, page 45; https://energy.gov/sites/prod/files/2013/11/f4/energy_use_loss_opportunities_analysis.pdf

25. ERNEST ORLANDO LAWRENCE BERKELEY NATIONAL LABORATORY, Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for the

U.S. Iron and Steel Industry, An ENERGY STAR(R) Guide for Energy and Plant Managers, October 2010, Chapter 11, Motor Systems, page 53; (PDF) Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for the U.S. Iron and Steel Industry An ENERGY STAR(R) Guide for Energy and Plant Managers (researchgate.net)

26. ERNEST ORLANDO LAWRENCE BERKELEY NATIONAL LABORATORY, Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for the U.S. Iron and Steel Industry, An ENERGY STAR(R) Guide for Energy and Plant Managers, October 2010, Chapter 13, Fan Systems, Page 65; (PDF) Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for the U.S. Iron and Steel Industry An ENERGY STAR(R) Guide for Energy and Plant Managers (researchgate.net)

27. ERNEST ORLANDO LAWRENCE BERKELEY NATIONAL LABORATORY, Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for the U.S. Iron and Steel Industry, An ENERGY STAR(R) Guide for Energy and Plant Managers, October 2010, Chapter 18, Steel Making BOF, Page 86; (PDF) Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for the U.S. Iron and Steel Industry An ENERGY STAR(R) Guide for Energy and Plant Managers (researchgate.net)

28. ERNEST ORLANDO LAWRENCE BERKELEY NATIONAL LABORATORY, Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for the U.S. Iron and Steel Industry, An ENERGY STAR(R) Guide for Energy and Plant Managers, October 2010, Chapter 14, Compressed Air Systems, Page 68; (PDF) Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for the U.S. Iron and Steel Industry An ENERGY STAR(R) Guide for Energy and Plant Managers (researchgate.net)

29. World Steel Association, Public Policy Paper, Water management in the steel industry, 2020, Page 5, Page 7; https://worldsteel.org/publications/policy-papers/water-management-policy-paper/

30. UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP), Manual on Energy Efficiency, Energy Efficient Technologies and Best Practices in Steel Rolling

Industries (Indonesia), 2014, Chapter 4.2 Rolling Mill, page 46; http://sameeeksha.org/books/Manual-on-Energy-Efficiency.pdf

31. ISO 14001: Система екологічного менеджменту та її значення для впровадження енергоефективних заходів

Додаток А

Код програми створеної в Matlab, що відображає розширену математичну модель підвищення ефективності компресорних станцій

```
% MATLAB програма для розрахунку ефективності компресорних станцій
% та побудови 3D-графіків
clc; clear; close all;

% Діапазони змінних
Q_g = linspace(500, 5000, 50);  % Витрата стисненого газу (м³/год)
p_g = linspace(0.5, 3.0, 50);   % Тиск у системі подачі (МПа)

% Задання параметрів
eta_c = 0.85;  % ККД компресора
C_rec = 0.2;   % Рівень рекуперації енергії
T_s = 300;     % Температура стисненого газу (К)
k = 0.01;      % Коефіцієнт втрат у мережі транспортування

% Створення сітки значень
[Q_g_grid, p_g_grid] = meshgrid(Q_g, p_g);

% Розрахунок споживаної електроенергії
E_c = (Q_g_grid .* p_g_grid) ./ eta_c + C_rec .* T_s;

% Розрахунок втрат у мережі транспортування
L_l = k .* (Q_g_grid .* p_g_grid).^2 - C_rec .* T_s;

% Оптимізаційна функція
F_opt = E_c + L_l;

% Побудова 3D-графіків
figure;
surf(Q_g_grid, p_g_grid, F_opt);
xlabel('Витрата стисненого газу Q_g (м³/год)');
ylabel('Тиск у системі p_g (МПа)');
zlabel('Загальні втрати енергії (МВт·год)');
title('Оптимізація енергоспоживання компресорних станцій');
colorbar;
grid on;
```

Додаток В

MATLAB програма для розрахунку економії електроенергії компресорних установок

```
% MATLAB програма для розрахунку економії електроенергії компресорних установок
% з побудовою 3D-графіків

clear; clc; close all;

% Діапазони змінних
P = linspace(50, 500, 20); % Потужність компресора (кВт)
T = linspace(100, 2000, 20); % Час роботи компресора (год)
eta = linspace(0.6, 0.95, 20); % ККД компресора
dp = linspace(-2, 2, 20); % Зміна тиску (бар)
cost = linspace(5000, 50000, 20); % Вартість впровадження ($)

% Створення сітки змінних для побудови графіків
[P_mesh, T_mesh] = meshgrid(P, T);
[Eta_mesh, DP_mesh] = meshgrid(eta, dp);

% Розрахунок базового рівня енергоспоживання
E_bas = P_mesh .* T_mesh ./ Eta_mesh;

% Розрахунок енергоспоживання при зміні тиску
E_new = E_bas .* (1 - DP_mesh * 0.07);

% Розрахунок економії при використанні ЧРП
E_crp = E_new .* 0.8;

% Загальна економія енергії
E_save = E_bas - E_crp;

% Розрахунок окупності заходів
[Cost_mesh, E_save_mesh] = meshgrid(cost, E_save);
Tariff = 0.1; % Тариф на електроенергію ($/кВт·год)
T_payback = Cost_mesh ./ (E_save_mesh * Tariff);

% Побудова тривимірних графіків

figure;
surf(P_mesh, T_mesh, E_bas);
xlabel('Потужність компресора (кВт)');
ylabel('Час роботи (год)');
zlabel('Базове споживання (кВт·год)');
title('Базовий рівень енергоспоживання');
grid on; shading interp;

figure;
```

```
surf(Eta_mesh, DP_mesh, E_new);
xlabel('ККД компресора');
ylabel('Зміна тиску (бар)');
zlabel('Споживання після зміни тиску (кВт·год)');
title('Вплив зміни тиску на енергоспоживання');
grid on; shading interp;

figure;
surf(P_mesh, T_mesh, E_crp);
xlabel('Потужність компресора (кВт)');
ylabel('Час роботи (год)');
zlabel('Споживання після ЧРП (кВт·год)');
title('Енергоспоживання з частотно-регульованим приводом');
grid on; shading interp;

figure;
surf(P_mesh, T_mesh, E_save);
xlabel('Потужність компресора (кВт)');
ylabel('Час роботи (год)');
zlabel('Економія електроенергії (кВт·год)');
title('Загальна економія електроенергії');
grid on; shading interp;

figure;
surf(Cost_mesh, E_save_mesh, T_payback);
xlabel('Вартість впровадження ($)');
ylabel('Економія енергії (кВт·год)');
zlabel('Час окупності (роки)');
title('Аналіз окупності заходів');
grid on; shading interp;
```