

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ

Електротехніки та енергоефективності  
(повна назва кафедри)

Кваліфікаційна робота(проект)  
другий (магістерський) рівень  
(рівень вищої освіти)

на тему Прогнозування споживання електричної енергії в умовах киснево-компресорного цеху ПАТ «Запоріжсталь»

Виконав: студент 2 курсу, групи 8.1419 д  
спеціальності 141 Електроенергетика,  
електротехніка та електромеханіка  
(код і назва спеціальності)

спеціалізації \_\_\_\_\_  
(код і назва спеціалізації)

освітньої програми 141.00.11 Електроенергетика,  
електротехніка та електромеханіка  
(назва освітньої програми)

М.О. Хорошун  
(ініціали та прізвище)

Керівник к.т.н., доц. Світанько М.В.  
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Рецензент Дришник І.В.  
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інженерний навчально-науковий інститут \_\_\_\_\_  
Кафедра \_\_\_\_\_ електротехніки та енергоефективності  
Рівень вищої освіти \_\_\_\_\_ другий (магістерський) рівень  
Спеціальність \_\_\_\_\_ 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка  
(код та назва)  
Спеціалізація \_\_\_\_\_  
(код та назва)  
Освітня програма \_\_\_\_\_ 141.00.11 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри \_\_\_\_\_

д.т.н., доц. \_\_\_\_\_

В.Л. Коваленко

« 16 » \_\_\_\_\_ 12 20 20 року

ЗАВДАННЯ  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ

Хорошун Микола Олегович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема роботи (проекту) \_\_\_\_\_ Прогнозування споживання електричної енергії в умовах киснево-компресорного цеху ПАТ «Запоріжсталь»

керівник роботи \_\_\_\_\_ Світанько Микола Вікторович, к.т.н., доцент  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом ЗНУ від « 14 » вересня 2020 року № 1305-С

2 Строк подання студентом роботи \_\_\_\_\_ 01 грудня 2020 р.

3 Вихідні дані до роботи \_\_\_\_\_ Метод карамелічно-регресійного аналізу; тариф 2,14 грн/кВт.год електроенергії, без ПДВ

4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) \_\_\_\_\_ 1) Аналіз методів прогнозування витрат електричної енергії. 2) Прогнозування витрат електричної енергії та визначення його достовірності. 3) Визначення економічного ефекту від прогнозування та встановлення пристроїв плавного запуску. 4) Охорона праці та техногенна безпека.

5 Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

\_\_\_\_\_ 1) Тема: Прогнозування споживання електричної енергії в умовах киснево-компресорного цеху ПАТ «Запоріжсталь». Плакат. 2) Алгоритм прогнозування. Плакат. 3) Алгоритм перевірки гіпотези про нормальний закон розподілу  $\chi^2$  К.Пірсона. Плакат. 4) Прогнозування обсягів споживання електроенергії на

виробництво кисню 2019-2022 роки. Плакат. 5) Прогнозування обсягів споживання електроенергії на виробництво азоту, аргону і стисненого повітря на 2019-2022 роки. Плакат. 6) ланові та прогнозні значення електроспоживання киснево-компресорного цеху на 2019-2022 роки. Плакат. 7) Схема звукоізолюваної kabіни технолога. Плакат. 8) Висновки. Плакат.

6 Консультанти розділів роботи		Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1	Прізвище, ініціали та посада консультанта Світанько М.В. к.т.н. доцент		
Розділ 2	Світанько М.В. к.т.н. доцент		
Розділ 3	Світанько М.В. к.т.н. доцент		
Розділ 4	Світанько М.В. к.т.н. доцент		

7 Дата видачі завдання 01.09.2020 р.

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз методів прогнозування витрат електричної енергії	30.09.2020	
2	Прогнозування витрат електричної енергії та визначення його достовірності	30.10.2020	
3	Визначення економічного ефекту від прогнозування та встановлення пристроїв плавного запуску	19.11.2020	
4	Охорона праці та техногенна безпека	30.11.2020	

Студент   
(підпис)

М.О. Хорошун  
(ініціали та прізвище)

Керівник роботи (проекту)   
(підпис)

М.В. Світанько  
(ініціали та прізвище)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер   
(підпис)

С.В. Башлій  
(ініціали та прізвище)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка містить: 107 сторінок, 11 рисунків, 24 таблиці, 30 джерел.

Мета роботи: знизити витрати на придбання електричної енергії за рахунок підвищення точності прогнозування обсягів споживання електричної енергії на перспективний період в залежності від об'ємів виготовленої продукції та оцінки достовірності прогнозу.

В магістерській роботі використано такі методи дослідження, як статистичний аналіз, формалізація та гіпотеза.

В роботі запропоновано підхід, який забезпечує можливість підвищення точності планування обсягів електроспоживання киснево-компресорного цеху на виробництво продукції шляхом застосування кореляційно-регресійного аналізу для знаходження залежності між розглядуваними ознаками та оцінки адекватності знайденої моделі.

Для підтвердження достовірності розрахованого прогнозу в роботі використано теорію ймовірностей для знаходження можливості попадання прогнозних значень питомого енергоспоживання в заданий довірчий інтервал.

Розраховано економічний ефект від зниження енергоспоживання за рахунок покращення режимів роботи компресорного обладнання та уточнення його прогнозованих значень.

Можливим напрямком розвитку дослідження є визначення інших факторів, які впливають на процес енергоспоживання, що в свою чергу дозволить підвищити точність прогнозування та оцінити раціональність витрат електричної енергії.

ВИТРАТИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ, ОБ'ЄМИ ВИГОТОВЛЕНОЇ ПРОДУКЦІЇ,  
КОРЕЛЯЦІЯ, РЕГРЕСІЯ, ПРОГНОЗУВАННЯ, ЙМОВІРНІСТЬ, СТИСНЕНЕ  
ПОВІТРЯ, ПРИСТРІЙ ПЛАВНОГО ЗАПУСКУ, ЕКОНОМІЧНИЙ ЕФЕКТ

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ПРОГНОЗУВАННЯ ВИТРАТ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ.....	9
1.1 Загальна характеристика підприємства ПАТ «Запоріжсталь».....	9
1.2 Передумови прогнозування електричного навантаження.....	15
1.3 Аналіз методів прогнозування електричного навантаження.....	16
1.4 Методика прогнозування витрат електричної енергії та оцінка його достовірності.....	19
1.4.1 Визначення прогнозних значень енергоспоживання на перспективний період .....	19
1.4.2 Визначення достовірності прогнозування на перспективний період.....	28
2 ПРОГНОЗУВАННЯ ВИТРАТ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ЙОГО ДОСТОВІРНОСТІ .....	35
2.1 Характеристика виробництва киснево-компресорного цеху ПАТ «ЗАПОРІЖСТАЛЬ».....	35
2.2 Прогнозування витрат електричної енергії на виробництво кисню.....	37
2.3 Визначення достовірності прогнозованого енергоспоживання на виробництво кисню .....	49
2.4 Прогнозування витрат електричної енергії на виробництво азоту, аргону та стисненого повітря.....	55
2.5 Визначення достовірності прогнозованого енергоспоживання на виробництво азоту, аргону та стисненого повітря.....	68
2.6 Розрахунок зниження витрат електричної енергії при встановленні пристроїв плавного запуску.....	75
3 ВИЗНАЧЕННЯ ЕКОНОМІЧНОГО ЕФЕКТУ ВІД ПРОГНОЗУВАННЯ ТА ВСТАНОВЛЕННЯ ПРИСТРОЇВ ПЛАВНОГО ЗАПУСКУ.....	80
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА.....	87
4.1 Характеристика потенційних небезпечних та шкідливих виробничих факторів.....	87
4.2 Заходи з поліпшення умов праці.....	88
4.3 Виробнича санітарія.....	95
4.4 Електробезпека.....	96
4.5 Пожежна безпека.....	98
4.6 Засоби індивідуального захисту .....	100
ВИСНОВОК.....	102
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	105

## ВСТУП

При нестабільності економічних умов практична потреба в об'єктивному співставленні обсягів виробництва та витрат електроенергії на підприємствах є досить великою, оскільки обумовлена необхідністю, по-перше, прогнозувати електроспоживання при значних змінах обсягів виробництва для формування заявки в енергосистему і, по-друге, оцінювати раціональність використання електроенергії.

В умовах функціонування оптового ринку електроенергії, для великих і середніх споживачів гостро стоїть питання точності планування електроспоживання. Складання достовірної заявки на споживання електроенергії повинно дозволити знизити витрати на її придбання.

Перед тим, як подати заявки в енергосистему на перспективний період, підприємства мають дати попередню оцінку величині електроспоживання. Проте, найчастіше прогнозовані значення не відповідають дійсним фактичним витратам, що призводить до сплати штрафів за перевищення договірних обсягів енергоспоживання, або до перевитрат грошових коштів за невикористані об'єми енергії.

Не дивлячись на те, що кожне виробництво містить індивідуальні технологічні цикли, у всіх виробничих процесах споживання енергії можна знайти спільні риси, тим самим утворюючи методичну базу для виконання точного прогнозу.

Невідповідність фактичних значень енергоспоживання киснево-компресорного цеху ПАТ «Запоріжсталь» на виробництво кисню, азоту, аргону та стисненого повітря запланованим витратам виявила необхідність підвищення точності прогнозування за рахунок математичних методів пошуку закономірностей в розглянутому часовому процесі.

При наявності великої статистичної бази з електроспоживання та об'ємів виготовленої продукції в якості найбільш доцільного методу прогнозування

вибрано кореляційно-регресійний аналіз із застосуванням теорії ймовірностей для визначення достовірності такого прогнозу.

Розглядаючи шляхи зниження грошових витрат, пов'язаних зі споживанням електроенергії, необхідно враховувати й можливі технічні рішення, в якості яких в даній роботі запропоновано встановлення пристроїв плавного запуску для покращення та продовження роботи компресорного обладнання цеху.

Питаннями прогнозування електроспоживання займалися такі вчені, як Праховник А. В., Пащук В. Я., Копцев Л. А., Філіпов С. П. та інші. Так як запропоновані ними підходи вимагають не тільки участі програмістів для написання спеціального програмного забезпечення та навчання енергоменеджерів, а й відповідних грошових витрат на їх роботу, наведений в даній роботі метод прогнозування є більш зручним в застосуванні.

Метою магістерської роботи є зниження витрат на придбання електричної енергії за рахунок підвищення точності прогнозування обсягів споживання на перспективний період в залежності від об'ємів виготовленої продукції та оцінки достовірності прогнозу.

Об'єкт дослідження: методи прогнозування обсягів споживання електричної енергії.

Предмет дослідження: зв'язок між обсягами споживання електроенергії та об'ємами виготовленої продукції киснево-компресорним цехом ПАТ «Запоріжсталь».

В роботі використано аналіз статистичних даних за попередні роки та формалізований метод для прогнозування енергоспоживання за допомогою знаходження математичної моделі залежності між об'ємами виготовленої продукції та обсягами спожитої електроенергії.

Для оцінки знайденого рівняння регресії та достовірності прогнозу висунуто гіпотези щодо перевірки істотності регресійної моделі залежності між розглядуваними ознаками та закону розподілу величин відхилення питомого

енергоспоживання від середнього значення для знаходження достовірності попадання прогнозних значень в заданий інтервал.

В роботі проаналізовано існуючі методи та визначено найбільш оптимальний підхід до прогнозування.

Спрогнозовано витрати електроенергії на виробництво кисню та азоту, аргону і стисненого повітря та дано оцінку достовірності прогнозу.

Покращено роботу компресорного обладнання та продовжено термін його служби завдяки встановленню пристроїв плавного запуску.

Визначено економічний ефект від запропонованих організаційного та технічного рішень.

Отримані результати дослідження дозволять мінімізувати витрати, пов'язані з неточністю прогнозування, та можуть бути використані на інших промислових підприємствах.



# 1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ПРОГНОЗУВАННЯ ВИТРАТ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

## 1.1 Загальна характеристика підприємства ПАТ «Запоріжсталь»

ПАТ «Запоріжсталь» – підприємство з повним металургійним циклом, яке займає лідируючі місця по виробництву сталі в Україні, обсягам експорту, постачанням валюти, а також податковим відрахуванням. У 2016 році комбінат збільшив податкові перерахування в бюджет України направивши в державну казну рекордну суму в розмірі 3,2 млрд. гривень. Це на 28% (на 704 млн. гривень) більше, ніж у 2015 році.

ПАТ «Запоріжсталь» стабільно працює, розвивається і продовжує модернізацію з використанням сучасних прогресивних і відповідних усім світовим стандартам природоохоронних технологій. Проектні потужності комбінату дозволяють виробляти близько 6,3 млн. тонн агломерату, 4,2 млн. тонн чавуну, 4,07 млн. тонн сталі, порядку 3,7 млн. тонн гарячого прокату, і порядку 1,2 млн. тонн холодного прокату.

У 2016 році вироблено 3600,2 тис. тонн чавуну, 3890,7 тис. тонн сталі, 3367,9 тис. тонн прокату. Унікальне географічне положення дає ПАТ «Запоріжсталь» логістичні переваги за рахунок близькості до постачальників сировини, водних та залізничних магістралей.

ПАТ «Запоріжсталь» в 2016 році поставив споживачам водним транспортом через Запорізький річковий порт понад 540 тис. тонн металопродукції.

Комбінат системно модернізує виробничі потужності, приділяючи особливу увагу питанням екології. З 2012 року направлено на екологічну модернізацію і реконструкцію комбінату 5,7 мільярда гривень.

Головними проектами екологічної модернізації комбінату є: проект модернізації газоочисних систем аглофабрики, що завершується, масштабна модернізація доменної печі № 4 з установкою системи аспірації ливарного

двору і підбункерної естакади, будівництво нової травильної лінії в цеху холодної прокатки № 1, масштабна реконструкція доменної печі № 3.

З 2013 року комбінат «Запоріжсталь» побудував 6 газоочисток. Газоочистки агломашин №1 і №2 працюють в штатному режимі. На даний момент газоочистки агломашин №3-6 працюють в режимі дослідно-промислової експлуатації. З промисловим введенням в експлуатацію газоочисток аглофабрика комбінату досягне міжнародних екологічних стандартів за рівнем очищення викидів пилу і газів. Робота всіх 6 газоочисток аглофабрики вже позитивно впливає на екологічну ситуацію в регіоні. Завдяки екологічній модернізації аглофабрики, загальні викиди комбінату по пилу скоротилися на 42%, в порівнянні з 2012 роком. Модернізація газоочисних установок агломашин № 3-6 дозволила забезпечити очистку повітря від пилу до 50 мг/м<sup>3</sup>, від сірчистого ангідриду – нижче 400 мг/м<sup>3</sup>.

Ще один великий проект 2016 року - масштабна реконструкція доменної печі № 3. Агрегат буде оснащений сучасною системою аспірації, яка забезпечить очистку викидів від пилу до 50 мг/м<sup>3</sup>. Обсяг інвестицій в проект складе близько 1,5 млрд. гривень. В рамках проекту введена в дослідно-промислову експлуатацію нова система аспірації ливарного двору доменної печі № 2, оснащена високоефективними рукавними фільтрами з імпульсною регенерацією, потужним тяго-дугтєвим обладнанням і системою пневмотранспорту для повернення уловленого пилу в виробництво. Чисельність колективу ПАТ «Запоріжсталь» становить близько 13 тисяч осіб. У 2016 році комбінат підвищив середню заробітну плату на 17% в порівнянні з 2015 роком, яка в даний момент складає близько 11 тисяч гривень. Також працівником комбінату надається безкоштовна медична страховка і медобслуговування, регулярне санаторне оздоровлення та інші соціальні пільги. Один з пріоритетних напрямків діяльності ПАТ «Запоріжсталь» – підвищення енергоефективності та раціональне використання виробничих ресурсів.

Система енергетичного менеджменту комбінату пройшла сертифікацію на відповідність міжнародному стандарту ISO 50001, що дозволяє досягти суттєвої економії енергоресурсів за рахунок застосування кращої управлінської практики і без значних вкладень. Система енергетичного менеджменту дозволяє знижувати собівартість і енергоємність продукції, витрати на енергоносії, удосконалює поводження з відходами та забезпечує виконання вимог щодо зниження викидів парникових газів.

У числі ключових енергозберігаючих проєктів, які успішно впровадив ПАТ «Запоріжсталь», – введення в експлуатацію установки вдування пиловугільного палива, що дозволило комбінату повністю відмовитися від споживання природного газу в доменному виробництві.

Навесні 2016 ПАТ «Запоріжсталь» спільно з «Запоріжжкоксом» реалізував проєкт з обміну вторинними газами. На даний момент в аглоцеху, ТЕЦ, групі прокатних цехів (обтискний, цех гарячої прокатки тонкого листа) застосовується більш дешевий аналог природного газу – коксо-доменна і природно-доменна суміш.

Таким чином в 2016 році комбінат рекордно знизив споживання природного газу у виробництві до 160 млн. м<sup>3</sup>, що на 22% (44 млн. м<sup>3</sup>) нижче показників 2015 роки (204 млн. м<sup>3</sup>), а це явний успіх. У планах на майбутнє перехід з мартенівського способу виплавки сталі на конвертерний. Це дозволить досягти ще більш істотного енергозберігаючого ефекту.

У 2017 році в рамках реалізації проєкту з обміну вторинними газами між «Запоріжжкоксом» і «Запоріжсталлю», був модернізований регулятор подачі коксового газу котла-утилізатора РК85-1 коксохімічного заводу. Це дозволило збільшити обсяг поставок коксівного газу на «Запоріжсталь» до 8 млн м<sup>3</sup> на рік, знизивши споживання природного на 4 млн куб м<sup>3</sup> на рік. Економічний ефект від заходу дозволить «Запоріжсталі» додатково заощадити близько 26 млн гривень на рік.

Велику увагу на підприємстві приділяють і раціональному використанню електроенергії та інших видів енергоресурсів.

ПАТ «Запоріжсталь» веде активну екологічну модернізацію і реконструкцію існуючого обладнання, впроваджує інновації, постійно збільшуючи обсяги і ефективність виробництва, підвищуючи якість продукції, скорочуючи витрати.

Пріоритетними напрямками переобладнання виробництва є: енерго і ресурсозбереження; підвищення якості та розширення асортименту металопродукції; збільшення кількості виробництва гарячого і холодного прокату, чавуну, металовиробів і товарних слябів; впровадження передових екологічних технологій на виробництві.

З 2012 року направлено на екологічну модернізацію і реконструкцію комбінату 5,7 мільярда гривень.

Введення в дію базового складу вугілля в комплексі установки ПВП в доменному виробництві. Повний обсяг інвестицій в реалізацію проекту склав близько 1 мільярда грн., Включаючи БСВ – 350 млн. грн.

Реконструкція агломашин №1-2 з будівництвом нових ефективних газоочисних установок. Завершення будівництва газоочисних установок агломашин №3-6, що забезпечує очищення повітря від пилу до  $50 \text{ мг/м}^3$ , по сірчистому ангідриду – нижче  $400 \text{ мг/м}^3$ . Інвестиції – 870 млн. грн.

Введення в експлуатацію нової лінії соляно-кислотного травлення в цеху холодної прокатки № 1, що дозволило повністю ліквідувати викиди парів сірчаної кислоти і скиди комбінату в річку Дніпро від ЦХП-1. Інвестиції в проект – 890 млн грн.

Реалізація проекту реконструкції ДП-4 з будівництвом нових систем аспірації ливарного двору і підбункерного приміщення. У модернізацію вкладено 950 млн. грн.

ПАТ «Запоріжсталь» ввів в експлуатацію комплекс переробки шлаків «АМКМ» для утилізації промислових відходів з метою зниження впливу на навколишнє середовище. Інвестиції близько 30 млн. грн.

ПАТ «Запоріжсталь» першим серед промислових підприємств України запровадив сучасну інформаційно-диспетчерську систему (далі – ІДС)

управління залізничним транспортом, удосконаливши при цьому систему візуалізації. На реалізацію проекту комбінат направив близько 600 тис. гривень. Успішно функціонує на підприємстві і система візуалізації та моніторингу технологічних процесів. Тепер в режимі реального часу контролюються основні виробничі процеси. Інвестиції в проект склали близько 5,8 млн грн.

У листопаді 2016 року «Запоріжсталь» зупинив доменну піч № 3 на масштабну реконструкцію. Інвестиції в проект становлять близько 1,5 млрд. гривень.

При реконструкції доменної печі № 3 застосований метод велико-вузлового складання за допомогою потужного крану компанії Mammoet вантажопідйомністю 1600 т. Вперше в Україні при реалізації великих інфраструктурних проектів комбінат «Запоріжсталь» використовував кращу світову практику – створив інтелектуальну модель доменної печі, яка підвищить ефективність реконструкції, скоротить її строки проведення. Інтелектуальна 3D-модель доменної печі на етапі планування дозволила виявити і усунути понад 11 тисяч помилок.

Реконструйована доменна піч № 3 ПАТ «Запоріжсталь» оснащена новітньою системою аспірації з приладами безперервного автоматичного контролю, яка відповідає найсуворішим європейським вимогам і забезпечує очистку викидів від пилу до  $50 \text{ мг/м}^3$ . Також в рамках проекту встановлено новий безконусний завантажувальний пристрій виробництва компанії Danieli & Cossus, збільшено з 16 до 20 кількість фурмених приладів і проведена комбінована футеровка з використанням новітніх технологій.

У пріоритеті екологічної модернізації комбінату знижувати частку викидів, які несуть з собою негативний вплив на навколишнє середовище: пил, сірчистий ангідрид ( $\text{SO}_2$ ), інші викиди.

На ПАТ «Запоріжсталь» активно впроваджуються процеси безперервного вдосконалення. Серед реалізованих програм: «Бережливе підприємство», впровадження інструментів «5С», СПП і робота КНС.

Зокрема, в рамках роботи Системи подачі пропозицій щодо поліпшення виробництва, авторів раціональних ідей чекає винагорода. У 2016 році економічний ефект від СПП склав 215 млн. грн.

На комбінаті «Запоріжсталь» функціонує Інтегрована система менеджменту якості, енергоефективності, охорони праці та екології (ІСМ), схвалена ТОВ «БЮРО ВЕРІТАС Сертифікейшн Україна» як відповідна вимогам міжнародних стандартів ISO 9001, ISO 14001, OHSAS 18001 та ТОВ «Технічні та управлінські послуги» вимогам міжнародних стандартів ISO 50001.

Сертифікатами відповідності вимог міжнародних стандартів підтверджується досягнення реальних і стійких поліпшень комбінату як виробника агломерату, чавуну, сталевих слябів з вуглецевих, низьколегованих і легуваних сталей, прокату гарячекатаного і холоднокатаного в рулонах і листах, стрічки сталевій, гнутих профілів, жерсті, кисню, азоту та інертних газів. Інтегрована система менеджменту ПАТ «Запоріжсталь» орієнтується на запити і очікування споживачів, персоналу, громадськості, органів влади і прагне до підвищення довгострокової конкурентоспроможності.

Пріоритетними завданнями в цьому напрямку є випуск високоякісної продукції при забезпеченні безпечних умов праці персоналу, мінімізації впливів на навколишнє природне середовище, захист здоров'я населення проживає в регіоні діяльності комбінату і підвищення енергоефективності. У травні 2016р. ПАТ «Запоріжсталь» успішно пройшов ресертифікаційний аудит Системи енергетичного менеджменту і підтвердив сертифікат відповідності вимогам міжнародного стандарту ISO 50001 на новий трирічний період до 2019 року.

15-18 листопада 2016 ПАТ «Запоріжсталь» успішно пройшов другий наглядовий аудит Інтегрованої системи менеджменту, який провели експерти ТОВ «Бюро Верітас Сертифікейшн Україна». Аудит підтвердив високий рівень відповідності ІСМ комбінату вимогам міжнародних стандартів по системах

менеджменту якості ISO 9001, екологічного менеджменту ISO 14001, а також управління охороною праці та виробничої безпеки OHSAS 18001.

## 1.2 Передумови прогнозування електричного навантаження

Будь-яка задача прогнозування спирається на складні математичні або інтуїтивні методи пошуку закономірностей в розглянутому часовому процесі.

В умовах функціонування оптового ринку електричної енергії для великих і середніх споживачів гостро стоїть питання точності планування електроспоживання. Складання достовірної заявки на споживання електроенергії повинно, по-перше, дозволити знизити витрати на придбану електричну енергію і, по-друге, воно є основою для формування перспективної структури генеруючи потужностей об'єднаної енергосистеми.

При нестабільності економічних умов практична потреба в об'єктивному співставленні обсягів виробництва та витрат електроенергії на підприємствах велика, оскільки обумовлена необхідністю, по-перше, прогнозувати електроспоживання при значних змінах обсягів виробництва для формування заявки в енергосистему і, по-друге, оцінювати раціональність використання електроенергії.

Практика показує, що для прогнозування споживання електроенергії не існує загального, єдиного методу: кожне виробництво містить індивідуальні технологічні цикли, які, сумуючись, утворюють унікальний часовий процес. Однак у всіх виробничих циклах споживання енергії можна знайти спільні риси, тим самим утворюючи методичну базу для виконання точного прогнозу.

Технологічні процеси споживання електроенергії підкоряються циклічним, функціональним і випадковим тенденціям, з яких найбільш прогнозовані циклічні залежності, що за попередніми оцінками, становлять 70–80% всіх відхилень в процесі споживання електроенергії.

Дольова участь випадкових тенденцій у загальному процесі невелика, але амплітуда відхилень може бути досить значна. Очевидно, що назвати такі відхилення “істинно випадковими” буде невірно: кожне відхилення може бути згодом пояснено цілком закономірними причинами. Однак виконати правильну оцінку ситуації в момент складання заявки в цьому випадку буде або неможливим (наприклад, передбачати раптову зупинку цеху підприємства зважаючи аварії), або недоцільним (наприклад, може виявитися економічно невиправданим збір відомостей для передбачення режиму споживання електроенергії в передсвяткові дні).

Дольова участь закономірностей функціонального характеру становить приблизно 10–15% від усього обсягу відхилень. У цю групу включаються відхилення, з'ясовані відомими і відносно передбачуваними факторами виробництва, такими як: температурою повітря або теплоносія, тиском газу, обсягом поставок сировини та іншими, включаючи об'єм самого виробництва.

Отже, задача прогнозування споживання електроенергії для експерта підприємства є складною і багатоплановою. Не можна сказати, що якою-небудь складовою при прогнозі можна знехтувати, оскільки внесок кожної складової є значним, а ціна помилки є досить великою. Недбалість у складанні прогнозу хоча б на одну добу може призвести до додаткових витрат у десятки, сотні тисяч гривень на погашення платежів сектора відхилень.

### 1.3 Аналіз методів прогнозування електричного навантаження

Під методом прогнозування розуміється сукупність прийомів і способів мислення, що дозволяють на основі аналізу ретроспективних даних, зовнішніх і внутрішніх зв'язків об'єкта прогнозування, а також їх виміру в рамках даного явища або процесу вивести судження певної достовірності щодо майбутнього розвитку об'єкта.



У загальному вигляді виділяють декілька методів прогнозування енергоспоживання поділяються на інтуїтивні і формалізовані.

Інтуїтивні методи використовуються у випадку неможливості кількісної оцінки окремих процесів або неможливості врахування багатьох факторів через складність об'єктів. Ці методи базуються на використанні експертних оцінок, за допомогою яких встановлюється ступінь складності і актуальності проблеми, визначаються основні цілі та критерії, виявляються найбільш важливі фактори і взаємозв'язок між ними, вибираються альтернативи, яким віддають найбільші переваги.

Формалізовані ж методи прогнозування передбачають складання прогнозу на основі використання математичних формул та економіко-математичних моделей для визначення кількісних параметрів.

Враховуючи наявність достатньої фактографічної інформації, прогнозування енерговитрат киснево-компресорного цеху ПАТ «Запоріжсталь» вимагає застосування формалізованого методу прогнозування, для вибору якого попередньо необхідно провести аналіз існуючих методів.

Серед формалізованих методів виділяють екстраполяційні методи, які є одними з найпоширеніших і найбільш розроблених серед усієї сукупності методів прогнозування, та економіко-математичне моделювання, яке поділяється на структурне, сітьове, матричне та імітаційне.

Імітаційні є найбільш часто використовуваними серед економіко-математичних моделей, адже вони відтворюють розвиток об'єкта прогнозування відповідно до очікуваної ситуації або аналогічного явища. Проте значні витрати на розробку, пов'язані з роботою не тільки енергоменеджерів та інженерів, а й висококваліфікованих спеціалістів-програмістів, великі затрати машинного часу та можливість використання моделі лише для даних конкретних умов виключають необхідність використання даного методу прогнозування.

При формуванні прогнозів за допомогою екстраполяції виходять із тенденцій змін тих чи інших кількісних характеристик об'єкта, що статистично

склалися. Проте для підвищення ступеню реальності прогнозу, складеного з використанням цих методів, необхідно використовувати значний об'єм даних.

До основних екстраполяційних методів належать:

- метод експоненційного згладжування, що полягає в тому, що кожен елемент (рівень) часового ряду згладжується за допомогою зваженої плинної середньої, при чому реалізується можливість отримання оцінки параметрів тренда на момент останнього спостереження об'єкта;
- метод аналізу часових рядів, що полягає в побудові моделі, за допомогою якої можна пояснити поведінку ряду і здійснити прогноз на майбутні періоди;
- ймовірнісний метод, що полягає в обчисленні очікуваного значення ймовірності деякої випадкової змінної;
- метод кореляційно-регресійного аналізу, що полягає у встановленні форми зв'язку і виборі математичного рівняння, що могло б найповніше відображати його характер між ознаками досліджуваного явища [1].

Не дивлячись на можливість врахування ваги вихідної інформації, простоту процедур обчислення та гнучкість в описанні різноманітних динамік процесів, недоліком методу експоненційного згладжування є те, що вибраний параметр згладжування не враховує сезонні та інші нециклічні (випадкові) коливання, що негативно позначається на точності прогнозу.

Неоднозначність вибору моделі за методом аналізу часових рядів може спостерігатися як на етапі виділення детермінованого компонента ряду, так і при виборі структури ряду залишків. Тому основним недоліком є розробка декількох прогнозів, зроблених за допомогою різних моделей, що вимагає додаткових витрат часу.

Перевагою ймовірнісного методу є те, що оцінки мають більш конкретний характер, проте основний недолік – необхідність використання великої кількості спостережень.

Перевагою кореляційно-регресійного аналізу є те, що він не тільки враховує математико-економічне моделювання, а й дає можливість оцінити і

проаналізувати одержані результати. Проте, для оцінки настання прогнозу виникає необхідність використання додаткового методу, а саме теорії ймовірностей.

1.4 Методика прогнозування витрат електричної енергії та оцінка його достовірності

1.4.1 Визначення прогнозних значень енергоспоживання на перспективний період

За допомогою засобів MS Excel в якості регресійного рівняння для математичного опису залежності між об'ємами виготовленої продукції та відповідними витратами електричної енергії підібрано степеневу функцію нелінійного виду  $y = a \cdot x^b \cdot \varepsilon$ , яка найбільш точно відповідає статистичним даним [2].

Так як степенева модель залежності є внутрішньо лінійною, для оцінки її параметрів застосовують комбінований метод, який полягає в логарифмуванні обох частин рівняння та заміні змінних, після чого рівняння регресії має вигляд:

$$y^* = a^* + b^* \cdot x^* + \varepsilon^*, \quad (1.1)$$

де  $y^* = \lg y$  – витрати електричної енергії на виготовлення  $x^*$  об'єму продукції;

$x^* = \lg x$  – об'єм виготовленої продукції;

$a^* = \lg a$  – коефіцієнт рівняння регресії, який показує витрати електроенергії на холостому ході;

$b^* = b$  – коефіцієнт рівняння регресії, який показує середню зміну витрат електроенергії із зміною об'єму виготовленої продукції на одну одиницю;

$\varepsilon^* = \lg \varepsilon$  – випадкова помилка.

Для оцінки параметрів даної функції використовується метод найменших квадратів (далі – МНК), задачею якого є оцінка закономірностей, що спостерігаються на тлі випадкових коливань, та її використання для подальших розрахунків, зокрема, для прогнозів [3, 4].

Метод найменших квадратів дозволяє отримати такі оцінки параметрів  $a^*$  і  $b^*$ , при яких сума квадратів відхилень фактичних значень результативної ознаки у від розрахункових (теоретичних)  $\hat{y}_x$  мінімальна:

$$\sum \varepsilon_i^2 = \sum (y_i - \hat{y}_{x_i})^2 \rightarrow \min. \quad (1.2)$$

Тобто, зі всієї множини ліній лінія регресії на графіку вибирається так, щоб сума квадратів відстаней по вертикалі між точками і цією лінією була б мінімальною, як зображено на рисунку 1.1.

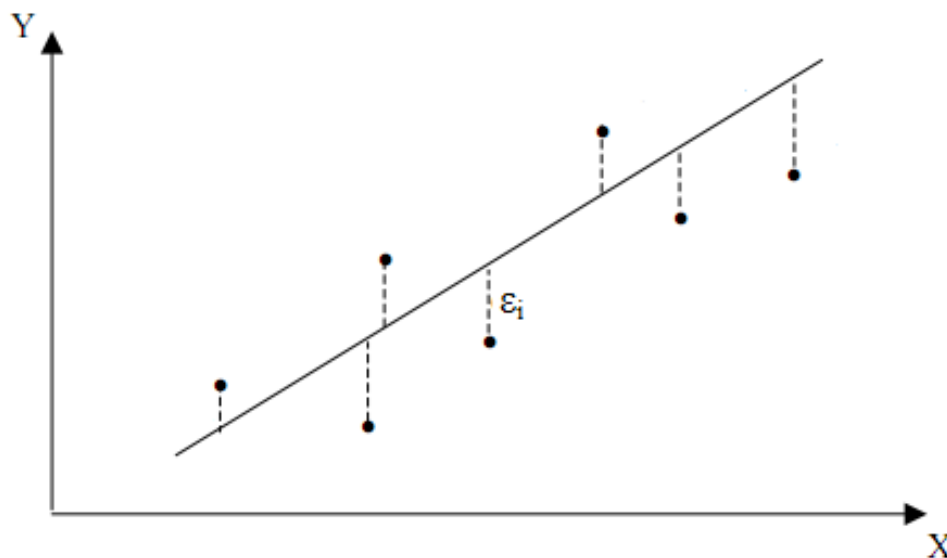


Рисунок 1.1 – Лінія регресії з мінімальною дисперсією відхилень

Щоб знайти мінімум функції (1.2), необхідно обчислити приватні похідні за кожним з параметрів  $a$  і  $b$  та прирівняти їх до нуля.

Позначивши  $\sum \varepsilon_i^2$  через  $S$ , отримано наступну систему нормальних рівнянь для оцінки параметрів  $a$  і  $b$ :

$$\begin{cases} n \cdot a + b \sum x = \sum y, \\ a \sum x + b \sum x^2 = \sum y \cdot x. \end{cases} \quad (1.3)$$

Оцінки параметрів  $a$  і  $b$  знаходяться за формулами:

$$a = \bar{y} - b \cdot \bar{x}; \quad (1.4)$$

$$b = \frac{\text{cov}(x,y)}{\sigma_x^2} = \frac{\overline{yx} - \bar{y} \cdot \bar{x}}{\overline{x^2} - \bar{x}^2}; \quad (1.5)$$

де  $\text{cov}(x, y) = \overline{yx} - \bar{y} \cdot \bar{x}$  – коваріація ознак;

$\sigma_x^2 = \overline{x^2} - \bar{x}^2$  – дисперсія ознаки  $x$ .

Зважаючи на лінеаризацію функції регресії, система її рівнянь виглядатиме наступним чином:

$$\begin{cases} \sum lgy = n \cdot lga + b \sum lgx, \\ \sum lgy \cdot lgx = lga \cdot \sum lgx + b \cdot \sum (lgx)^2. \end{cases} \quad (1.6)$$

Оцінки параметрів  $a^*$  і  $b^*$  будуть знайдені за формулами:

$$a^* = \frac{\sum(lgy_i) \cdot \sum(lgx_i)^2 - \sum(lgx_i \cdot lgy_i) \cdot \sum(lgx_i)}{n \cdot \sum(lgx_i)^2 - (\sum(lgx_i))^2}; \quad (1.7)$$

$$b^* = \frac{\sum(lgx_i \cdot lgy_i) - a^* \cdot \sum(lgx_i)}{\sum(lgx_i)^2}. \quad (1.8)$$

Оцінки параметрів  $a$  і  $b$  складатимуть  $10^{a^*}$  і  $10^{b^*}$  відповідно.

Далі проводиться оцінка значущості як рівняння в цілому, так і окремих його параметрів.

Оцінка істотності рівняння регресії в цілому дається за допомогою  $F$ -критерія Фішера, для чого висувається нульова гіпотеза, що коефіцієнт регресії дорівнює нулю, тобто  $b = 0$ , а, отже, фактор  $x$  не впливає на результат  $y$ .

Безпосередньому розрахунку  $F$ -критерія передуює аналіз дисперсії, центральне місце в якому займає розкладання загальної суми квадратів відхилень змінної  $y$  від середнього значення  $\bar{y}$  на дві частини – “пояснену” і “непояснену”:

$$\sum(y - \bar{y})^2 = \sum(\hat{y}_x - \bar{y})^2 + \sum(y - \hat{y}_x)^2, \quad (1.9)$$

де  $\sum(y - \bar{y})^2$  – загальна сума квадратів відхилень;

$\sum(\hat{y}_x - \bar{y})^2$  – сума квадратів відхилень, пояснена регресією;

$\sum(y - \hat{y}_x)^2$  – залишкова сума квадратів відхилень.

Оскільки не всі точки поля кореляції лежать на лінії регресії, то завжди має місце їх розкид, як обумовлений впливом фактора  $x$ , тобто регресією  $y$  по  $x$ , так і викликаний дією інших причин (непояснена варіація). Придатність лінії регресії для прогнозу залежить від того, яка частина загальної варіації ознаки  $y$  припадає на пояснення варіацію. Очевидно, що якщо сума квадратів відхилень, зумовлена регресією, буде більше залишкової суми квадратів, то рівняння регресії статистично значимо і фактор  $x$  істотно впливає на результат  $y$ .

Будь-яка сума квадратів відхилень пов'язані з числом ступенів свободи (df – degrees of freedom), тобто з числом свободи незалежного варіювання ознаки. Число ступенів свободи пов'язано з числом одиниць сукупності  $n$  і з числом визначених за нею констант. Стосовно до досліджуваної проблеми число ступенів свободи має показати, скільки незалежних відхилень з  $n$  можливих  $[y_1 - \bar{y}, y_2 - \bar{y}, \dots, y_n - \bar{y}]$  потрібно для утворення даної суми квадратів. Так, для загальної суми квадратів  $\sum(y - \bar{y})^2$  потрібно  $n-1$  незалежних відхилень, бо за сукупністю із  $n$  одиниць після розрахунку середнього рівня вільно варіюють лише  $(n - 1)$  число відхилень.

При розрахунку поясненої або факторної суми квадратів  $\sum(\hat{y}_x - \bar{y})^2$  використовуються теоретичні (розрахункові) значення результативної ознаки  $\hat{y}_x$ , знайдені за лінією регресії:  $\hat{y}_x = a + b \cdot x$ .

Сума квадратів відхилень, обумовлених лінійною регресією складе:

$$\sum(\hat{y}_x - \bar{y})^2 = b^2 \cdot (x - \bar{x})^2. \quad (1.10)$$

Оскільки при заданому обсязі спостережень по  $x$  і  $y$  факторна сума квадратів при лінійній регресії залежить тільки від однієї константи коефіцієнта регресії  $b$ , то дана сума квадратів має один ступінь свободи.

Існує рівність між числом ступенів свободи загальної, факторної і залишкової сум квадратів. Число ступенів свободи залишкової суми квадратів при лінійній регресії становить  $n - 2$ . Число ступенів свободи для загальної суми квадратів визначається числом одиниць, і оскільки використовується середня обчислена за даними вибірки, то втрачається один ступінь свободи, тобто  $df_{заг} = n - 1$ .

Отже:

$$\sum(y - \bar{y})^2 = \sum(\hat{y}_x - \bar{y})^2 + \sum(y - \hat{y}_x)^2, \quad (1.11)$$

$$n - 1 = 1 + (n - 2).$$

Розділивши кожен суму квадратів на відповідне їй число ступенів свободи, отримано середній квадрат відхилень, або дисперсію на одну ступінь свободи  $D$ :

$$D_{заг} = \frac{\sum(y - \bar{y})^2}{n - 1},$$

$$D_{факт} = \frac{\sum(\hat{y}_x - \bar{y})^2}{1}, \quad (1.12)$$

$$D_{\text{зал}} = \frac{\sum(y - \hat{y}_x)^2}{n-2}.$$

Визначення дисперсії на одну ступінь свободи призводить дисперсії до порівняного вигляду. Зіставляючи факторну і залишкову дисперсії в розрахунку на один ступінь свободи, отримано величину  $F$ -відношення ( $F$ -критерій):

$$F = \frac{D_{\text{факт}}}{D_{\text{зал}}}, \quad (1.13)$$

де  $F$  – критерій для перевірки нульової гіпотези  $H_0: D_{\text{факт}} = D_{\text{зал}}$ .

Якщо нульова гіпотеза справедлива, то факторна і залишкова дисперсії не відрізняються одна від одної. Для  $H_0$  необхідне спростування, щоб факторна дисперсія перевищувала залишкову в кілька разів. Англійським статистиком Снедекором розроблено таблиці критичних значень  $F$ -відношень при різних рівнях значимості нульової гіпотези і різній кількості ступенів свободи. Табличне значення  $F$ -критерію – це максимальна величина відношень дисперсій, яка може мати місце при випадковій їх розбіжності для даного рівня ймовірності наявності нульової гіпотези. Обчислене значення  $F$ -відношення визнається достовірним (відмінним від одиниці), якщо воно більше табличного. У цьому випадку нульова гіпотеза про відсутність зв'язку ознак відхиляється і робиться висновок про істотність цього зв'язку:  $F_{\text{факт}} > F_{\text{табл}}$ ;  $H_0$  відхиляється.

Якщо ж величина виявиться меншою табличній  $F_{\text{факт}} < F_{\text{табл}}$ , то ймовірність нульової гіпотези вище заданого рівня (наприклад, 0,05) і вона не може бути відхилена без серйозного ризику зробити неправильний висновок про наявність зв'язку. У цьому випадку рівняння регресії вважається статистично незначущим.  $H_0$  не відхиляється [5,6].

Рівняння нелінійної регресії, як і в лінійній залежності доповнюється показником кореляції, а саме індексом кореляції  $R$ :



$$R = \left(1 - \frac{\sigma_{\text{зал}}^2}{\sigma_y^2}\right)^{1/2}, \quad (1.14)$$

де  $\sigma_y^2$  – загальна дисперсія результативної ознаки  $y$ ;

$\sigma_{\text{зал}}^2$  – залишкова дисперсія, що визначається, виходячи з рівняння регресії  $\hat{y}_x = f(x)$ .

Так як  $\sigma_y^2 = \frac{1}{n} \cdot \sum (y - \bar{y})^2$ , а  $\sigma_{\text{зал}}^2 = \frac{1}{n} \cdot \sum (y - \hat{y}_x)^2$ , то індекс кореляції, тобто лінійний коефіцієнт кореляції, можна визначити за формулою:

$$R = \sqrt{1 - \frac{\sum (y - \hat{y}_x)^2}{\sum (y - \bar{y})^2}}. \quad (1.15)$$

Величина даного показника знаходиться в межах  $0 \leq R \leq 1$ , чим ближче до одиниці, тим тісніший зв'язок розглядуваних ознак, тим більш надійне знайдене рівняння регресії.

Враховуючи приведення нелінійної залежності між витратами електроенергії та об'ємами виготовленої продукції до логарифмічно лінійного вигляду  $\lg y = \lg a + b \cdot \lg x$ , лінійний коефіцієнт кореляції знайдено не для фактичних значень  $x$  та  $y$ , а для їх логарифмів.

Проте при розрахунку коефіцієнту кореляції використовуються суми квадратів відхилень ознаки  $y$ , а не їх логарифмів. З цією метою визначаються теоретичні значення результативної ознаки, тобто  $\hat{y}_x$ , як антилогарифм розрахованої за рівнянням величини  $\widehat{\lg y}_x$  і залишкова сума квадратів, як  $\sum (y - \text{antilog } \widehat{\lg y}_x)^2$ . Тобто, коефіцієнт кореляції для досліджуваної залежності визначається за формулою (1.16):

$$R_{yx} = \sqrt{1 - \frac{\sum (y - \text{antilog } \widehat{\lg y}_x)^2}{\sum (y - \bar{y})^2}}. \quad (1.16)$$

Оскільки в розрахунку індексу кореляції використовується відношення факторної і загальної суми квадратів відхилень, то  $R^2$  має той самий зміст, що й коефіцієнт детермінації. В спеціальних дослідження показник  $R^2$  для нелінійних зв'язків називають індексом детермінації.

Індекс детермінації також використовується для перевірки значимості рівняння нелінійної регресії в цілому за  $F$ -критерієм Фішера:

$$F = \frac{R^2}{1-R^2} \cdot \frac{n-m-1}{m}, \quad (1.17)$$

де  $R^2$  – індекс детермінації;

$n$  – число спостережень;

$m$  – число параметрів при змінних  $x$ .

Величина  $m$  характеризує число ступенів свободи для факторної суми квадратів, а  $(n - m - 1)$  – число ступенів свободи для залишкової суми квадратів.

Для досліджуваної степеневій функції  $m = 1$ , і формула  $F$ -критерія приймає той самий вигляд, що й для лінійної залежності:

$$F = \frac{R^2}{1-R^2} \cdot (n - 2). \quad (1.18)$$

Висновки робляться так само, як і в аналізі дисперсій. При цьому значення  $F$ -критерія може незначно відрізнитися тільки за рахунок округлень.

Так як фактичні значення результативної ознаки відрізняються від теоретичних, можна розрахувати середню помилку апроксимації, яка характеризує якість вибраної моделі.

Середня помилка апроксимації визначається за формулою:

$$A = \frac{1}{n} \cdot \sum \left| \frac{(y - \hat{y}_x)}{y} \right| \cdot 100. \quad (1.19)$$

Чим менше різниця між фактичними та теоретичними значення  $y$ , тим краще підібрана модель. Зазвичай, якісна модель характеризується помилкою апроксимації  $A$ , що знаходиться в межах 5–7%.

Також за кожним з параметрів визначається його стандартна помилка. Стандартна помилка коефіцієнту регресії  $b$  визначається за формулою:

$$m_b = \sqrt{\frac{\sum(y - \hat{y}_x)^2 / (n-2)}{\sum(x - \bar{x})^2}} = \sqrt{\frac{S^2}{\sum(x - \bar{x})^2}}, \quad (1.20)$$

де  $S^2$  — залишкова дисперсія на один ступінь свободи.

Величина стандартної помилки спільно з  $t$ -розподілом Стюдента при  $n - 2$  ступенях свободи застосовується для перевірки суттєвості коефіцієнта регресії та для розрахунку його довірчих інтервалів.

Для оцінки суттєвості коефіцієнта регресії його величина порівнюється з його стандартною помилкою, тобто визначається фактичне значення  $t$ -критерію Стюдента:  $t_b = \frac{b}{m_b}$ , яке потім порівнюється з табличним значенням при певному рівні значущості  $\alpha$  і числі ступенів свободи  $(n - 2)$  [7,8].

Цей результат також може бути отримано зі знайденого  $F$ -критерію:

$$t_b = \sqrt{F}. \quad (1.21)$$

Якщо фактичне значення  $t$ -критерію перевищують табличне, тоді гіпотезу про незначимість коефіцієнту регресії можна відхилити.

Довірчий інтервал для коефіцієнту регресії визначається, як  $b \pm t \cdot m_b$ .

Стандартна помилка параметру  $a$  визначається за формулою:

$$m_a = \sqrt{\frac{\sum(y - \hat{y}_x)^2}{n-2} \cdot \frac{\sum x^2}{n \cdot \sum(x - \bar{x})^2}} = \sqrt{S^2 \cdot \frac{\sum x^2}{n \cdot \sum(x - \bar{x})^2}}. \quad (1.22)$$

Процедура оцінки значимості даного параметру така саме, як і для параметру  $b$ ; обчислюється  $t$ -критерій:  $t_\alpha = \frac{a}{m_a}$ , його величина порівнюється з табличним значенням при  $df = n - 2$  ступінях свободи.

Стандартна помилка прогнозованого за лінією регресії значення визначається за формулою:

$$m_{\hat{y}_x} = S \cdot \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{(x_k - \bar{x})^2}{\sum(x - \bar{x})^2}}, \quad (1.23)$$

де  $x_k$  – значення змінної  $x$ .

Для прогнозного значення  $\hat{y}_{x_k}$  довірчі інтервали визначаються, як:

$$\hat{y}_{x_k} - t_\alpha \cdot m_{\hat{y}_x} \leq y^* \leq \hat{y}_{x_k} + t_\alpha \cdot m_{\hat{y}_x}. \quad (1.24)$$

Далі знаходиться ймовірність попадання прогнозних значень енергоспоживання в розрахований довірчий інтервал.

#### 1.4.2 Визначення достовірності прогнозування на перспективний період

В якості випадкової величини в даній магістерській роботі приймаються значення відхилень питомого енергоспоживання від середнього.

Враховуючи те, що величина відхилення може прийняти будь-яке значення на деякому скінченному інтервалі, ця величина вважається неперервною.

Законом розподілу випадкової величини є співвідношення, що встановлює зв'язок між можливими значеннями випадкової величини і відповідними до них ймовірностями [9].

Тобто закон розподілу необхідний для знаходження ймовірності потрапляння величини відхилення питомого енергоспоживання в заданий інтервал.

Зважаючи на те, що закон розподілу величини відхилення питомого енергоспоживання від середнього його значення є невідомим, висувається та перевіряється нульова гіпотеза: генеральна сукупність відхилень розподілена за нормальним законом.

Перевірка гіпотези про можливий закон невідомого розподілу проводиться за допомогою спеціально підібраної величини — критерію згоди.

Для перевірки нормального закону розподілу величини відхилення енергоспоживання від середнього застосовано критерій  $\chi^2$  (“хі квадрат”) К. Пірсона, перевага якого полягає в застосуванні і для інших розподілів.

Перевірка гіпотези про нормальний розподіл генеральної сукупності при заданому рівні значущості  $\alpha$  проводиться за наступним алгоритмом.

Спочатку методом добутків обчислюються вибіркова середня  $\bar{x}_B$  та вибіркоче середнє квадратичне відхилення  $\sigma_B$ .

Якщо початкові варіанти вибірки не є рівновіддаленими, то інтервал, в якому вони знаходяться, ділять на декілька рівних, довжини  $h$ , часткових інтервалів (кожен частковий інтервал повинен містити не менше 5 варіант), і знаходять середини часткових інтервалів. В якості частоти кожної середини інтервалу приймають суму частот варіант, які попали у відповідний частковий інтервал [10].

Вибіркову середню та дисперсію знаходять за формулами:

$$\bar{x}_B = M_1^* h + C; \quad (1.25)$$

$$D_B = [M_2^* - (M_1^*)^2] \cdot h^2, \quad (1.26)$$

де  $h$  – крок (різниця між двома сусідніми варіантами);

$C$  – хибний нуль (варіанта, яка розміщена приблизно в середині варіаційного ряду);

$u_i = (x_i - C)/h$  – умовна варіанта;

$M_1^* = (\sum n_i u_i)/n$  – умовний момент першого порядку;

$M_2^* = (\sum n_i u_i^2)/n$  – умовний момент другого порядку.

При обчисленні вибіркової дисперсії для зменшення помилки, викликаної групуванням, роблять поправку Шепарда, тобто віднімають з обчисленої дисперсії  $1/12$  квадрата довжини часткового інтервалу, тобто дисперсія обчислюється за формулою:

$$D'_B = D_B - \left(\frac{1}{12}\right) \cdot h^2. \quad (1.27)$$

Для знаходження вибіркового середнього квадратичного відхилення беруть корінь квадратний з вибіркової дисперсії за формулою:

$$\sigma_B = \sqrt{D'_B}. \quad (1.28)$$

Далі за допомогою обчислених вибіркової середньої  $\bar{x}_B$  та вибіркового середнього квадратичного відхилення  $\sigma_B$  нормують випадкову величину  $X$ , тобто переходять до величини  $Z = (X - \bar{x}_B)/\sigma_B$  і обчислюють кінці інтервалів  $(z_i, z_{i+1})$  за формулами:

$$z_i = (x_i - \bar{x}_B)/\sigma_B, \quad (1.29)$$

$$z_{i+1} = (x_{i+1} - \bar{x}_B)/\sigma_B. \quad (1.30)$$

Теоретичні ймовірності  $p_i$  потрапляння  $X$  в інтервали  $(x_i, x_{i+1})$  знаходяться за формулою:

$$p_i = \phi(z_{i+1}) - \phi(z_i), \quad (1.31)$$

де  $\phi(z)$  – функція Лапласа.

Теоретичні частоти знаходяться за формулою:

$$n'_i = np_i. \quad (1.32)$$

Завершальним етапом перевірки нульової гіпотези є порівняння емпіричних та теоретичних частот за допомогою критерію Пірсона, для чого:

а) складають розрахункову таблицю, за якою знаходять спостережуване значення критерію:

$$\chi^2_{\text{спост}} = \sum \frac{(n_i - n'_i)^2}{n'_i}; \quad (1.33)$$

б) за таблицею критичних точок розподілу  $\chi^2$ , за заданим рівнем значущості  $\alpha$  і числу ступенів свободи  $k = s - 3$ , де  $s$  – число груп вибірки, знаходять критичну точку  $\chi^2_{\text{кр}}(\alpha; k)$  області прийняття нульової гіпотези.

Якщо  $\chi^2_{\text{спост}} < \chi^2_{\text{кр}}$  – немає підстав відхилити гіпотезу про нормальний розподіл генеральної сукупності, тобто, емпіричні та теоретичні частоти відрізняються несуттєво (випадково).

Якщо  $\chi^2_{\text{спост}} > \chi^2_{\text{кр}}$  – гіпотезу відхиляють, тобто емпіричні та теоретичні частоти відрізняються суттєво.

Також для перевірки нормального закону розподілу за дослідними даними будують нормальну криву, для чого в прямокутній системі координат будують точки  $(x_i; y_i)$ , де  $y_i$  – вирівнюючі частоти, та з'єднують їх кривою [11].

Головною особливістю нормального закону є те, що він є граничним, до якого наближаються усі інші закони розподілу при типових умовах. Нормальний закон ймовірності характеризується густиною розподілу ймовірності, тобто, похідною від функції розподілу випадкової величини, що характеризує щільність, з якою розподіляються значення випадкової величини.

Неперервна величина  $X$  має нормальний закон розподілу (закон Гауса) з параметрами  $a$  і  $\sigma^2$ , якщо її густина ймовірностей має вигляд:

$$\varphi_N(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}}. \quad (1.34)$$

Для нормального розподілу параметр  $a$  характеризує положення центру кривої густини ймовірностей і дорівнює величині вибіркової середньої  $\bar{x}_B$ ; а параметр  $\sigma^2$  – її форму і дорівнює величині вибіркової дисперсії  $D'_B$ .

Функція розподілу нормального закону має вигляд:

$$F(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-(x-a)^2/(2\sigma^2)} dx. \quad (1.35)$$

Густину ймовірностей та функцію їх розподілу зображено на рисунку 1.2.

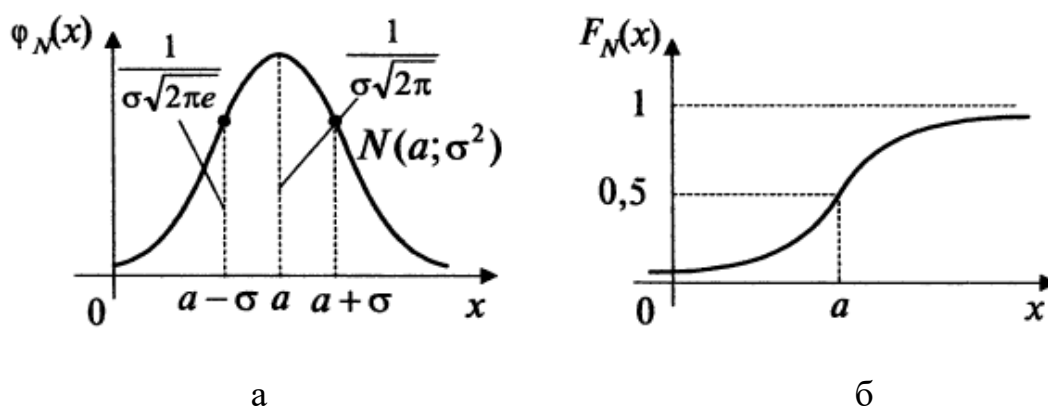


Рисунок 1.2 – Нормальна крива розподілу  $\varphi_N(x)$  (а) і графік функції розподілу (б)

Для перевірки закону розподілу можна скористатися “правилом трьох сигм”: якщо випадкова величина  $X$  має нормальний закон розподілу з параметрами  $a$  і  $\sigma^2$ , тобто  $N(a; \sigma^2)$ , то практично достовірно, що її значення укладені в інтервалі  $(a - 3\sigma; a + 3\sigma)$ , як зображено на рисунку 1.3 [12, 13].



На рисунку 1.3 наведено приклад графічного зображення “правила трьох сигм”.

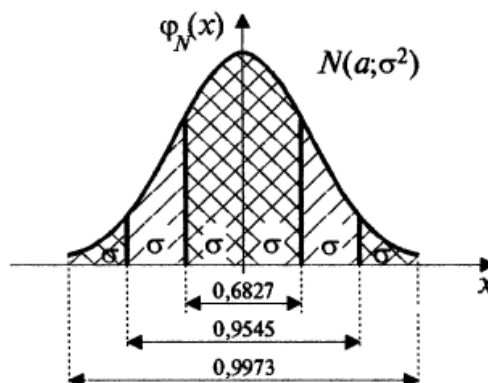


Рисунок 1.3 – Графічне зображення “правила трьох сигм”

Порушення “правила трьох сигм”, тобто відхилення нормально розподіленої величини  $X$  більше, ніж на  $3\sigma$  (по абсолютній величині), є подією практично неможливою, адже її ймовірність досить мала:

$$P(|X - a| > 3\sigma) = 1 - P(|X - a| \leq 3\sigma) = 1 - 0,9973 = 0,0027. \quad (1.36)$$

Ймовірність того, що випадкова величина  $X$  прийме значення, яке належить інтервалу  $(\alpha; \beta)$ , складає:

$$P(\alpha < X < \beta) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{\alpha}^{\beta} e^{-(x-a)^2/(2\sigma^2)} dx. \quad (1.37)$$

Перетворивши цю формулу так, щоб можна було користуватися готовими таблицями, отримано:

$$P(\alpha < X < \beta) = \Phi\left(\frac{\beta-a}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{\alpha-a}{\sigma}\right), \quad (1.38)$$

де  $\Phi\left(\frac{\beta-a}{\sigma}\right)$  і  $\Phi\left(\frac{\alpha-a}{\sigma}\right)$  – функції Лапласа.

Враховуючи відсутність конкретної методики визначення прогнозованого електричного навантаження та величини його ймовірності, в магістерській роботі запропоновано використання певного алгоритму, який може бути використано на будь-яких інших підприємствах.

Таким чином, в роботі поставлено наступні задачі:

1. Дослідити зв'язок між об'ємами виготовленої продукції та відповідними витратами електричної енергії:
  - визначити рівняння регресії, яке описує дану залежність;
  - провести оцінку значущості рівняння в цілому та окремих його параметрів.
2. Спрогнозувати витрати електричної енергії за даними бізнес плану в залежності від запланованих об'ємів виготовленої продукції на перспективний період.
3. Оцінити достовірність прогнозу енерговитрат:
  - перевірити гіпотезу про нормальний закон розподілу відхилень величин питомого енергоспоживання від середнього;
  - визначити ймовірність потрапляння величини прогнозованого енергоспоживання в розраховані довірчі інтервали.
4. Розрахувати економічний ефект від прогнозування та впровадження такого технічного рішення, як покращення роботи компресорного обладнання при встановленні пристроїв плавного запуску.

## 2 ПРОГНОЗУВАННЯ ВИТРАТ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ЙОГО ДОСТОВІРНОСТІ

### 2.1 Характеристика виробництва киснево-компресорного цеху ПАТ «ЗАПОРІЖСТАЛЬ»

Публічне акціонерне товариство «Запоріжсталь» є одним з провідних підприємств металургійної галузі в Україні, продукція якого є відомою більш ніж у 100 країнах світу, і входить до п'ятірки найбільших підприємств України за обсягом виробництва.

Комбінат є виробником високоякісної металопродукції – чавуну, сталі, листового прокату з вуглецевих, низьколегованих, легованих і нержавіючих сталей, гнутого профілю, жерсті, будівельних матеріалів і товарів народного споживання.

До складу металургійного виробництва входять агломераційний (6 агломашин), доменний (4 доменних печей), мартенівський (9 печей) цехи і цех підготовки сталерозливних складів.

Киснево-компресорний цех виробляє допоміжну продукцію, таку, як: кисень, стиснене повітря, аргон і азот, проте він є одним з найбільш енергоємних цехів підприємства.

Найбільш енергоємним процесом є виготовлення технічного кисню. Середні питомі витрати електроенергії на виготовлення 1000 м<sup>3</sup> даного виду продукції складають 582 кВт·год.

Технічний газоподібний кисень застосовується в газоплазмових процесах обробки металів, зварювання, поверхневого гартування, кисневої різки, металізації та інших процесах. Широке застосування технічний кисень знаходить в хімічній промисловості при отриманні штучного рідкого палива, мастил, ряду кислот, аміачних добрив і інших продуктів, в металургії – для інтенсифікації ряду металургійних процесів в доменному, сталеплавильному та інших виробництвах [14].

Середні питомі витрати на виготовлення 1000 м<sup>3</sup> іншої продукції, а саме: стисненого повітря, азоту і аргону, складають 134 кВт·год.

Головна функція стисненого повітря в металургії – дуття, тобто подача його в різні агрегати – домни, мартени, конвертори, що вкрай необхідно для горіння у всіх металургійних процесах.

Азот застосовується в якості захисного середовища, що обгороджує технологічні процеси від впливу повітря і його окислювальних складових (волога, кисень, вуглекислий газ), зокрема для: створення захисного середовища при вакуумній дегазації розплавів; створення інертного середовища для безперервного розливання сталі, а також у процесах рафінування при виробництві алюмінію.

Аргон застосовується при виробництві високоякісних металів і сплавів, в процесах, що вимагають виключення контакту розплавленого металу, як з повітрям, так і з його основними складовими – азотом і киснем. Таких як: виплавка спеціальних сортів сталі в умовах вакууму зі створенням захисної інертного середовища; гаряча обробка титану, танталу, ніобію, берилію, цирконію, гафнію, вольфраму; процеси видалення газових включень (дегазація) з рідкої сталі; розливання сталі в аргонівій атмосфері.

Загальні середні витрати електричної енергії на виготовлення даної продукції складають 80000 тис. кВт·год на місяць, або 960 млн. кВт·год на рік.

Таким чином, зважаючи на високе енергоспоживання киснево-компресорним цехом, виникає необхідність у прогнозуванні витрат при зміні об'ємів виробництва, адже неточний або приблизний розрахунок перспективних витрат електроенергії може призвести до значних матеріальних збитків.

## 2.2 Прогнозування витрат електричної енергії на виробництво кисню

Для оцінки параметрів регресійного рівняння, яке має вигляд степеневі функції  $y = a \cdot x^b \cdot \varepsilon$ , за методом найменших квадратів необхідно скласти розрахункову таблицю 2.1.

Для зручності місяці з 2014 року до вересня 2018 року пронумеровано за зростанням, де  $x_i^* = \lg x_i$  – об'єми виготовленого кисню, а  $y_i^* = \lg y_i$  – витрати електроенергії на виготовлення цих об'ємів за місяць.

Оцінки параметрів  $a^*$  і  $b^*$  знайдено за формулами (1.7) та (1.8):

$$a^* = \frac{241,001 \cdot 1159,495 - 1096,822 \cdot 254,780}{56 \cdot 1159,495 - 254,780^2} = -0,4618;$$

$$b^* = \frac{1096,822 - (-0,4618) \cdot 254,780}{1159,495} = 1,047$$

Отже, параметри регресійного рівняння для залежності між об'ємами виготовленого кисню та відповідними витратами електроенергії складають:

$$a = 10^{-0,4618} = 0,345;$$

$$b = b^* = 1,047;$$

а рівняння регресії відповідно має вигляд:

$$y = 0,345x^{1,047}.$$

Зображення кривої регресії на кореляційному полі представлено на рисунку 2.1.

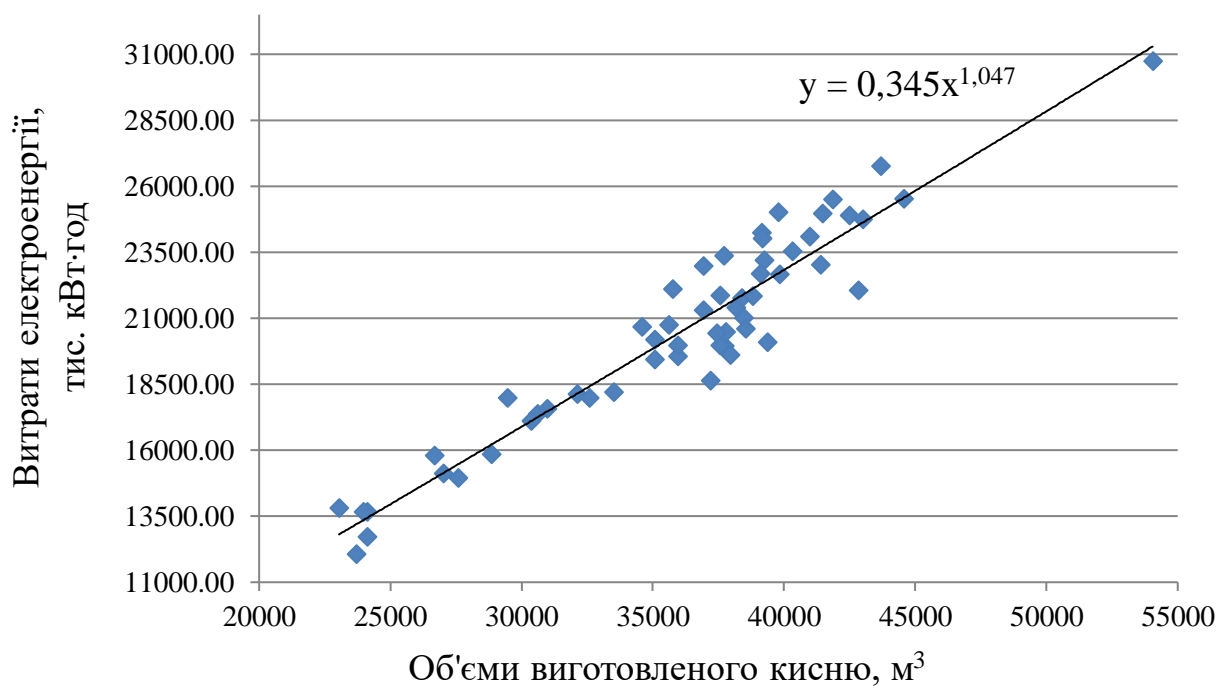


Рисунок 2.1 – Графічне представлення кривої регресії

Таблиця 2.1 – Розрахункові дані для оцінки параметрів рівняння регресії для виготовлення кисню.

№ п/п	$x_i$	$y_i$	$x_i^*$	$y_i^*$	$x_i^* \cdot y_i^*$	$x_i^{*2}$	$\hat{y}_{x_i^*}$	$(y_i^* - \hat{y}_{x_i^*})^2$	$(y_i^* - \bar{y}_{x_i^*})^2$	$(\hat{y}_{x_i^*} - \bar{y}_{x_i^*})^2$	A	$(x_i^* - \bar{x}_{x_i^*})^2$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	54043	30736,740	4,733	4,488	21,239	22,399	4,495	0,000059	0,03388	0,03678	0,00172	0,03353
2	42479	24887,851	4,628	4,396	20,345	21,420	4,386	0,000103	0,00854	0,00677	0,00231	0,00617
3	36923	21303,316	4,567	4,328	19,769	20,860	4,322	0,000041	0,00062	0,00034	0,00147	0,00031
4	35063	19431,774	4,545	4,289	19,491	20,656	4,299	0,000101	0,00023	0,00003	0,00235	0,00002
5	35943	19561,475	4,556	4,291	19,550	20,754	4,310	0,000340	0,00015	0,00004	0,00430	0,00004
6	40967	24090,890	4,612	4,382	20,211	21,275	4,369	0,000156	0,00613	0,00433	0,00285	0,00394
7	38161	21399,010	4,582	4,330	19,840	20,991	4,337	0,000045	0,00072	0,00112	0,00154	0,00102
8	30617	17371,351	4,486	4,240	19,020	20,124	4,237	0,000009	0,00406	0,00445	0,00069	0,00405
9	24124	13661,807	4,382	4,136	18,124	19,206	4,128	0,000050	0,02825	0,03066	0,00170	0,02795
10	24130	12722,687	4,383	4,105	17,989	19,207	4,129	0,000576	0,03960	0,03062	0,00585	0,02791
11	23970	13663,044	4,380	4,136	18,112	19,181	4,126	0,000100	0,02824	0,03169	0,00242	0,02889
12	26676	15807,291	4,426	4,199	18,585	19,591	4,174	0,000607	0,01097	0,01674	0,00587	0,01526
13	27588	14943,482	4,441	4,174	18,538	19,720	4,190	0,000227	0,01667	0,01301	0,00361	0,01186
14	40321	23533,997	4,606	4,372	20,134	21,211	4,362	0,000092	0,00464	0,00343	0,00219	0,00312
15	30371	17104,522	4,482	4,233	18,975	20,092	4,233	0,00000001	0,00497	0,00495	0,00003	0,00451
16	23712	12054,375	4,375	4,081	17,855	19,140	4,121	0,001559	0,04948	0,03347	0,00968	0,03051
17	23042	13797,227	4,363	4,140	18,060	19,032	4,108	0,001037	0,02683	0,03841	0,00778	0,03501
18	27028	15111,787	4,432	4,179	18,522	19,641	4,180	0,000001	0,01544	0,01523	0,00021	0,01388
19	36927	22982,848	4,567	4,361	19,920	20,861	4,322	0,001542	0,00334	0,00034	0,00900	0,00031
20	33512	18189,509	4,525	4,260	19,277	20,477	4,278	0,000330	0,00191	0,00065	0,00426	0,00060
21	38472	21019,793	4,585	4,323	19,820	21,024	4,341	0,000329	0,00036	0,00138	0,00420	0,00126
22	41866	25504,600	4,622	4,407	20,367	21,362	4,379	0,000750	0,01062	0,00572	0,00621	0,00522
23	37196	18641,371	4,570	4,270	19,518	20,889	4,325	0,003020	0,00110	0,00048	0,01287	0,00044
24	32120,340	18132,767	4,507	4,258	19,192	20,311	4,259	0,000000	0,00204	0,00201	0,00005	0,00184
25	35620,873	20734,768	4,552	4,317	19,648	20,718	4,306	0,000120	0,00017	0,00000	0,00254	0,00000
26	28852,000	15854,924	4,460	4,200	18,733	19,893	4,210	0,000094	0,01070	0,00878	0,00231	0,00800
27	37725,500	19946,830	4,577	4,300	19,679	20,946	4,332	0,001023	0,00001	0,00080	0,00744	0,00073
28	30980,145	17568,716	4,491	4,245	19,063	20,170	4,242	0,000006	0,00346	0,00376	0,00059	0,00343

Продовження таблиці 2.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
29	43695,774	26767,856	4,640	4,428	20,546	21,534	4,399	0,000836	0,01538	0,00905	0,00653	0,00825
30	44573,462	25529,272	4,649	4,407	20,489	21,614	4,408	0,000000	0,01070	0,01085	0,00016	0,00989
31	42833,500	22051,371	4,632	4,343	20,118	21,453	4,390	0,002134	0,00159	0,00740	0,01063	0,00675
32	35065,313	20198,883	4,545	4,305	19,567	20,656	4,299	0,000045	0,00000	0,00002	0,00156	0,00002
33	35744,998	22098,130	4,553	4,344	19,781	20,732	4,307	0,001371	0,00166	0,00001	0,00852	0,00001
34	39839,028	22657,889	4,600	4,355	20,035	21,163	4,357	0,000002	0,00267	0,00282	0,00033	0,00257
35	39360,901	20092,795	4,595	4,303	19,773	21,115	4,351	0,002316	0,00000	0,00226	0,01118	0,00206
36	42995,582	24750,665	4,633	4,394	20,357	21,469	4,391	0,000005	0,00810	0,00770	0,00051	0,00702
37	38384,433	21772,648	4,584	4,338	19,886	21,014	4,340	0,000003	0,00118	0,00131	0,00042	0,00119
38	34595,715	20670,455	4,539	4,315	19,587	20,603	4,292	0,000524	0,00014	0,00012	0,00530	0,00011
39	39146,843	24228,999	4,593	4,384	20,136	21,093	4,349	0,001271	0,00652	0,00203	0,00813	0,00185
40	41454,560	24967,087	4,618	4,397	20,305	21,322	4,375	0,000512	0,00880	0,00506	0,00515	0,00462
41	39776,184	25006,730	4,600	4,398	20,229	21,157	4,356	0,001774	0,00893	0,00274	0,00958	0,00250
42	37718,595	23357,089	4,577	4,368	19,992	20,945	4,332	0,001342	0,00420	0,00080	0,00839	0,00072
43	37959,630	19611,311	4,579	4,293	19,657	20,970	4,335	0,001778	0,00012	0,00097	0,00982	0,00088
44	37776,264	20469,673	4,577	4,311	19,733	20,951	4,332	0,000456	0,00006	0,00083	0,00496	0,00076
45	37571,763	19957,595	4,575	4,300	19,672	20,929	4,330	0,000894	0,00001	0,00070	0,00695	0,00064
46	37430,943	20424,044	4,573	4,310	19,711	20,914	4,328	0,000330	0,00004	0,00061	0,00421	0,00056
47	29463,834	17983,133	4,469	4,255	19,016	19,975	4,219	0,001256	0,00237	0,00708	0,00833	0,00646
48	37560,331	21863,343	4,575	4,340	19,853	20,928	4,330	0,000097	0,00131	0,00069	0,00227	0,00063
49	39164,970	24016,586	4,593	4,381	20,119	21,095	4,349	0,001000	0,00592	0,00205	0,00722	0,00187
50	32589,964	17984,315	4,513	4,255	19,203	20,368	4,265	0,000108	0,00237	0,00147	0,00245	0,00134
51	41397,230	23032,839	4,617	4,362	20,141	21,316	4,374	0,000138	0,00345	0,00497	0,00270	0,00453
52	38545,144	20601,454	4,586	4,314	19,783	21,031	4,342	0,000770	0,00011	0,00145	0,00643	0,00132
53	38802,882	21838,495	4,589	4,339	19,912	21,058	4,345	0,000030	0,00127	0,00169	0,00126	0,00154
54	39237,397	23187,575	4,594	4,365	20,053	21,102	4,350	0,000241	0,00380	0,00213	0,00356	0,00194
55	39088,928	22690,185	4,592	4,356	20,002	21,087	4,348	0,000061	0,00273	0,00197	0,00180	0,00180
56	35940,367	19956,823	4,556	4,300	19,589	20,753	4,310	0,000094	0,00001	0,00004	0,00226	0,00004
Σ	2016144,393	1147525,992	254,780	241,001	1096,822	1159,495	241,001	0,031706	0,40657	0,37486	0,24662	0,34169



Для оцінки суттєвості рівняння регресії проведено аналіз дисперсій, для чого за формулою (1.12) розраховано загальну, факторну та залишкову дисперсії:

$$D_{заг} = 0,40675;$$

$$D_{факт} = 0,374860;$$

$$D_{зал} = \frac{0,03171}{56-2} = 0,00058710.$$

$F$ -критерій Фішера за формулою (1.13) відповідно складає:

$$F_{факт} = \frac{0,37486}{0,0005871} = 638,453.$$

Для перевірки нульової гіпотези  $H_0$  необхідно порівняти розрахункове та табличне значення  $F$ -критерію для рівня значимості  $\alpha=0,05$  та  $\alpha=0,01$  при ступенях свободи  $\nu_1=1$  та  $\nu_2=54$ , яке складає:

$$F_{\alpha=0,05} = 4,01954;$$

$$F_{\alpha=0,01} = 7,241.$$

Так як  $F_{факт} > F_{табл}$  ( $638,453 > 4,0195$  і  $638,453 > 7,241$ ), гіпотеза  $H_0$  відхиляється, а отже, рівняння регресії є значимим, та зв'язок між об'ємами виготовленого кисню та відповідними витратами електроенергії доведено.

Для оцінки тісноти та надійності зв'язку за лінійним рівнянням регресії для логарифмів  $y$  за формулою (1.15) розраховано індекс кореляції, який становить:

$$R = \sqrt{1 - \frac{0,03176}{0,40657}} = 0,96.$$

Коефіцієнт кореляції для степеневі функції за формулою (1.16) відповідно становить:

$$R_{yx} = \sqrt{1 - \frac{73126816,891}{804532234,777}} = 0,953.$$

Так як даний індекс кореляції наближається до 1, це свідчить про те, що зв'язок є сильним, а рівняння регресії є надійним.

Для оцінки долі дисперсії, поясненої рівнянням регресії, розраховано коефіцієнт детермінації, який свідчить про правильність підбраної моделі регресії:

$$R^2 = 0,953^2 = 0,91.$$

Для перевірки значимості рівняння нелінійної регресії в цілому за допомогою індексу детермінації за формулою (1.18) розраховано  $F$ -критерій Фішера, який дорівнює  $F$ -відношенню, розрахованому за допомогою аналізу дисперсій:

$$F = \frac{0,922^2}{1-0,922^2} \cdot (56 - 2) = 638,308.$$

Середня помилка апроксимації визначається за формулою (1.19) і складає 0,44%, що говорить про високу якість підбраної моделі регресії.

Стандартна помилка коефіцієнту регресії  $b$  за формулою (1.20) становить:

$$m_b = \sqrt{\frac{0,0005871}{0,34169}} = 0,041.$$

Фактичне значення t-критерію Стьюдента при табличному  $t_{b_{\text{табл}}} = 2,00492$  становить:

$$t_b = \frac{1,047}{0,041} = 25,268$$

або:

$$t_b = \sqrt{638,453} = 25,268.$$

Так як  $t_b > t_{b_{\text{табл}}}$  ( $25,268 > 2,00492$ ), гіпотезу про не значимість коефіцієнту регресії можна відхилити.

Довірчий інтервал для коефіцієнту регресії  $b$  складає:

$$1,047 - 2,005 \cdot 0,0415 \leq b \leq 1,047 + 2,005 \cdot 0,0415;$$

$$0,9638 \leq b \leq 1,13.$$

Стандартна помилка коефіцієнту регресії  $a$  за формулою (1.22) становить:

$$m_a = \sqrt{0,0005871 \cdot \frac{1159,495}{56 \cdot 0,34169}} = 0,1886.$$

Фактичне значення t-критерію Стьюдента при табличному  $t_{a_{\text{табл}}} = 2,00492$  становить:

$$t_a = \left| \frac{-0,4618}{0,1886} \right| = 2,448.$$

Так як  $t_a > t_{a_{\text{табл}}}$  ( $2,448 > 2,00492$ ), гіпотезу про незначимість коефіцієнту регресії можна відхилити.

Довірчий інтервал для коефіцієнту регресії  $a^*$  складає:

$$-0,4618 - 2,005 \cdot 0,1886 \leq a^* \leq -0,4618 + 2,005 \cdot 0,1886;$$

$$-0,84 \leq a^* \leq -0,0837.$$

Довірчий інтервал для коефіцієнту регресії  $a$  складає:

$$10^{-0,84} \leq a \leq 10^{-0,0837};$$

$$0,145 \leq a \leq 0,825.$$

Помилка прогнозованого індивідуального значення  $y^*$  визначається за формулою (1.23) і для кожного значення об'єму виготовленого кисню  $x_k$  становить:

$$m_{\hat{y}_x} = 0,024 \cdot \sqrt{\frac{1}{56} + \frac{(x_k - 4,55)^2}{0,342}}.$$

Для прогнозного значення  $y^*$  довірчі інтервали визначаються за формулою (1.24) і становлять:

$$\hat{y}_{x_k} - 2,005 \cdot m_{\hat{y}_x} \leq y^* \leq \hat{y}_{x_k} + 2,005 \cdot m_{\hat{y}_x};$$

де:  $x_i$  – об'єми кисню, необхідні для виготовлення, тис. м<sup>3</sup>;

$y_{i_{пл}}$  – планові витрати електроенергії на виготовлення  $x_i$  об'ємів кисню при питомих витратах  $w_l = 0,58$  кВт·год/ м<sup>3</sup>, тис. кВт·год;

$y_{i_{пр}}$  – прогнозовані витрати електроенергії на виготовлення  $x_i$  об'ємів кисню за рівнянням регресії, тис. кВт·год;

$m_{\hat{y}_x}$  – помилка прогнозованого індивідуального значення  $y^*$ ;  
 $y_1; y_2$  – нижній і верхній довірчі інтервали, відповідно, тис. кВт·год;  
 $w_1; w_2$  – питоме енергоспоживання для нижнього і верхнього довірчих інтервалів, відповідно, кВт·год/ м<sup>3</sup>.

Розрахунок прогнозного енергоспоживання ККЦ в залежності від об'ємів виготовленого кисню за даними бізнес плану на 2019 – 2022 роки за місяцями приведено в таблиці 2.2.

Аналіз даних таблиці 2.6 показав, що прогнозні значення енергоспоживання на перспективу значно відрізняються від планових:

$$\sum y_{i_{\text{пр}}} < \sum y_{i_{\text{пл}}};$$

$$1142572,416 < 1159176,980 \text{ (тис. кВт·год)}.$$

Таким чином, заявка на замовлення електричного навантаження киснево-компресорним цехом ПАТ «Запоріжсталь» буде меншою на 16504,564 тис. кВт·год в порівнянні з плановими витратами.

Графік прогнозного енергоспоживання за даними бізнес плану на 2019 – 2022 роки для необхідних для виготовлення об'ємів кисню з урахуванням планових витрат та довірчих інтервалів за місяцями зображено на рисунку 2.2.

Аналіз графіку показав, що планові витрати електроенергії входять до визначених довірчих інтервалів, проте їх ймовірність значно нижча за ймовірність очікуваних прогнозованих витрат.

Таблиця 2.2 – Розрахунок прогнозного енергоспоживання ККЦ за даними Бізнес плану на 2019 – 2022 роки

Місяць	$x_i$	$y_{i_{пл}}$	$y_{i_{пр}}$	$m_{\hat{y}_x}$	$y_1$	$y_2$	$w_1$	$w_2$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	42586	24699,880	24371,972	0,00457	23946,837	24804,655	0,562	0,582
2	42215	24484,700	24149,631	0,00446	23738,405	24567,981	0,562	0,582
3	42105	24420,900	24083,725	0,00443	23676,556	24497,897	0,562	0,582
4	41558	24103,640	23756,117	0,00427	23368,640	24150,017	0,562	0,581
5	41555	24101,900	23754,320	0,00427	23366,950	24148,112	0,562	0,581
6	41269	23936,020	23583,111	0,00419	23205,701	23966,660	0,562	0,581
7	42501	24650,580	24321,023	0,00454	23899,105	24750,390	0,562	0,582
8	43236	25076,880	24761,740	0,00476	24311,440	25220,381	0,562	0,583
9	42789	24817,620	24493,670	0,00463	24060,781	24934,347	0,562	0,583
10	42819	24835,020	24511,657	0,00464	24077,614	24953,524	0,562	0,583
11	42114	24426,120	24089,117	0,00443	23681,617	24503,630	0,562	0,582
12	41617	24137,860	23791,443	0,00429	23401,882	24187,488	0,562	0,581
13	40980	23768,400	23410,163	0,00411	23042,570	23783,621	0,562	0,580
14	41130	23855,400	23499,921	0,00415	23127,265	23878,583	0,562	0,581
15	41563	24106,540	23759,110	0,00427	23371,458	24153,192	0,562	0,581
16	42369	24574,020	24241,912	0,00450	23824,954	24666,168	0,562	0,582
17	42225	24490,500	24155,623	0,00446	23744,026	24574,354	0,562	0,582
18	42236	24496,880	24162,214	0,00446	23750,209	24581,365	0,562	0,582
19	42213	24483,540	24148,433	0,00446	23737,280	24566,706	0,562	0,582
20	41252	23926,160	23572,936	0,00418	23196,110	23955,884	0,562	0,581
21	41625	24142,500	23796,233	0,00429	23406,389	24192,570	0,562	0,581
22	41235	23916,300	23562,761	0,00418	23186,519	23945,109	0,562	0,581
23	41562	24105,960	23758,511	0,00427	23370,894	24152,557	0,562	0,581
24	42102	24419,160	24081,928	0,00443	23674,869	24495,986	0,562	0,582

Продовження таблиці 2.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9
25	42123	24431,340	24094,509	0,00443	23686,678	24509,363	0,562	0,582
26	42252	24506,160	24171,801	0,00447	23759,203	24591,564	0,562	0,582
27	41236	23916,880	23563,360	0,00418	23187,083	23945,743	0,562	0,581
28	41252	23926,160	23572,936	0,00418	23196,110	23955,884	0,562	0,581
29	41263	23932,540	23579,520	0,00419	23202,316	23962,856	0,562	0,581
30	41259	23930,220	23577,126	0,00419	23200,059	23960,321	0,562	0,581
31	41256	23928,480	23575,330	0,00418	23198,367	23958,419	0,562	0,581
32	41321	23966,180	23614,236	0,00420	23235,033	23999,628	0,562	0,581
33	41121	23850,180	23494,536	0,00415	23122,184	23872,883	0,562	0,581
34	41041	23803,780	23446,663	0,00413	23077,019	23822,228	0,562	0,580
35	40684	23596,720	23233,086	0,00403	22875,277	23596,492	0,562	0,580
36	40976	23766,080	23407,770	0,00411	23040,311	23781,090	0,562	0,580
37	41065	23817,700	23461,024	0,00413	23090,570	23837,422	0,562	0,580
38	41256	23928,480	23575,330	0,00418	23198,367	23958,419	0,562	0,581
39	41546	24096,680	23748,932	0,00427	23361,878	24142,398	0,562	0,581
40	41345	23980,100	23628,602	0,00421	23248,568	24014,848	0,562	0,581
41	41164	23875,120	23520,269	0,00416	23146,455	23900,120	0,562	0,581
42	41238	23918,040	23564,557	0,00418	23188,212	23947,010	0,562	0,581
43	41569	24110,020	23762,703	0,00427	23374,839	24157,002	0,562	0,581
44	41053	23810,740	23453,844	0,00413	23083,795	23829,825	0,562	0,580
45	41685	24177,300	23832,161	0,00431	23440,186	24230,691	0,562	0,581
46	41536	24090,880	23742,945	0,00426	23356,243	24136,048	0,562	0,581
47	41256	23928,480	23575,330	0,00418	23198,367	23958,419	0,562	0,581
48	41228	23912,240	23558,572	0,00418	23182,570	23940,673	0,562	0,581

На рисунку 2.2 зображено графік прогнозного енергоспоживання за даними бізнес плану на 2019 – 2022 роки, необхідного для виготовлення об'ємів кисню з урахуванням планових витрат та довірчих інтервалів за місяцями.

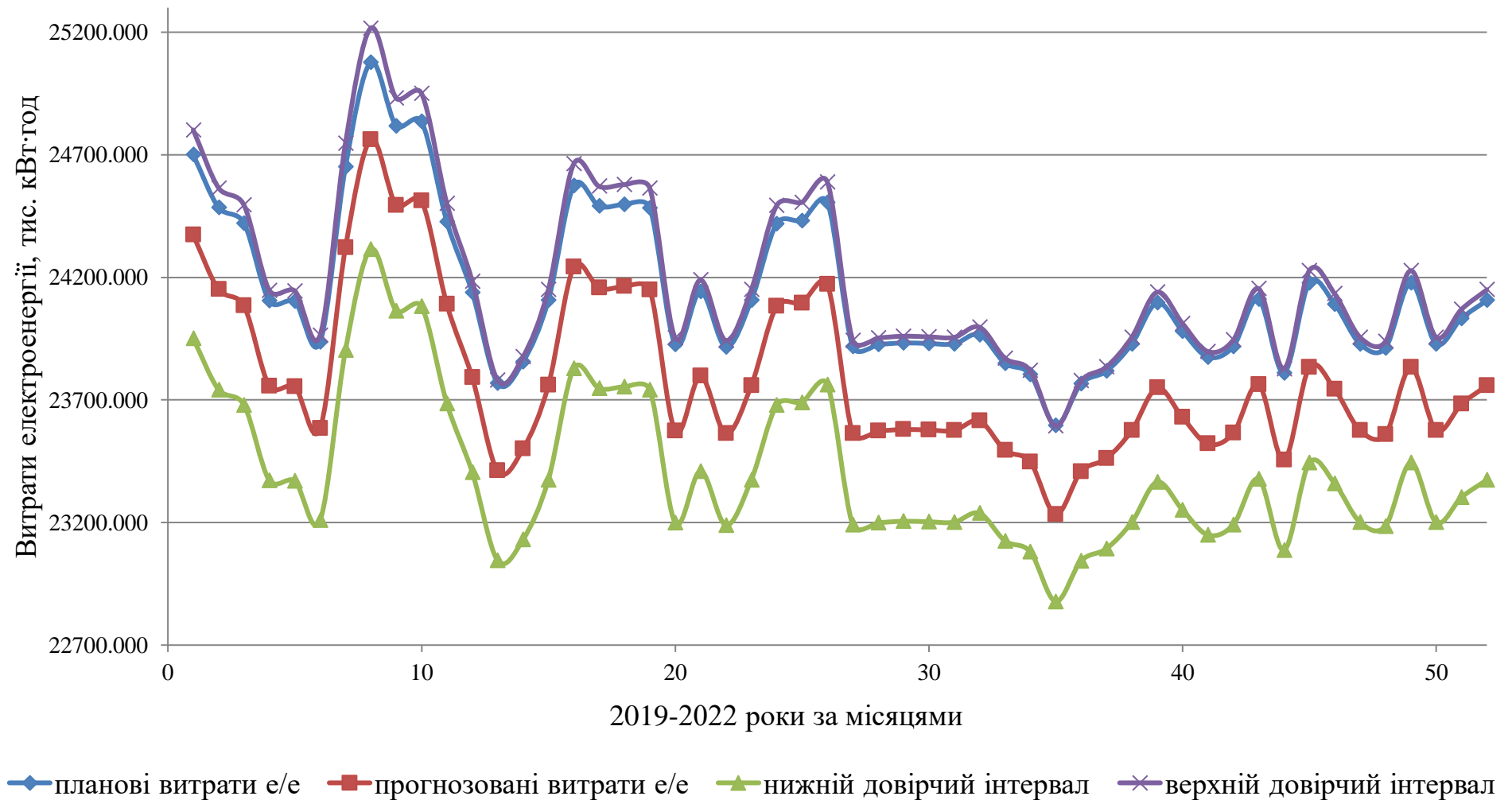


Рисунок 2.2 – Графік електричного навантаження на 2019–2022 роки



### 2.3 Визначення достовірності прогнозованого енергоспоживання на виробництво кисню

Для знаходження ймовірності потрапляння величини відхилення питомого енергоспоживання в заданий інтервал спочатку необхідно перевірити гіпотезу про нормальний закон розподілу цієї величини, значення якої за період 2014-кінець 2018 роки представлено в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Питомі витрати електроенергії на виготовлення кисню та відхилення від середнього їх значень за 2014-2018 роки.

Міс.	O <sub>2</sub> , тис.м <sup>3</sup>	Е/е, тис.квт.год.	пит.витр.,квт.год/1000м <sup>3</sup>	середнє	Відх.
1	2	3	4	5	6
1	54043	30736,74	568,746	568,345	0,40
2	42479	24887,85	585,886		17,5
3	36923	21303,32	576,966		8,62
4	35063	19431,77	554,196		-14,2
5	35943	19561,48	544,236		-24,1
6	40967	24090,89	588,056		19,7
7	38161	21399,01	560,756		-7,6
8	30617	17371,35	567,376		-0,97
9	24124	13661,81	566,316		-2,03
10	24130	12722,69	527,256		-41,1
11	23970	13663,04	570,006		1,66
12	26676	15807,29	592,566		24,2
13	27588	14943,48	541,666		-26,7
14	40321	23534,00	583,666		15,3
15	30371	17104,52	563,186		-5,16
16	23712	12054,38	508,366		-59,9
17	23042	13797,23	598,786		30,4
18	27028	15111,79	559,116		-9,23
19	36927	22982,85	622,386		54
20	33512	18189,51	542,776		-25,6
21	38472	21019,79	546,366		-21,9
22	41866	25504,60	609,196		40,9
23	37196	18641,37	501,166		-67,2
24	32120,340	18132,77	564,526		-3,82
25	35620,873	20734,77	582,096		13,7

Продовження таблиці 2.3

1	2	3	4	5	6
26	28852,000	15854,92	549,526	568,345	-18,819
27	37725,500	19946,83	528,736		-39,609
28	30980,145	17568,72	567,096		-1,249
29	43695,774	26767,86	612,596		44,251
30	44573,462	25529,27	572,746		4,401
31	42833,500	22051,37	514,816		-53,529
32	35065,313	20198,88	576,036		7,691
33	35744,998	22098,13	618,216		49,871
34	39839,028	22657,89	568,736		0,391
35	39360,901	20092,80	510,476		-57,869
36	42995,582	24750,67	575,656		7,311
37	38384,433	21772,65	567,226		-1,119
38	34595,715	20670,46	597,486		29,141
39	39146,843	24229,00	618,926		50,581
40	41454,560	24967,09	602,276		33,931
41	39776,184	25006,73	628,686		60,341
42	37718,595	23357,09	619,246		50,901
43	37959,630	19611,31	516,636		-51,709
44	37776,264	20469,67	541,866		-26,479
45	37571,763	19957,60	531,186		-37,159
46	37430,943	20424,04	545,646		-22,699
47	29463,834	17983,13	610,346		42,001
48	37560,331	21863,34	582,086		13,741
49	39164,970	24016,59	613,216		44,871
50	32589,964	17984,32	551,836		-16,509
51	41397,230	23032,84	556,386		-11,959
52	38545,144	20601,45	534,476		-33,869
53	38802,882	21838,50	562,806		-5,539
54	39237,397	23187,58	590,956		22,611
55	39088,928	22690,19	580,476		12,131
56	35940,367	19956,82	555,276		-13,069

Рівень значущості  $\alpha$ , як і для всіх наукових досліджень, приймається рівним 0,05 [15].

Для знаходження вибіркової середньої  $\bar{x}_b$  та вибіркового середнього квадратичного відхилення  $\sigma_b$  методом добутоків поділено інтервал, в якому знаходяться всі варіанти вибірки  $[-67,179 ; 60,341]$ , на 6 рівних, довжини

$h=21,253$  кВт·год/1000м<sup>3</sup>, часткових інтервалів з емпіричними частотами  $n_i$ , представлений в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Границі інтервалів відхилень питомого енергоспоживання від середнього та їх емпіричні частоти

№ інтервалу	границі інтервалу		емпірична частота
$i$	$x_i$	$x_{i+1}$	$n_i$
1	-67,179	-45,926	5
2	-45,926	-24,673	8
3	-24,673	-3,42	16
4	-3,42	17,833	14
5	17,833	39,087	8
6	39,087	60,341	5
сума	-	-	56

Допоміжна таблиця для розрахунку вибіркової середньої  $\bar{x}_B$  та вибіркового середнього квадратичного відхилення  $\sigma_s$  за допомогою умовної варіанти  $u_i$  представлено в таблиці 2.5, де  $x_{i\text{сеп}}$  – середини розрахованих інтервалів.

Таблиця 2.5 – Розрахунок вибіркової середньої  $\bar{x}_B$  та вибіркового середнього квадратичного відхилення  $\sigma_s$  за допомогою умовної варіанти  $u_i$

$x_{i\text{сеп}}$	$n_i$	$u_i$	$n_i \cdot u_i$	$n_i \cdot u_i^2$	$n_i \cdot (u_i + 1)^2$
-56,553	5	-2	-10	20	5
-35,3	8	-1	-8	8	0
-14,047	16	0	-18	0	16
7,232	14	1	14	14	56
28,46	8	2	16	32	72
49,714	5	3	15	45	80
-	56	-	45	119	229
-	-	-	27	-	-

Умовний момент першого та другого порядків відповідно становлять:

$$M_1^* = \frac{27}{56} = 0,482;$$

$$M_2^* = \frac{119}{56} = 2,125.$$

Вибіркова середня та дисперсія формулами (1.25) та (1.26) відповідно становлять:

$$\bar{x}_B = 0,482 \cdot 21,253 - 14,047 = -3,803;$$

$$D_B = [2,125 - (0,482)^2] \cdot 21,253^2 = 854,903.$$

Враховуючи поправку Шепарда, дисперсія відхилень питомого енергоспоживання від середнього за формулою (1.27) становить, тис. кВт·год:

$$D'_B = 854,903 - \left(\frac{1}{12}\right) \cdot 21,253^2 = 817,262.$$

Для знаходження вибіркового середнього квадратичного відхилення взято корінь квадратний з вибіркової дисперсії за формулою (1.28), тис. кВт·год:

$$\sigma_B = \sqrt{817,262} = 28,59.$$

За допомогою обчислених вибіркової середньої  $\bar{x}_B$  та вибіркового середнього квадратичного відхилення  $\sigma_B$  нормовано випадкову величину  $X$ , тобто розраховано величину  $Z = (X - \bar{x}_B) / \sigma_B$  і обчислено кінці інтервалів  $(z_i, z_{i+1})$  за формулами (1.29) та (1.30).

За формулою (1.31) та (1.32) обчислено теоретичні ймовірності  $p_i$  та теоретичні частоти  $n'_i$  потрапляння  $X$  в інтервали  $(x_i, x_{i+1})$ .

Дані розрахунків представлено в таблиці 2.6, де  $\phi(z)$  – функція Лапласа.

Таблиця 2.6 – Розрахунок теоретичних ймовірностей та частот

$i$	$x_i$	$x_{i+1}$	$z_i$	$z_{i+1}$	$\phi(z_i)$	$\phi(z_{i+1})$	$p_i$	$n'_i$
1	-67,179	-45,926	$-\infty$	-1,47	-0,5	-0,4292	0,0708	3,9648
2	-45,926	-24,673	-1,47	-0,73	-0,4292	-0,2673	0,1619	9,0664
3	-24,673	-3,42	-0,73	0,01	-0,2673	0,004	0,2713	15,1928
4	-3,42	17,833	0,01	0,76	0,004	0,2764	0,2724	15,2544
5	17,833	39,087	0,76	1,50	0,2764	0,4332	0,1568	8,7808
6	39,087	60,341	1,50	$+\infty$	0,4332	0,5	0,0668	3,7408
-	-	-	-	-	-	-	1	56

Для розрахунку спостережуваного значення критерію  $\chi^2$  (“хі квадрат”) К. Пірсона порівняно емпіричні та теоретичні частоти, для чого складено розрахункову таблицю 2.7.

Таблиця 2.7 – Знаходження спостережуваного значення критерію  $\chi^2$ 

$i$	$n_i$	$n'_i$	$n_i - n'_i$	$n_i - n_i'^2$	$(n_i - n'_i)^2/n'_i$	$n_i^2$	$n_i^2/n'_i$
1	2	3	4	5	6	7	8
1	5	3,9648	1,0352	1,072	0,270	25	6,31
2	8	9,0664	-1,0664	1,137	0,125	64	7,06
3	16	15,1928	0,8072	0,652	0,043	256	16,85
4	14	15,2544	-1,2544	1,574	0,103	196	12,85
5	8	8,7808	-0,7808	0,610	0,069	64	7,29
6	5	3,7408	1,2592	1,586	0,424	25	6,68
$\Sigma$	56	56	-	-	1,04	-	57,04

За даними таблиці 2.7  $\chi_{\text{спост}}^2 = 1,04$ .

За таблицею критичних точок розподілу  $\chi^2$ , за заданим рівнем значущості  $\alpha=0,05$  і числу ступенів свободи  $k = 6 - 3 = 3$ , де 6 — число груп вибірки, знайдено критичну точку  $\chi_{\text{кр}}^2(0,05; 3)$  області прийняття нульової гіпотези:  $\chi_{\text{кр}\alpha=0,05}^2 = 7,81$ .

Так як  $\chi_{\text{спост}}^2 < \chi_{\text{кр}}^2$  ( $1,04 < 7,81$ ), немає підстав відхилити гіпотезу про нормальний розподіл генеральної сукупності, тобто, емпіричні та теоретичні частоти відрізняються несуттєво (випадково).

Для іншої перевірки гіпотези про нормальний розподіл за даними таблиці 2.8, де:  $y_i$  – вирівнюючі частоти;  $n$  – спостережувані частоти;  $h$  – різниця між

двома сусідніми варіантами  $u_i = (x_i - \bar{x}_B)/\sigma_B$  та  $\varphi(u) = \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\right)e^{-u^2/2}$ , побудовано нормальну криву, представлену на рисунку 2.3.

Таблиця 2.8 – Розрахунок вирівнюючих частот

$x_i$	$n_i$	$x_i - \bar{x}_B$	$u_i$	$u_i^2/2$	$e^{-u^2/2}$	$\varphi(u)$	$y_i$
-56,553	5	-52,75	-1,845	1,702	0,182	0,07273	4
-35,3	8	-31,497	-1,102	0,607	0,545	0,21745	9
-14,047	16	-10,244	-0,358	0,064	0,938	0,37414	16
7,232	14	11,035	0,386	0,074	0,928	0,37031	15
28,46	8	32,263	1,128	0,637	0,529	0,21105	9
49,714	5	53,517	1,872	1,752	0,173	0,06919	3
-	56	-	-	-	-	-	56

На рисунку 2.3 представлено нормальну криву розподілу ймовірностей.

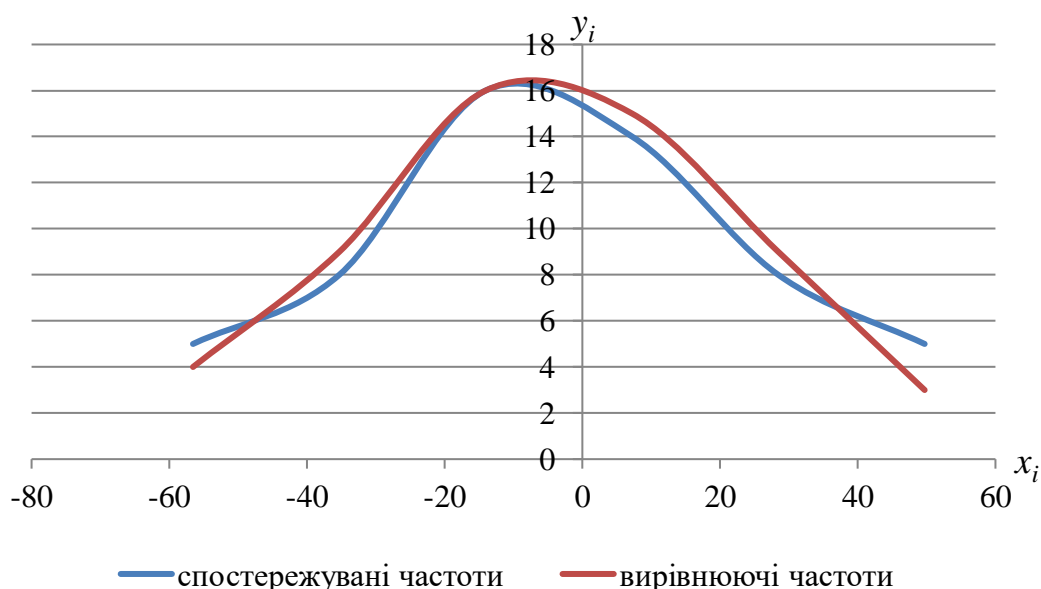


Рисунок 2.3 – Нормальна крива розподілу ймовірностей

Так як неперервна величина  $X$  має нормальний закон розподілу (закон Гауса) з параметрами  $a$  і  $\sigma^2$ , то її густина ймовірностей за формулою (1.34) має вигляд:

$$\varphi_N(x) = \frac{1}{28,59\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x+3,8)^2}{1634,78}}$$

а функція розподілу:

$$F(x) = \frac{1}{28,59\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-(x+3,8)^2/1634,78} dx.$$

Для перевірки закону розподілу також використано “правило трьох сигм”, за яким:  $a - 3\sigma = -3,803 - (3 \cdot 28,59) = -89,573$ , а  $a + 3\sigma = -3,803 + (3 \cdot 28,59) = 81,967$ .

Так як інтервал відхилень питомого енергоспоживання від середнього  $[-67,179;60,341]$  входить в отриманий  $[-89,573;81,967]$ , гіпотезу про нормальний закон ще раз підтверджено.

Так як за розрахунками прогнозованих значень питомих витрат електроенергії на виготовлення необхідних об’ємів кисню відхилення від середнього значення 568,345 кВт·год будуть знаходитися в інтервалі  $[-6,345;13,665]$ , їх ймовірність за формулою (1.37) складатиме:

$$\begin{aligned} P(-6,345 < X < 13,665) &= \Phi\left(\frac{13,665 + 3,803}{28,59}\right) - \Phi\left(\frac{-6,345 + 3,803}{28,59}\right) = \\ &= \Phi(0,611) - \Phi(0,089) = 0,5291 + 0,3409 = 0,87. \end{aligned}$$

Таким чином, величина розрахованої ймовірності свідчить про досить високу достовірність прогнозованих значень витрат електричної енергії.

#### 2.4 Прогнозування витрат електричної енергії на виробництво азоту, аргону та стисненого повітря

Аналогічно знаходженню рівнянні регресії для витрат електроенергії на виготовлення кисню, для оцінки параметрів регресійного рівняння, яке також

має вигляд степеневі функції  $y = ax^b \cdot \varepsilon$ , за методом найменших квадратів складено розрахункову таблицю 2.9, де  $x_i^* = \lg x_i$  – об'єми виготовленої продукції (стисненого повітря, азоту і аргону), а  $y_i^* = \lg y_i$  – витрати електроенергії на виготовлення цих об'ємів за місяць.

Оцінки параметрів  $a^*$  і  $b^*$  знайдено за формулами (1.4) та (1.5):

$$a^* = \frac{238,271 \cdot 1470,825 - 1221,214 \cdot 286,979}{56 \cdot 1470,825 - 286,979^2} = -0,7285;$$

$$b^* = \frac{1221,214 - (-0,7285) \cdot 286,979}{1470,825} = 0,9724.$$

Отже, параметри регресійного рівняння для залежності між об'ємами виготовленої продукції та відповідними витратами електроенергії складають:

$$a = 10^{-0,7285} = 0,186;$$

$$b = b^* = 0,972;$$

а рівняння регресії відповідно має вигляд:

$$y = 0,186x^{0,972}.$$



Таблиця 2.9 – Розрахункові дані для оцінки параметрів рівняння регресії для виготовлення іншої продукції.

№	$x_i$	$y_i$	$x_i^*$	$y_i^*$	$x_i^* \cdot y_i^*$	$x_i^{*2}$	$\hat{y}_{x_i^*}$	$(y_i^* - \hat{y}_{x_i^*})^2$	$(y_i^* - \bar{y}_{x_i^*})^2$	$(\hat{y}_{x_i^*} - \bar{y}_{x_i^*})^2$	A	$(x_i^* - \bar{x}_i^*)^2$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	168394,845	22648,99	5,226329	4,355049	22,760	27,31	4,354	0,000002	0,01004061	0,009781763	0,0002	0,010344
2	154622,184	21210,30	5,189272	4,326547	22,451	26,92	4,318	0,000078	0,005141	0,00395232	0,0020	0,00418
3	155078,981	21554,19	5,190553	4,333532	22,493	26,94	4,319	0,000212	0,00619143	0,004110515	0,0033	0,004347
4	149021,784	20354,38	5,17325	4,308658	22,289	26,76	4,302	0,000043	0,00289570	0,002236076	0,0015	0,002365
5	150234,931	19443,97	5,176771	4,288785	22,202	26,79	4,306	0,000281	0,00115184	0,002571631	0,0039	0,00272
6	141661,961	18632,09	5,151253	4,270262	21,997	26,53	4,281	0,000110	0,00023763	0,00067066	0,0024	0,000709
7	150213,328	20191,95	5,176708	4,305178	22,286	26,79	4,305	0,000000	0,00253334	0,002565475	7,39E-	0,002713
8	139243,673	19493,42	5,143775	4,289888	22,066	26,45	4,273	0,000270	0,00122794	0,000346909	0,0038	0,000367
9	132882,328	18164,35	5,123467	4,25922	21,821	26,24	4,254	0,000030	1,91307E-	1,26077E-06	0,0012	1,33E-06
10	116884,627	15845,46	5,067757	4,199905	21,284	25,68	4,200	0,000000	0,00301851	0,003057729	8,47E-	0,003234
11	86522,365	11624,61	4,937128	4,065378	20,071	24,37	4,073	0,000051	0,03589794	0,033242139	0,0017	0,035154
12	104137,083	14525,56	5,017605	4,162133	20,883	25,17	4,151	0,000129	0,00859571	0,010829736	0,0027	0,011453
13	122140,240	16811,99	5,086859	4,225619	21,495	25,87	4,218	0,000056	0,00085420	0,001348505	0,0017	0,001426
14	120680,504	16192,31	5,081637	4,209309	21,390	25,82	4,213	0,000014	0,00207364	0,001747214	0,0008	0,001848
15	138339,756	17921,22	5,140947	4,253368	21,866	26,42	4,271	0,000301	2,18546E-	0,000252016	0,0040	0,000267
16	122014,922	16022,39	5,086413	4,204727	21,386	25,87	4,218	0,000168	0,00251188	0,001380533	0,0030	0,00146
17	115081,930	15722,91	5,061007	4,196533	21,238	25,61	4,193	0,000013	0,00340041	0,00382677	0,0008	0,004047
18	103016,754	13708,00	5,012908	4,136974	20,738	25,12	4,146	0,000085	0,01389380	0,011801357	0,0022	0,01248
19	114233,582	15109,95	5,057794	4,179263	21,137	25,58	4,190	0,000112	0,00571279	0,004223133	0,0025	0,004466
20	116062,997	15857,11	5,064694	4,200224	21,272	25,65	4,197	0,000013	0,00298356	0,003396079	0,0008	0,003591
21	104021,062	14181,71	5,017121	4,151729	20,829	25,17	4,150	0,000002	0,01063319	0,010927942	0,0003	0,011556
22	118491,429	16568,06	5,073687	4,219272	21,407	25,74	4,205	0,000195	0,00126552	0,002453288	0,0033	0,002594
23	124306,218	16063,47	5,094493	4,205839	21,426	25,95	4,226	0,000388	0,00240164	0,000858395	0,0046	0,000908
24	129236,939	17230,52	5,111387	4,236298	21,653	26,12	4,242	0,000032	0,00034401	0,000165646	0,0013	0,000175
25	135664,521	18322,52	5,132466	4,262985	21,879	26,34	4,262	0,000000	6,62474E-	5,8188E-05	0,0001	6,15E-05
26	116671,158	15693,02	5,066964	4,195707	21,259	25,67	4,199	0,000009	0,00349746	0,003143703	0,0007	0,003325
27	128445,700	17528,99	5,10872	4,243757	21,680	26,09	4,239	0,000019	0,00012296	0,000239132	0,0010	0,000253
28	118483,433	15559,84	5,073658	4,192005	21,268	25,74	4,205	0,000176	0,00394898	0,002456112	0,0031	0,002597

## Продовження таблиці 2.9

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
29	126748,917	17403,26	5,102944	4,24063	21,639	26,0400	4,234	0,000047	0,000202077	0,000444366	0,00161	0,00047
30	128043,555	17572,06	5,107358	4,24482	21,679	26,0851	4,238	0,000046	0,000100468	0,000281844	0,00159	0,000298
31	136580,694	18463,96	5,135389	4,26632	21,909	26,3722	4,265	0,000001	0,000131762	0,000109632	0,00023	0,000116
32	122909,439	17356,66	5,089585	4,23946	21,577	25,9038	4,221	0,000349	0,000236543	0,001160812	0,00440	0,001228
33	123909,695	16786,67	5,093105	4,22496	21,518	25,9397	4,224	0,000001	0,000892907	0,000939281	0,00018	0,000993
34	131108,917	17733,14	5,117632	4,24878	21,743	26,1901	4,248	0,000001	3,67288E-05	4,61987E-05	0,00017	4,89E-05
35	131724,759	17517,31	5,119667	4,24346	21,725	26,2109	4,250	0,000043	0,000129474	2,32121E-05	0,00154	2,45E-05
36	146095,149	19225,39	5,164636	4,28387	22,124	26,6734	4,294	0,000098	0,000842693	0,001514042	0,00230	0,001601
37	150945,305	20170,07	5,17882	4,30470	22,293	26,8201	4,308	0,000008	0,002486151	0,002777654	0,00066	0,002937
38	141695,754	19468,29	5,151357	4,28932	22,095	26,5364	4,281	0,000072	0,001188992	0,000675888	0,00197	0,000715
39	148141,877	20249,51	5,170678	4,30641	22,267	26,7359	4,300	0,000046	0,002659314	0,0020058	0,00157	0,002121
40	137405,348	17632,54	5,138004	4,24631	21,817	26,3990	4,268	0,000464	7,27796E-05	0,000169333	0,00507	0,000179
41	142148,504	19496,38	5,152742	4,28995	22,105	26,5507	4,282	0,000060	0,001232567	0,000747755	0,00181	0,000791
42	138854,161	19088,98	5,142559	4,28078	22,014	26,4459	4,272	0,000072	0,000672709	0,00030424	0,00198	0,000322
43	128209,173	17793,51	5,107919	4,25026	21,709	26,0908	4,239	0,000136	2,10165E-05	0,000263812	0,00274	0,000279
44	146343,222	20654,15	5,165373	4,31500	22,288	26,6810	4,294	0,000422	0,003619388	0,001570315	0,00475	0,001661
45	141552,778	19660,97	5,150918	4,29360	22,116	26,5319	4,280	0,000174	0,001502261	0,000653901	0,00307	0,000692
46	145408,344	19550,85	5,162589	4,29116	22,153	26,6523	4,292	0,000000	0,001319121	0,001363135	0,00014	0,001442
47	144646,758	19125,47	5,160309	4,28161	22,094	26,6287	4,290	0,000063	0,000716429	0,001204291	0,00185	0,001274
48	151354,039	19683,57	5,179994	4,29410	22,243	26,8323	4,309	0,000213	0,001541177	0,002899336	0,00339	0,003066
49	150369,889	20087,16	5,177161	4,30291	22,276	26,8029	4,306	0,000009	0,002310973	0,002610235	0,00070	0,00276
50	152433,438	20105,21	5,18308	4,30330	22,304	26,8643	4,312	0,000070	0,002348621	0,003231539	0,00194	0,003417
51	156541,305	20009,89	5,194629	4,30124	22,343	26,9841	4,323	0,000470	0,002152844	0,004634468	0,00504	0,004901
52	143841,490	19337,88	5,157884	4,28640	22,108	26,6037	4,287	0,000001	0,000996217	0,001046213	0,00018	0,001106
53	150570,754	19811,35	5,177741	4,29691	22,248	26,809	4,307	0,000092	0,001769717	0,002668159	0,00223	0,002822
54	143131,961	19389,37	5,155737	4,28756	22,105	26,5816	4,285	0,000006	0,001070449	0,000915478	0,00057	0,000968
55	148697,864	20388,71	5,172305	4,30939	22,289	26,7527	4,301	0,000067	0,002975016	0,00215001	0,00189	0,002274
56	133081,097	18617,38	5,124116	4,26991	21,879	26,2565	4,254	0,000242	0,000227182	2,41666E-07	0,00364	2,56E-07
Σ	7518283,41	1014562,94	286,9789	238,271	1221,2	1470,82	238,27	0,006064	0,164118967	0,15805542	0,11170	0,167145

Зображення кривої регресії на кореляційному полі представлено на рисунку 2.4.

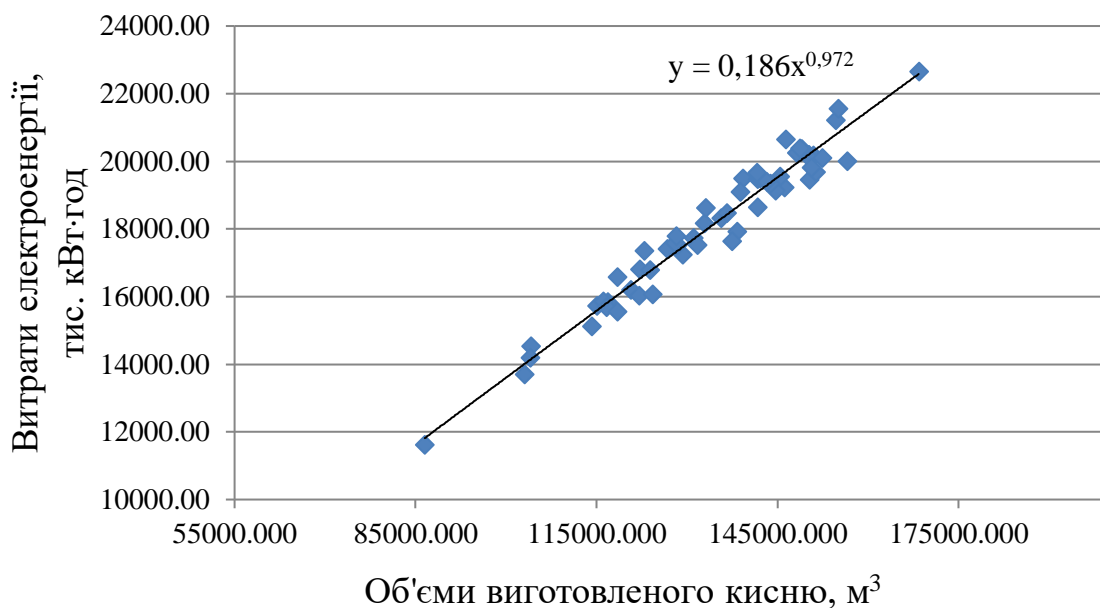


Рисунок 2.4 – Графічне представлення кривої регресії

Для оцінки суттєвості рівняння регресії проведено аналіз дисперсій, для чого за формулою (1.12) розраховано загальну, факторну та залишкову дисперсії:

$$D_{заг} = 0,1641;$$

$$D_{факт} = 0,1581;$$

$$D_{зал} = \frac{0,0061}{56-2} = 0,00011.$$

F-критерій Фішера за формулою (2.18) відповідно складає:

$$F_{факт} = \frac{0,1581}{0,00011} = 1407,591.$$

Для перевірки нульової гіпотези  $H_0$  необхідно порівняти розрахункове та табличне значення  $F$ -критерію для рівня значимості  $\alpha=0,05$  та  $\alpha=0,01$  при ступенях свободи  $v_1=1$  та  $v_2=54$ , яке складає:

$$F_{\alpha=0,05} = 4,0195;$$

$$F_{\alpha=0,01} = 7,241.$$

Так як  $F_{факт} > F_{табл}$  ( $1407,591 > 4,0195$  і  $1407,591 > 7,241$ ), гіпотеза  $H_0$  відхиляється, а отже, рівняння регресії є значимим, та зв'язок між об'ємами виготовленої продукції та відповідними витратами електроенергії доведено.

Для оцінки тісноти та надійності зв'язку за лінійним рівнянням регресії для логарифмів  $y$  за формулою (1.15) розраховано індекс кореляції, який становить:

$$R = \sqrt{1 - \frac{0,0061}{0,1641}} = 0,98.$$

Коефіцієнт кореляції для степеневої функції за формулою (1.16) відповідно становить:

$$R_{yx} = \sqrt{1 - \frac{10955886,63}{256152824,6}} = 0,978.$$

Так як даний індекс кореляції наближається до 1, це свідчить про те, що зв'язок є сильним, а рівняння регресії є надійним.

Для оцінки доли дисперсії, поясненої рівнянням регресії, розраховано коефіцієнт детермінації, який свідчить про правильність підбраної моделі регресії:

$$R^2 = 0,978^2 = 0,96.$$

Для перевірки значимості рівняння нелінійної регресії в цілому за допомогою індексу детермінації за формулою (1.18) розраховано  $F$ -критерій Фішера, який дорівнює  $F$ -відношенню, розрахованому за допомогою аналізу дисперсій:

$$F = \frac{0,98^2}{1-0,98^2} \cdot (56 - 2) = 1407,591.$$

Середня помилка апроксимації визначається за формулою (1.19) і складає 0,2 %, що говорить про високу якість підбраної моделі регресії.

Стандартна помилка коефіцієнту регресії  $b$  за формулою (1.20) становить:

$$m_b = \sqrt{\frac{0,00011}{0,167}} = 0,026.$$

Фактичне значення  $t$ -критерію Стьюдента при табличному  $t_{b_{\text{табл}}} = 2,00492$  становить:

$$t_b = \frac{0,972}{0,026} = 37,518;$$

або:

$$t_b = \sqrt{1407,591} = 37,518.$$

Так як  $t_b > t_{b_{\text{табл}}}$  ( $37,518 > 2,00492$ ), гіпотезу про незначимість коефіцієнту регресії можна відхилити.

Довірчий інтервал для коефіцієнту регресії  $b$  складає:

$$0,972 - 2,005 \cdot 0,0026 \leq b \leq 0,972 + 2,005 \cdot 0,0026;$$

$$0,92 \leq b \leq 1,024.$$

Стандартна помилка коефіцієнту регресії  $a$  за формулою (1.22) становить:

$$m_a = \sqrt{0,00011 \cdot \frac{1470,825}{56 \cdot 0,167}} = 0,133.$$

Фактичне значення t-критерію Стьюдента при табличному  $t_{a_{\text{табл}}} = 2,00492$  становить:

$$t_a = \left| \frac{-0,728}{0,133} \right| = 5,484.$$

Так як  $t_a > t_{a_{\text{табл}}}$  ( $5,484 > 2,005$ ), гіпотезу про незначимість коефіцієнту регресії можна відхилити.

Довірчий інтервал для коефіцієнту регресії  $a^*$  складає:

$$-0,728 - 2,005 \cdot 0,133 \leq a^* \leq -0,728 + 2,005 \cdot 0,133;$$

$$-0,99 \leq a^* \leq -0,46.$$

Довірчий інтервал для коефіцієнту регресії  $a$  складає:

$$10^{-0,99} \leq a \leq 10^{-0,46};$$

$$0,102 \leq a \leq 0,347.$$

Помилка прогнозованого індивідуального значення  $y^*$  визначається за формулою (1.23) і для кожного значення об'єму виготовленої продукції  $x_k$  становить:

$$m_{\hat{y}_x} = 0,011 \cdot \sqrt{\frac{1}{56} + \frac{(x_k - 5,125)^2}{0,167}}.$$

Для прогнозного значення  $y^*$  довірчі інтервали визначаються за формулою (1.24) і становлять:

$$\hat{y}_{x_k} - 2,005 \cdot m_{\hat{y}_x} \leq y^* \leq \hat{y}_{x_k} + 2,005 \cdot m_{\hat{y}_x}.$$

де  $x_i$  – об'єми кисню, необхідні для виготовлення, тис. м<sup>3</sup>;

$y_{i_{пл}}$  – планові витрати електроенергії на виготовлення  $x_i$  об'ємів кисню при питомих витратах  $w_1 = 0,14$  кВт·год/ м<sup>3</sup>, тис. кВт·год;

$y_{i_{пр}}$  – прогнозовані витрати електроенергії на виготовлення  $x_i$  об'ємів кисню за рівнянням регресії, тис. кВт·год;

$m_{\hat{y}_x}$  – помилка прогнозованого індивідуального значення  $y^*$ ;

$y_1; y_2$  – нижній і верхній довірчі інтервали, відповідно, тис. кВт·год;

$w_1; w_2$  – питоме енергоспоживання для нижнього і верхнього довірчих інтервалів, відповідно, кВт·год/ м<sup>3</sup>.

Розрахунок прогнозного енергоспоживання ККЦ в залежності від об'ємів виготовленої продукції за даними Бізнес плану на 2019 – 2022 роки за місяцями приведено в таблиці 2.10.

Аналіз даних таблиці 2.10 показав, що прогнозні значення енергоспоживання на перспективу значно відрізняються від планових:

$$\sum y_{i_{пр}} < \sum y_{i_{пл}};$$

$$942226,628 < 946912,693 \text{ (тис. кВт·год)}.$$

Таким чином, заявка на замовлення електричного навантаження киснево-компресорним цехом ПАТ «Запоріжсталь» буде меншою на 4686,065 тис. кВт·год. в порівнянні з плановими витратами.

Графік прогнозного енергоспоживання за даними бізнес плану на 2019 – 2022 роки для необхідних для виготовлення продукції з урахуванням планових витрат та довірчих інтервалів за місяцями зображено на рисунку 2.5.

Аналіз графіку показав, що планові витрати електричної енергії входять до довірчих інтервалів, проте їх ймовірність значно нижча, ніж у прогнозованих значень.



Таблиця 2.10 – Розрахунок прогнозного енергоспоживання ККЦ за даними Бізнес плану на 2019 – 2022 роки

Місяць	$x_i$	$y_{i_{нл}}$	$y_{i_{пр}}$	$m_{\hat{y}_x}$	$y_1$	$y_2$	$w_1$	$w_2$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	145395	19773,699	19576,157	0,002	19421,418	19732,129	0,1336	0,1357
2	145622	19804,617	19605,922	0,002	19450,047	19763,046	0,1336	0,1357
3	145079	19730,741	19534,800	0,002	19381,619	19689,192	0,1336	0,1357
4	147022	19994,963	19789,138	0,002	19626,010	19953,623	0,1335	0,1357
5	150235	20431,951	20209,578	0,002	20028,293	20392,504	0,1333	0,1357
6	148662	20218,027	20003,787	0,002	19831,634	20177,434	0,1334	0,1357
7	150213	20429,013	20206,752	0,002	20025,596	20389,548	0,1333	0,1357
8	148244	20161,140	19949,052	0,002	19779,251	20120,311	0,1334	0,1357
9	148882	20247,997	20032,621	0,002	19859,216	20207,541	0,1334	0,1357
10	146885	19976,309	19771,186	0,002	19608,787	19934,930	0,1335	0,1357
11	146522	19927,042	19723,767	0,002	19563,276	19885,574	0,1335	0,1357
12	144137	19602,643	19411,460	0,002	19262,779	19561,288	0,1336	0,1357
13	142140	19331,073	19149,902	0,002	19009,984	19290,849	0,1337	0,1357
14	142681	19404,549	19220,679	0,002	19078,500	19363,916	0,1337	0,1357
15	148340	20174,207	19961,625	0,002	19791,287	20133,430	0,1334	0,1357
16	142015	19314,029	19133,483	0,002	18994,078	19273,912	0,1337	0,1357
17	145082	19731,142	19535,186	0,002	19381,991	19689,593	0,1336	0,1357
18	143017	19450,279	19264,725	0,002	19121,097	19409,431	0,1337	0,1357
19	144234	19615,767	19424,097	0,002	19274,966	19574,382	0,1336	0,1357
20	146063	19864,568	19663,632	0,002	19505,520	19823,027	0,1335	0,1357
21	144021	19586,864	19396,265	0,002	19248,124	19545,547	0,1336	0,1357
22	148491	20194,834	19981,472	0,002	19810,282	20154,142	0,1334	0,1357
23	144306	19625,646	19433,609	0,002	19284,137	19584,240	0,1336	0,1357
24	149237	20296,224	20079,018	0,002	19903,578	20256,004	0,1334	0,1357

Продовження таблиці 2.10

1	2	3	4	5	6	7	8	9
25	145665	19810,375	19611,465	0,002	19455,376	19768,805	0,1336	0,1357
26	146671	19947,277	19743,244	0,002	19581,973	19905,843	0,1335	0,1357
27	148446	20188,615	19975,489	0,002	19804,556	20147,897	0,1334	0,1357
28	148483	20193,747	19980,426	0,002	19809,281	20153,050	0,1334	0,1357
29	146749	19957,853	19753,422	0,002	19591,741	19916,437	0,1335	0,1357
30	148044	20133,924	19922,864	0,002	19754,176	20092,992	0,1334	0,1357
31	146581	19934,974	19731,402	0,002	19570,606	19893,519	0,1335	0,1357
32	142909	19435,684	19250,668	0,002	19107,506	19394,902	0,1337	0,1357
33	143910	19571,719	19381,680	0,002	19234,052	19530,441	0,1337	0,1357
34	141109	19190,813	19014,774	0,002	18878,928	19151,596	0,1338	0,1357
35	142725	19410,567	19226,476	0,002	19084,109	19369,905	0,1337	0,1357
36	146095	19868,940	19667,841	0,002	19509,564	19827,403	0,1335	0,1357
37	142945	19440,562	19255,366	0,002	19112,049	19399,758	0,1337	0,1357
38	141696	19270,623	19091,667	0,002	18953,544	19230,796	0,1338	0,1357
39	144142	19603,295	19412,087	0,002	19263,385	19561,938	0,1336	0,1357
40	147405	20047,127	19839,341	0,002	19674,150	20005,918	0,1335	0,1357
41	144149	19604,197	19412,955	0,002	19264,222	19562,837	0,1336	0,1357
42	148854	20244,166	20028,935	0,002	19855,691	20203,692	0,1334	0,1357
43	148209	20156,447	19944,537	0,002	19774,929	20115,601	0,1334	0,1357
44	146343	19902,678	19700,316	0,002	19540,759	19861,177	0,1335	0,1357
45	144553	19659,178	19465,897	0,002	19315,258	19617,711	0,1336	0,1357
46	145408	19775,535	19577,925	0,002	19423,118	19733,965	0,1336	0,1357
47	144647	19671,959	19478,204	0,002	19327,116	19630,473	0,1336	0,1357
48	146354	19904,149	19701,732	0,002	19542,118	19862,650	0,1335	0,1357

На рисунку 2.5 зображено графік прогнозного енергоспоживання за даними бізнес плану на 2019 – 2022 роки необхідних для виготовлення продукції з урахуванням планових витрат та довірчих інтервалів за місяцями.

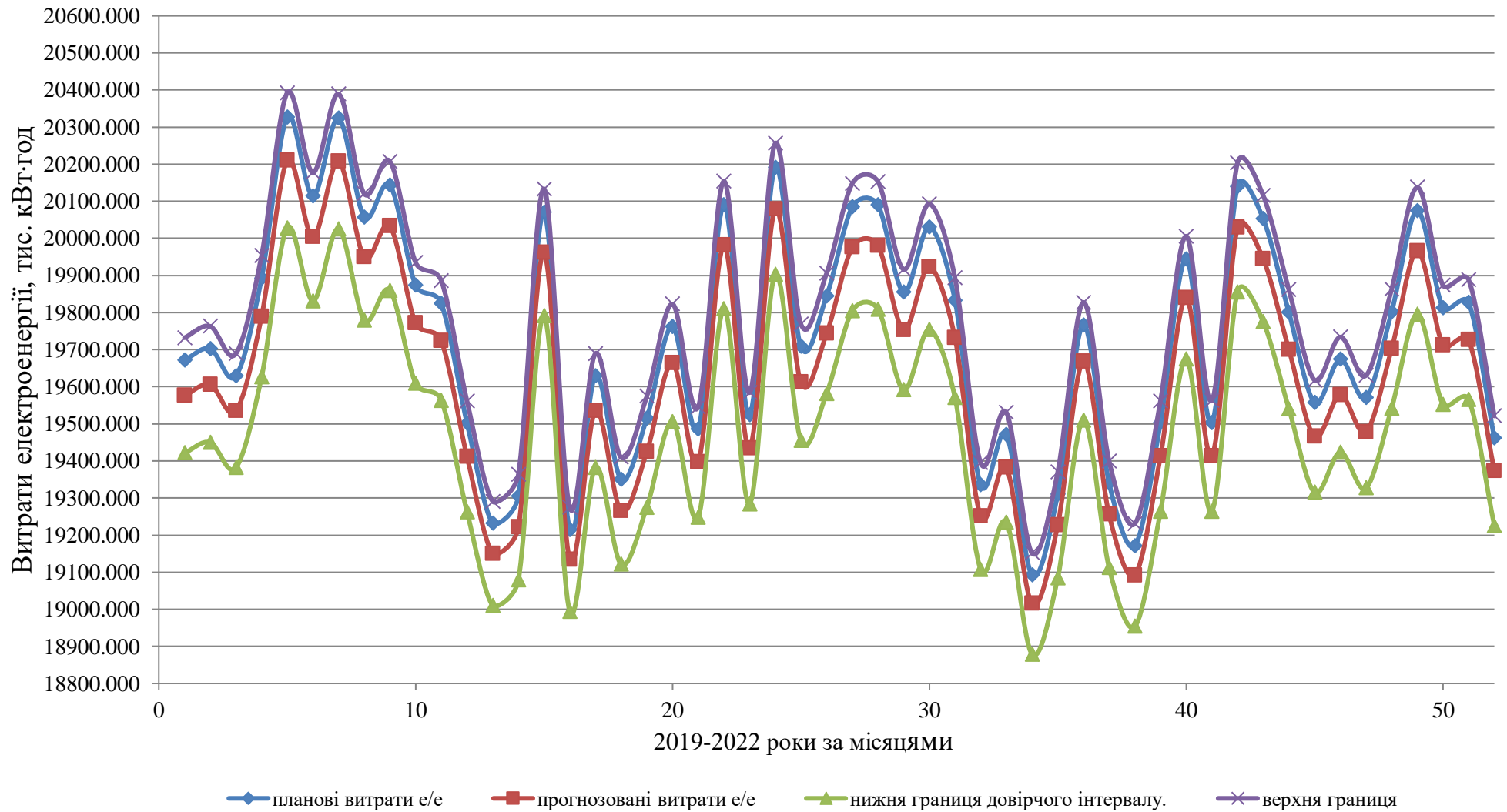


Рисунок 2.5 – Графік електричного навантаження на 2019–2022 роки

## 2.5 Визначення достовірності прогнозованого енергоспоживання на виробництво азоту, аргону та стисненого повітря

Для знаходження ймовірності потрапляння величини відхилення питомого енергоспоживання в заданий інтервал спочатку необхідно перевірити гіпотезу про нормальний закон розподілу цієї величини, значення якої за період 2014-кінець 2018 роки представлено в таблиці 2.11.

Таблиця 2.11 – Питомі витрати електроенергії на виготовлення продукції та відхилення від середнього їх значень за 2014-2018 роки.

Міс.	O <sub>2</sub> , тис.м <sup>3</sup>	Е/е, тис.квт.год.	пит.витр.,квт.год/1000м <sup>3</sup>	середнє	Відх.
1	2	3	4	5	6
1	168394,845	22648,99	134,499	135,005	-0,51
2	154622,184	21210,30	137,175		2,2
3	155078,981	21554,19	138,988		3,98
4	149021,784	20354,38	136,587		1,58
5	150234,931	19443,97	129,424		-5,58
6	141661,961	18632,09	131,525		-3,48
7	150213,328	20191,95	134,422		-0,58
8	139243,673	19493,42	139,995		4,99
9	132882,328	18164,35	136,695		1,69
10	116884,627	15845,46	135,565		0,56
11	86522,365	11624,61	134,354		-0,65
12	104137,083	14525,56	139,485		4,48
13	122140,240	16811,99	137,645		2,64
14	120680,504	16192,31	134,175		-0,83
15	138339,756	17921,22	129,545		-5,46
16	122014,922	16022,39	131,315		-3,7
17	115081,930	15722,91	136,624		1,62
18	103016,754	13708,00	133,066		-1,94
19	114233,582	15109,95	132,272		-2,74
20	116062,997	15857,11	136,625		1,62
21	104021,062	14181,71	136,335		1,33
22	118491,429	16568,06	139,825		4,82
23	124306,218	16063,47	129,225		-5,78
24	129236,939	17230,52	133,325		-1,68
25	135664,521	18322,52	135,058		0,05

Продовження таблиці 2.11

1	2	3	4	5	6
26	116671,158	15693,02	134,506	135,005	-0,499
27	128445,700	17528,99	136,470		1,465
28	118483,433	15559,84	131,325		-3,680
29	126748,917	17403,26	137,305		2,300
30	128043,555	17572,06	137,235		2,230
31	136580,694	18463,96	135,187		0,182
32	122909,439	17356,66	141,215		6,210
33	123909,695	16786,67	135,475		0,470
34	131108,917	17733,14	135,255		0,250
35	131724,759	17517,31	132,984		-2,021
36	146095,149	19225,39	131,595		-3,410
37	150945,305	20170,07	133,625		-1,380
38	141695,754	19468,29	137,395		2,390
39	148141,877	20249,51	136,690		1,685
40	137405,348	17632,54	128,325		-6,680
41	142148,504	19496,38	137,155		2,150
42	138854,161	19088,98	137,475		2,470
43	128209,173	17793,51	138,785		3,780
44	146343,222	20654,15	141,135		6,130
45	141552,778	19660,97	138,895		3,890
46	145408,344	19550,85	134,455		-0,551
47	144646,758	19125,47	132,222		-2,783
48	151354,039	19683,57	130,050		-4,956
49	150369,889	20087,16	133,585		-1,420
50	152433,438	20105,21	131,895		-3,110
51	156541,305	20009,89	127,825		-7,180
52	143841,490	19337,88	134,439		-0,567
53	150570,754	19811,35	131,575		-3,430
54	143131,961	19389,37	135,465		0,460
55	148697,864	20388,71	137,115		2,110
56	133081,097	18617,38	139,895		4,890

Рівень значущості  $\alpha$ , як і для всіх наукових досліджень, приймається рівним 0,05.

Для знаходження вибіркової середньої  $\bar{x}_v$  та вибіркового середнього квадратичного відхилення  $\sigma_v$  методом добутоків поділено інтервал, в якому знаходяться всі варіанти вибірки  $[-7,28 ; 6,21]$ , на 6 рівних, довжини  $h=2,232$

кВт·год/1000м<sup>3</sup>, часткових інтервалів з емпіричними частотами  $n_i$ , представлений в таблиці 2.12.

Таблиця 2.12 – Границі інтервалів відхилень питомого енергоспоживання від середнього та їх емпіричні частоти

№ інтервалу	границі інтервалу		емпірична частота
	$x_i$	$x_{i+1}$	
$i$			$n_i$
1	-7,180	-4,948	6
2	-4,948	-2,716	8
3	-2,716	-0,484	12
4	-0,484	1,748	13
5	1,748	3,979	10
6	3,979	6,210	7
$\Sigma$	-	-	56

Допоміжна таблиця для розрахунку вибіркової середньої  $\bar{x}_B$  та вибіркового середнього квадратичного відхилення  $\sigma_6$  за допомогою умовної варіанти  $u_i$  представлено в таблиці 2.13, де  $x_{i\text{сеп}}$  – середини розрахованих інтервалів.

Таблиця 2.13 – Розрахунок вибіркової середньої  $\bar{x}_B$  та вибіркового середнього квадратичного відхилення  $\sigma_6$  за допомогою умовної варіанти  $u_i$

$x_{i\text{сеп}}$	$n_i$	$u_i$	$n_i \cdot u_i$	$n_i \cdot u_i^2$	$n_i \cdot (u_i + 1)^2$
-6,064	6	-2	-12	24	6
-3,832	8	-1	-8	8	0
-1,6	12	0	-20	0	12
0,632	13	1	13	13	52
2,8635	10	2	20	40	90
5,0945	7	3	21	63	112
-	$n = 56$	-	54	148	272
-	-	-	34	-	-

Умовний момент першого та другого порядків відповідно становлять:

$$M_1^* = \frac{34}{56} = 0,607;$$

$$M_2^* = \frac{148}{56} = 2,643.$$

Вибіркова середня та дисперсія формулами (1.25) та (1.26) відповідно становлять:

$$\bar{x}_B = 0,607 \cdot 2,232 - 1,6 = -0,245;$$

$$D_B = [2,643 - (0,607)^2] \cdot 2,232^2 = 11,331.$$

Враховуючи поправку Шепарда, дисперсія відхилень питомого енергоспоживання від середнього за формулою (1.27) становить, тис. кВт·год:

$$D'_B = 11,331 - \left(\frac{1}{12}\right) \cdot 2,232^2 = 10,916.$$

Для знаходження вибіркового середнього квадратичного відхилення взято корінь квадратний з вибіркової дисперсії за формулою (1.28), тис. кВт·год:

$$\sigma_B = \sqrt{10,916} = 3,304.$$

За допомогою обчислених вибіркової середньої  $\bar{x}_B$  та вибіркового середнього квадратичного відхилення  $\sigma_B$  нормовано випадкову величину  $X$ , тобто розраховано величину  $Z = (X - \bar{x}_B) / \sigma_B$  і обчислено кінці інтервалів  $(z_i, z_{i+1})$  за формулами (1.29) та (1.30).

За формулою (1.31) та (1.32) обчислено теоретичні ймовірності  $p_i$  та теоретичні частоти  $n'_i$  потрапляння  $X$  в інтервали  $(x_i, x_{i+1})$ .

Дані розрахунків представлено в таблиці 2.14, де  $\phi(z)$  – функція Лапласа.

Таблиця 2.14 – Розрахунок теоретичних ймовірностей та частот

$i$	$x_i$	$x_{i+1}$	$z_i$	$z_{i+1}$	$\phi(z_i)$	$\phi(z_{i+1})$	$p_i$	$n'_i$
1	-7,180	-4,948	$-\infty$	-1,42	-0,5	-0,4222	0,0778	4,3568
2	-4,948	-2,716	-1,42	-0,75	-0,4222	-0,2734	0,1488	8,3328
3	-2,716	-0,484	-0,75	-0,07	-0,2734	-0,0279	0,2455	13,748
4	-0,484	1,748	-0,07	0,60	-0,0279	0,2257	0,2536	14,2016
5	1,748	3,979	0,60	1,28	0,2257	0,3997	0,174	9,744
6	3,979	6,210	1,28	$+\infty$	0,3997	0,5	0,1003	5,6168
-	-	-	-	-	-	-	1	56

Для розрахунку спостережуваного значення критерію  $\chi^2$  (“хі квадрат”) К. Пірсона порівняно емпіричні та теоретичні частоти, для чого складено розрахункову таблицю 2.15.

Таблиця 2.15 – Знаходження спостережуваного значення критерію  $\chi^2$ 

$i$	$n_i$	$n'_i$	$n_i - n'_i$	$(n_i - n'_i)^2$	$(n_i - n'_i)^2/n'_i$	$n_i^2$	$n_i^2/n'_i$
1	6	4,3568	1,6432	2,700	0,620	36	8,26
2	8	8,3328	-0,3328	0,111	0,013	64	7,68
3	12	13,748	-1,748	3,056	0,222	144	10,47
4	13	14,2016	-1,2016	1,444	0,102	169	11,90
5	10	9,744	0,256	0,066	0,007	100	10,26
6	7	5,6168	1,3832	1,913	0,341	49	8,72
$\Sigma$	56	56	-	-	1,30	-	57,30

За даними таблиці 2.13  $\chi^2_{\text{спост}} = 1,30$ .

За таблицею критичних точок розподілу  $\chi^2$ , за заданим рівнем значущості  $\alpha=0,05$  і числу ступенів свободи  $k = 6 - 3 = 3$ , де 6 – число груп вибірки, знайдено критичну точку  $\chi^2_{\text{кр}}(0,05; 3)$  області прийняття нульової гіпотези:

$$\chi^2_{\text{кр}\alpha=0,05} = 7,81.$$

Так як  $\chi^2_{\text{спост}} < \chi^2_{\text{кр}}$  ( $1,30 < 7,81$ ), немає підстав відхилити гіпотезу про нормальний розподіл генеральної сукупності, тобто, емпіричні та теоретичні частоти відрізняються несуттєво (випадково).



Для іншої перевірки гіпотези про нормальний розподіл за даними таблиці 2.16,

де  $y_i$  – вирівнюючі частоти;

$n$  – спостережувані частоти;

$h$  – різниця між двома сусідніми варіантами  $u_i = (x_i - \bar{x}_B)/\sigma_B$  та  $\varphi(u) = \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\right)e^{-u^2/2}$ , побудовано нормальну криву, представлену на рисунку 2.6.

Таблиця 2.16 – Розрахунок вирівнюючих частот

$x_i$	$n_i$	$x_i - \bar{x}_B$	$u_i$	$u_i^2/2$	$e^{-u^2/2}$	$\varphi(u)$	$y_i$
-6,064	6	-5,819	-1,761	1,551	0,212	0,0846	4
-3,832	8	-3,587	-1,086	0,589	0,555	0,22129	8
-1,6	12	-1,355	-0,410	0,084	0,919	0,36677	14
0,632	13	0,877	0,265	0,035	0,965	0,38513	15
2,8635	10	3,1085	0,941	0,443	0,642	0,25627	10
5,0945	7	5,3395	1,616	1,306	0,271	0,10809	5
-	56	-	-	-	-	-	56

На рисунку 2.6 зображено нормальну криву розподілу ймовірностей.

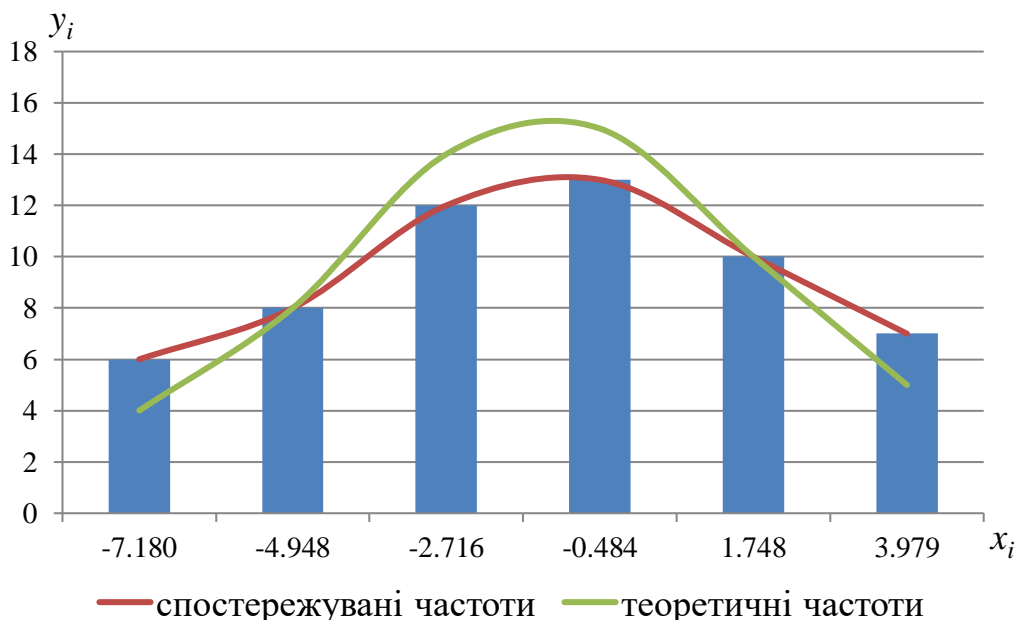


Рисунок 2.6 – Нормальна крива розподілу ймовірностей

Так як неперервна величина  $X$  має нормальний закон розподілу (закон Гауса) з параметрами  $a$  і  $\sigma^2$ , то її густина ймовірностей за формулою (1.34) має вигляд:

$$\varphi_N(x) = \frac{1}{3,3\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x+0,245)^2}{10,92}};$$

а функція розподілу:

$$F(x) = \frac{1}{3,3\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-(x+0,245)^2/10,92} dx.$$

Для перевірки закону розподілу також використано "правило трьох сигм", за яким:

$$a - 3\sigma = -0,245 - (3 \cdot 3,304) = -10,157, \text{ а } a + 3\sigma = -0,245 + (3 \cdot 3,304) = 9,667.$$

Так як інтервал відхилень питомого енергоспоживання від середнього  $[-7,18;6,21]$  входить в отриманий  $[-10,157;9,667]$ , гіпотезу про нормальний закон ще раз підтверджено.

Так як за розрахунками прогнозованих значень питомих витрат електроенергії на виготовлення необхідних об'ємів продукції відхилення від середнього значення 135,005 кВт·год будуть знаходитися в інтервалі  $[-133;136]$ , їх ймовірність за формулою (1.38) складатиме:

$$\begin{aligned} P(-2,005 < X < 0,995) &= \Phi\left(\frac{0,995 + 0,245}{3,304}\right) - \Phi\left(\frac{-2,005 + 0,245}{3,304}\right) = \\ &= \Phi(0,375) - \Phi(0,533) = 0,5480 + 0,372 = 0,92. \end{aligned}$$

Величина розрахованої ймовірності свідчить про досить високу достовірність прогнозованих значень витрат електричної енергії.

## 2.6 Розрахунок зниження витрат електричної енергії при встановленні пристроїв плавного запуску

Стиснене повітря є одним з найдорожчих видів енергії, які використовуються в сучасній промисловості: 1 кДж енергії, одержуваної пневмоприводом машин і механізмів, що використовують стиснене повітря, обходиться в 7–10 разів дорожче, ніж той самий 1 кДж, одержуваний при роботі електроприводу. На виробництво стисненого повітря витрачають в середньому близько 20% всієї споживаної машинобудівною промисловістю електричної енергії. Тому питання скорочення енергетичних втрат і витрат при виробництві стисненого повітря надзвичайно актуальні [16].

Оптимізація роботи існуючих компресорних станцій, забезпечених високопродуктивними турбокомпресорами, дозволяє скоротити витрати електроенергії на виробництво стисненого повітря до 50%, і відбувається за рахунок:

- забезпечення ефективної та безпечної можливості відключення і плавного запуску електродвигунів великої потужності;
- автоматичної підтримки необхідного тиску в пневмосистемі;
- впливу на початкову температуру і тиск всмоктуваного повітря;
- підігріву відхідного до споживача стисненого повітря за рахунок утилізації тепла стиснення [17, 18].

Існує декілька напрямків зниження витрат, викликаних неоптимальною роботою централізованих пневмосистем. Наприклад, пропонується використовувати замість пневмоприводів електро і гідроприводи, що споживають менше енергії або встановити локальні компресори меншої продуктивності, які постачали б стисненим повітрям окремі цехи і агрегати. Для приводу таких компресорів можна використовувати двигуни малої потужності, що робить можливим їх включення і виключення в міру

необхідності. Всі вище перелічені рішення вимагають значної реконструкції існуючих систем виробництва, а значить, величезних капіталовкладень [19].

Найбільш істотним вирішенням проблеми енергозбереження при експлуатації компресорних установок з потужними електродвигунами (від 200 до 10 000 кВт) є застосування пристроїв плавного запуску (далі – ППЗ), основне призначення – домогтися поступового розгону електроприводу і не допустити виникнення високих пускових струмів. Також до їх переваг належать:

- зменшення пускового моменту в 3 рази та пускового струму в 2,5–3 рази;
- зменшення перевантаження та перегріву двигуна, та електричних втрат в ньому;
- усунення ривків в механічній частині обладнання, гідравлічних ударів в трубах і запірній арматурі в момент пуску та зупинки та, як наслідок, збільшення терміну служби електродвигуна і компресора [20].

В киснево-компресорному цеху ПАТ «Запоріжсталь» для виробництва стисненого повітря використовуються 13 повітряних турбокомпресорів типу К-1500, 4 турбокомпресори К-500 та 3 компресори ЦК-135, технічні характеристики яких представлено в таблиці 2.17. Враховуючи роботу лише однієї повітродільної установки ВРУ-60, в цеху постійно працюють лише 5 турбокомпресори типу К-1500, а інші знаходяться в резерві.

Таблиця 2.17 – Технічні характеристики турбокомпресорів типу К-1500.

Тип компресора	Продуктивність	Кількість, шт.	Кінцевий тиск, кг/см <sup>2</sup>	Споживана потужність кВт	Частота обертання, об/хв	Число роторів	Тип двигуна
	м <sup>3</sup> /хв						
1	2	3	4	5	6	7	8
К-1500	1500	13	7,5	7 550	4470	1	СТД-9000-2УХЛ4

Продовження таблиці 2.17

1	2	3	4	5	6	7	8
К-500	500	4	9,0	3000	7625	1	СТД-3150-23УХЛ4
ЦК-135/8	135	3	7,8	870	13535	2	СТД-1000

Технічні характеристики двигунів компресорів представлено в таблиці 2.18.

Таблиця 2.18 – Технічні характеристики двигунів компресорів

Тип двигуна	Потужність, кВт	Напруга, В	Частота обертання, об/хв	ККД, %	Маса кг
СТД-9000-2УХЛ4	9000	6000	3000	97,8	24700
СТД-3150-23УХЛ4	3150	6000	3000	97,2	12300
СТД-1000	1000	6000	3000	97,1	20800

Для зменшення пускових струмів та початкового ударного навантаження на муфту і вал привода на кожний електродвигун компресора типу К-1500 пропонується встановити пристрій плавного Чебоксарського електроапаратного заводу компанії “ЧЭАЗ”.

Зважаючи на технічні характеристики двигунів компресора, вибрано 5 пристроїв плавного запуску типу УППВЭ1-5110 ОУХЛ4 з номінальним струмом 1600 А, напругою 6 кВ та потужністю 8,0 МВт.

Економічний ефект від впровадження пристроїв плавного запуску визначається за формулою:

$$E = (P_1 \cdot t_1 - P_2 \cdot t_2) \cdot n, \quad (2.1)$$

де  $P_1 = 1,25P_{\text{ном}}$  – початкове ударне навантаження на муфту і вал привода без впровадження ППЗ, кВт;

$P_2 = 0,6P_{\text{НОМ}}$  – початкове ударне навантаження на муфту і вал привода з впровадженням ППЗ, кВт;

$t_1$  – тривалість дії пускових струмів при пуску з ППЗ, що складає в середньому 19 секунд або  $0,0132$  год;

$t_2$  – тривалість дії пускових струмів при прямому пуску, що складає в середньому 5 секунд або  $4,167 \cdot 10^{-3}$ ;

$n$  – середня кількість пусків на рік, що складає 104 пуски.

Таким чином, економічний ефект від впровадження пристроїв плавного запуску становить, тис. кВт·год:

$$E = (1,25 \cdot 9000 \cdot 0,0132 - 0,6 \cdot 9000 \cdot 3,472 \cdot 10^{-3}) \cdot 104 = 1626,295$$

Таким чином, знайдена залежність між обсягами спожитої електричної енергії та об'ємами виготовленої продукції для умов киснево-компресорного цеху майже повністю відображає реальні витрати енергії, що підтверджують знайдені показники адекватності моделі.

Індекси кореляції та детермінації свідчать про високу тісноту зв'язку між розглядуваними ознаками, а середня помилка апроксимації та стандартні помилки коефіцієнтів регресії – про якість та правильність вибраної моделі.

Підтвердження гіпотези про нормальний розподіл величин відхилень питомого енергоспоживання від середнього дозволило знайти ймовірності попадання даних величин в заданий довірчий інтервал та підтвердило достовірність прогнозного енергоспоживання.

Покращення роботи компресорного обладнання за рахунок встановлення пристроїв плавного запуску дозволить не тільки продовжити термін служби компресорів та їх двигунів, а й скоротити витрати електроенергії, пов'язані з неможливістю відключення обладнання в період зупинки виробництва.

Отже, розглянуті в магістерській роботі заходи дадуть можливість зменшити розмір заявленого електричного навантаження не тільки за рахунок уточнення прогнозування, а й завдяки впровадженню технічного рішення, що в результаті призведе до зменшення витрат.

### 3 ВИЗНАЧЕННЯ ЕКОНОМІЧНОГО ЕФЕКТУ ВІД ПРОГНОЗУВАННЯ ТА ВСТАНОВЛЕННЯ ПРИСТРОЇВ ПЛАВНОГО ЗАПУСКУ

Враховуючи середню вартість електричної енергії для киснево-компресорного цеху ПАТ «Запоріжсталь» 2,14 грн/кВт·год, економічний ефект  $E$  від покращення роботи компресорного обладнання за рахунок встановлення пристроїв плавного запуску складатиме, тис. грн:

$$E = 2,14 \cdot 1626,295 = 3480,3.$$

Термін окупності впровадження пристроїв плавного запуску визначається за формулою:

$$T_{\text{ок}} = \frac{\Sigma \text{витрат}}{\Sigma \text{економії}} \quad (3.1)$$

Враховуючи вартість одного пристрою УППВЭ1-5110 ОУХЛ4 – 300 тис. грн. та вартість монтажу 25 тис. грн., термін окупності його впровадження для п'яти електродвигунів складатиме:

$$T_{\text{ок}} = \frac{5 \cdot (300000 + 25000)}{3480300} = 6 \text{ місяців.}$$

Враховуючи середньорічну економію електроенергії 3480,3 тис. кВт·год, економія споживання на місяць становитиме 290 тис. кВт·год.

Таким чином, зважаючи на значну економію електроенергії та зовсім малий термін окупності в 6 місяців, впровадження пристроїв плавного запуску на електродвигуни компресора є доцільним.

Для розрахунку економічного ефекту від прогнозування об'ємів енерговитрат необхідно порівняти планові та прогнозовані показники, наведені



у таблиці 3.1. Графік електричного навантаження на 2019–2022 роки представлено на рисунку 3.1.

Дані розрахунку вартості перспективних енерговитрат за бізнес планом, прогнозом та прогнозом з урахуванням впровадження ППЗ, представлено в таблиці 3.2. Розрахунок загального економічного ефекту від прогнозування та встановлення ППЗ представлено в таблиці 3.3.

Таблиця 3.1 – Аналіз планового та прогнозованого енергоспоживання на 2019–2022 роки

рік	місяць	Витрати електроенергії на виготовлення продукції, тис. кВт·год						
		планові			прогнозовані			з урах. оптиміз.
		кисень	інша продукція	всього	кисень	інша продукція	всього	всього
1	2	3	4	5	6	7	8	9
2019	1	24699,880	19773,699	44473,579	24371,972	19576,157	43948,129	43503,596
	2	24484,700	19804,617	44289,317	24149,631	19605,922	43755,553	43311,020
	3	24420,900	19730,741	44151,641	24083,725	19534,800	43618,525	43173,992
	4	24103,640	19994,963	44098,603	23756,117	19789,138	43545,255	43100,722
	5	24101,900	20431,951	44533,851	23754,320	20209,578	43963,899	43519,366
	6	23936,020	20218,027	44154,047	23583,111	20003,787	43586,898	43142,365
	7	24650,580	20429,013	45079,593	24321,023	20206,752	44527,776	44083,243
	8	25076,880	20161,140	45238,020	24761,740	19949,052	44710,792	44266,259
	9	24817,620	20247,997	45065,617	24493,670	20032,621	44526,291	44081,758
	10	24835,020	19976,309	44811,329	24511,657	19771,186	44282,843	43838,310
	11	24426,120	19927,042	44353,162	24089,117	19723,767	43812,884	43368,351
	12	24137,860	19602,643	43740,503	23791,443	19411,460	43202,903	42758,370
		сума	293691,120	240298,140	533989,260	289667,527	237814,220	527481,747
2020	1	23768,400	19331,073	43099,473	23410,163	19149,902	42560,065	42115,532
	2	23855,400	19404,549	43259,949	23499,921	19220,679	42720,600	42276,067
	3	24106,540	20174,207	44280,747	23759,110	19961,625	43720,735	43276,202
	4	24574,020	19314,029	43888,049	24241,912	19133,483	43375,396	42930,863
	5	24490,500	19731,142	44221,642	24155,623	19535,186	43690,809	43246,276
	6	24496,880	19450,279	43947,159	24162,214	19264,725	43426,939	42982,406
	7	24483,540	19615,767	44099,307	24148,433	19424,097	43572,530	43127,997
	8	23926,160	19864,568	43790,728	23572,936	19663,632	43236,569	42792,036
	9	24142,500	19586,864	43729,364	23796,233	19396,265	43192,499	42747,966
	10	23916,300	20194,834	44111,134	23562,761	19981,472	43544,234	43099,701
	11	24105,960	19625,646	43731,606	23758,511	19433,609	43192,121	42747,588
	12	24419,160	20296,224	44715,384	24081,928	20079,018	44160,946	43716,413

Продовження таблиці 3.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
2021	сума	290285,360	236589,181	526874,541	286149,747	234243,695	520393,441	515059,045
	1	24431,340	19810,375	44241,715	24094,509	19611,465	43705,974	43261,441
	2	24506,160	19947,277	44453,437	24171,801	19743,244	43915,045	43470,512
	3	23916,880	20188,615	44105,495	23563,360	19975,489	43538,849	43094,316
	4	23926,160	20193,747	44119,907	23572,936	19980,426	43553,362	43108,829
	5	23932,540	19957,853	43890,393	23579,520	19753,422	43332,942	42888,409
	6	23930,220	20133,924	44064,144	23577,126	19922,864	43499,990	43055,457
	7	23928,480	19934,974	43863,454	23575,330	19731,402	43306,732	42862,199
	8	23966,180	19435,684	43401,864	23614,236	19250,668	42864,904	42420,371
	9	23850,180	19571,719	43421,899	23494,536	19381,680	42876,216	42431,683
	10	23803,780	19190,813	42994,593	23446,663	19014,774	42461,437	42016,904
	11	23596,720	19410,567	43007,287	23233,086	19226,476	42459,562	42015,029
	12	23766,080	19868,940	43635,020	23407,770	19667,841	43075,611	42631,078
сума	287554,720	237644,487	525199,207	283330,873	235259,750	518590,623	513256,227	
2022	1	23817,700	19440,562	43258,262	23461,024	19255,366	42716,390	42271,857
	2	23928,480	19270,623	43199,103	23575,330	19091,667	42666,997	42222,464
	3	24096,680	19603,295	43699,975	23748,932	19412,087	43161,019	42716,486
	4	23980,100	20047,127	44027,227	23628,602	19839,341	43467,943	43023,410
	5	23875,120	19604,197	43479,317	23520,269	19412,955	42933,224	42488,691
	6	23918,040	20244,166	44162,206	23564,557	20028,935	43593,492	43148,959
	7	24110,020	20156,447	44266,467	23762,703	19944,537	43707,240	43262,707
	8	23810,740	19902,678	43713,418	23453,844	19700,316	43154,160	42709,627
	9	24177,300	19659,178	43836,478	23832,161	19465,897	43298,058	42853,525
	10	24090,880	19775,535	43866,415	23742,945	19577,925	43320,869	42876,336
	11	23928,480	19671,959	43600,439	23575,330	19478,204	43053,534	42609,001
	12	23912,240	19904,149	43816,389	23558,572	19701,732	43260,304	42815,771
	сума	287645,780	237279,916	524925,696	283424,268	234908,963	518333,231	512998,835
сума	1159176,980	951811,724	2110988,704	1142572,416	942226,628	2084799,044	2063461,460	

На рисунку 3.1 наведено порівняння енергоспоживання планових з прогнозованими.

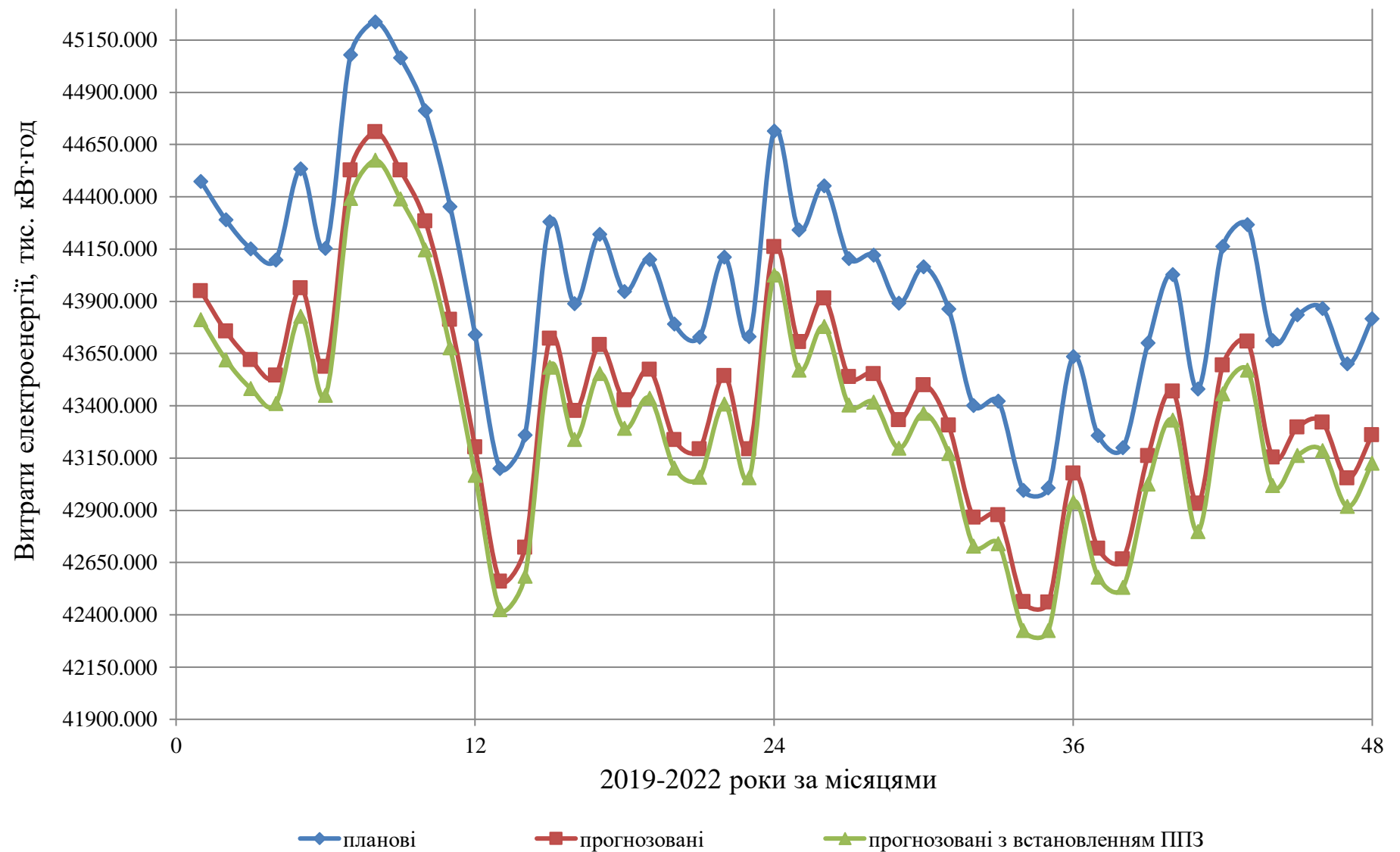


Рисунок 3.1 – Прогнозовані обсяги енергоспоживання киснево-компресорного цеху на 2019–2022 роки

Таблиця 3.2 – Розрахунок вартості перспективних енерговитрат

рік	планові витрати		прогнозовані витрати		прогнозовані з урахуванням покращення роботи КО	
	тис. кВт·год	тис. грн.	тис. кВт·год	тис. грн.	тис. кВт·год	тис. грн.
2019	533989,26	1142737	527481,75	1128811	525892,8	1125410
2020	526874,54	1127511	520393,44	1113642	518804,5	1110241
2021	525199,20	1123926	518590,62	1109784	517001,7	1106383
2022	524925,67	1123340	518333,23	1109233	516744,3	1105833

Таблиця 3.3 – Розрахунок загального економічного ефекту

рік	Економічний ефект			
	від прогнозування		від прогнозування з впровадженням ППЗ	
	тис. кВт·год	тис. грн.	тис. кВт·год	тис. грн.
2019	6507,513	13926	8096,403	17326
2020	6481,100	13870	8069,990	17269
2021	6608,584	14142	8197,474	17543
2022	6592,464	14107	8181,354	17508

Таким чином, економічний ефект від запропонованого прогнозування обсягів споживання електричної енергії киснево-компресорним цехом, в середньому на рік становитиме 14 млн. грн. або 1,5 % від планових витрат.

Економічний ефект від впровадження пристроїв плавного запуску в середньому на рік становитиме 3,3 млн. грн. або 1,6% від загального обсягу споживання електричної енергії двигунами.

Загальний економічний ефект від впровадження запропонованих заходів в середньому на рік становитиме 17,3 млн. грн. або 1,5 % від загальних витрат на придбання електричної енергії за планом.

Запропоновані в магістерській роботі рішення дадуть можливість зменшити розмір заявленого електричного навантаження не тільки за рахунок уточнення прогнозування, а й завдяки впровадженню ППЗ для покращення роботи компресорів, що в результаті призведе до зменшення грошових витрат.

Загальний економічний ефект від впровадження запропонованих заходів на 2019–2022 роки за бізнес планом, складатиме майже 69,2 млн. грн.

## 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА

### 4.1 Характеристика потенційних небезпечних та шкідливих виробничих факторів

Основним завдання роботи киснево-компресорного цеху ПАТ «Запоріжсталь» є розділення повітря за допомогою повітророзподільного пристрою ВРУ-60 для отримання стисненого повітря, кисню, азоту та аргону.

Стиснене повітря виробляється відповідно до "Інструкції з експлуатації і обслуговування устаткування компресорної станції" № 12-02 стаціонарними повітряними турбокомпресорами типу К-1500.

До потенційно небезпечних та шкідливих виробничих факторів приміщення киснево-компресорного цеху належать:

- недостатня освітленість робочої зони;
- небезпека ураження електричним струмом;
- рухомі частини механізмів і приводів;
- вібрація від технологічного обладнання та вентиляційних установок;
- шум, створюваний обладнанням [21,22].

Основними шкідливими чинниками в приміщенні цеху є небезпека ураження електричним струмом та шум, що досягає 85 дБА, джерелом якого є:

- бустер-компресор;
- турбодетандер;
- насосне та вентиляційне обладнання [23].

ККЦ є приміщенням категорії середньої важкості (виконуються роботи середньої важкості), тому повинні дотримуватися такі вимоги:

- оптимальна температура повітря – 22–24 °С (допустима – 19–21 °С);
- оптимальна відносна вологість – 40–60% (допустима – не більше 75%);
- швидкість руху повітря не більше 0,1 м/с [24, 25].

Таким чином, аналіз шкідливих і небезпечних факторів дозволяє зробити висновок, що умови праці в цеху характеризуються наявністю шкідливих виробничих чинників, які не призводять до зростання захворюваності з втратою працездатності, проте характеризуються проявом початкових ознак професійної патології.

#### 4.2 Заходи з поліпшення умов праці

Для створення і автоматичної підтримки в цеху оптимальних значень температури, вологості і швидкості руху повітря в холодну пору року використовується водяне опалення, в теплу пору року застосовується кондиціонування повітря.

У зв'язку з тим, що природне освітлення цеху здійснюється через віконні отвори і є дуже слабким, на робочому місці має застосовуватися також штучне освітлення. Штучне освітлення створюють електричним джерелом світла, яке включають в міру необхідності, регулюють інтенсивність світлового потоку і його спрямованість.

До заходів щодо захисту працівників від шуму належать:

- використання сучасного обладнання;
- розміщення пультів контролю та управління у звукоізованому приміщенні;
- установка на бустер-компресорі та насосах шумопоглинального кожуха;
- застосування індивідуальних засобів захисту від шуму;
- раціональне планування приміщення [26, 27].

Найбільш ефективним засобом зниження шуму є заміна шумних технологічних операцій на малOSHумні або повністю безшумні, проте цей



метод боротьби не завжди можливий, тому велике значення має зниження його в джерелі. Зниження шуму у киснево-компресорному цеху досягається шляхом вдосконалення конструкції або схеми тієї частини устаткування, яка чинить шум, використання в конструкції матеріалів із зниженими акустичними властивостями, устаткування на джерелі шуму додаткового звукоізолюючого пристрою або обгороджування, розташованого по можливості ближче до джерела. Для боротьби з шумом на шляхах передачі передбачений шумопоглинальний кожух, який може закривати окремий шумний вузол машини.

Пропонується знизити шум від устаткування застосовуючи акустичні екрани, що відгороджують шумний механізм від робочого місця або зони обслуговування машини. Передбачається застосування шумопоглинальних облицювань для обробки стелі і стін шумних приміщень, що призводить до зміни спектру шуму у бік нижчих частот, що навіть при відносно невеликому зниженні рівня істотно покращує умови праці.

З метою захисту від шуму обслуговуючого персоналу на виробничих дільницях з шумними технологічними процесами або з шумним обладнанням необхідно влаштовувати кабінки спостереження та дистанційного контролю. Використовуючи звукоізольовані кабінки, можна забезпечити практично будь-яке необхідне зниження шуму [28].

Кабінки виготовляються з цегли, бетону та інших будівельних матеріалів. Кабінки можуть бути збірними з металевих панелей. У приміщеннях з джерелами теплових випромінювань кабінки повинні також забезпечувати захист від цього шкідливого чинника.

Збірні звукоізольовані кабінки встановлюються на гумових віброізоляторах. З метою зниження шуму, який створюється припливно-витяжною системою вентиляції, необхідно встановлювати глушители шуму з боку входу та виходу повітря.

Вікна мають бути мінімальних розмірів з використанням товстого скла або з органічного скла. За периметром вікна необхідно герметизувати

гумовими прокладками. При використанні подвійного скління між листами скла встановлюється звукоізолювана прокладка по периметру вікна.

У дверях кабіни необхідно забезпечити щільність та герметичність по всьому периметру дверей. При умові високої необхідної ізоляції двері повинні бути подвійними. У місцях прокладки технологічних комунікацій слід також передбачати заходи звукоізоляції. Внутрішні поверхні кабіни личкуються звукопоглинальним матеріалом з максимальними коефіцієнтами звукопоглинання в діапазоні 250–2000 Гц.

Розрахунок необхідної ізоляції кабіни технолога киснево-компресорного цеху проведено за наступним алгоритмом.

Необхідне зниження шуму кабіною визначається, як:

$$R_{\text{каб.н.}} = L_{\text{ш}} - L_{\text{дон}}, \quad (4.1)$$

де  $L_{\text{ш}}$  – октавний рівень звукового тиску на робочому місці шумного приміщення на запропонованому місці установки кабіни, виміряний в діючому приміщенні, дБ;

$L_{\text{дон}}$  – допустимий рівень звукового тиску на робочих місцях в кабінах.

Відповідно до формули 4.1 необхідне зниження шуму кабіною у киснево-компресорному цеху складає:

$$R_{\text{каб.н.}} = 88 - 80 = 8 \text{ дБ.}$$

Необхідна звукоізолювана здатність елементів огорожувальних конструкцій (вікон, стін та дверей звукоізолюваних кабін) визначається за формулою, дБ:

$$R_{\text{н.і}} = L_{\text{сер}} - 10 \lg B + 10 \lg S_i - L_{\text{дон}} + 10 \lg(n), \quad (4.2)$$

де  $B_i$  – постійна кабіни у даній октавній смузі частот, м<sup>2</sup>;

$S_i$  – площа  $i$ -го елемента кабіни, через який шум проникає в кабіну, м<sup>2</sup>;

$n$  – кількість однакових елементів.

Постійну приміщення  $B_i$  визначають за формулою:

$$B = B_{1000} \cdot \mu, \quad (4.3)$$

де  $B_{1000}$  – постійна приміщення на середньгеометричній частоті 1000 Гц, визначається за таблицею 4.2 залежно від об'єму  $V$ , м<sup>3</sup> і типу приміщення, м<sup>2</sup>;  
 $\mu$  – частотний множник, визначається за таблицею 4.3.

Розрахунок проведено для частоти 125 Гц.

Об'єм кабіни складає, м<sup>3</sup>:

$$V_k = a \cdot b \cdot h = 3,3 \cdot 4,2 \cdot 2,3 = 31,88$$

Постійна приміщення  $B_{1000}$  на середньгеометричній частоті 1000 Гц визначається, враховуючи тип приміщення за таблицею 4.2, м<sup>2</sup>:

$$B_{1000} = V/20 = 31,88/20 = 1,59$$

Таблиця 4.1 – Постійна приміщення залежно від об'єму  $V$ , м<sup>3</sup> і типу приміщення

Тип приміщення	Описання приміщення	Постійна приміщення $B_{1000}$ , м <sup>2</sup>
1	2	3
1	З невеликою кількістю людей (металообробні цехи, вентиляційні камери, генераторні, машинні зали, випробувальні стенди і т.п.)	$V/20$

Продовження таблиці 4.1

1	2	3
2	З жорсткими меблями і великою кількістю людей або з невеликою кількістю людей і м'якими меблями (лабораторії, ткацькі і деревообробні цехи, кабінети)	V/10
3	З великою кількістю людей і м'якими меблями (робочі приміщення будівель управлінь, аудиторії учбових закладів, класні приміщення в школах, житлові приміщення і т. п)	V/6
4	Приміщення із звукопоглинальним облицюванням стелі і частини стін	V/1,5

Таблиця 4.2 – Частотний множник

Об'єм приміщення V, м <sup>3</sup>	Частотний множник $\mu$ на середньгеометричних частотах октавних полос, Гц							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
<200	0,8	0,75	0,7	0,8	1	1,4	1,8	2,5

Постійна приміщення  $V$  визначається за формулою (4.3), м<sup>2</sup>:

$$V = 1,59 \cdot 0,75 = 1,19.$$

Площа вікна складає, м<sup>2</sup>:

$$S_{\text{вікна}} = 3 \cdot 1 = 3.$$

Площа дверей становить, м<sup>2</sup>:

$$S_{\text{дверей}} = 0,8 \cdot 2 = 1,6.$$

Площа п'яти стін, тому що так розташована кабіна, м<sup>2</sup>:

$$S_{\text{стін}} = 2 \cdot 4,2 \cdot 2,3 + 2 \cdot 3,3 \cdot 2,3 + 4,2 \cdot 3,3 = 48,36.$$

Необхідна звукоізолювана здатність елементів огорожувальних конструкцій становить, дБ:

$$R_{н.вікна} = 90 - 10\lg 1,19 + 10\lg 3 - 80 + 10\lg 1 = 14,02;$$

$$R_{н.двери} = 90 - 10\lg 1,19 + 10\lg 1,6 - 80 + 10\lg 1 = 11,29;$$

$$R_{н.стіни} = 90 - 10\lg 1,19 + 10\lg 48,36 - 80 + 10\lg 5 = 33,08;$$

Перевірочний розрахунок очікуваного зниження шуму кабіною  $R_{каб}$  визначається за формулою:

$$R_{каб} = R_{сер} + 10\lg B - 10\lg \sum_{i=1}^n S_i, \quad (4.4)$$

де  $R_{сер}$  – середня звукоізоляція всіх огорожень кабіни, дБ;

$S_i$  – площа кожного елемента огороження, м<sup>2</sup>;

$n$  – загальна кількість елементів огороження.

Середня ізоляція повітряного шуму даною неоднорідною (збірною) огорожувальною конструкцією  $R_{сер}$  визначається за формулою, дБ:

$$R_{сер} = 10\lg ( S_{заг} / \sum_{i=1}^n S_i \cdot 10^{-0,1 \cdot R_i} ), \quad (4.5)$$

де  $S_{заг}$  – загальна площа неоднорідного огороження, м<sup>2</sup>;

$S_i$  та  $R_i$  – площа, м<sup>2</sup>, та звукоізоляція окремого елемента, дБ.

Середня звукоізоляція  $R_{сер}$  за формулою 4.4 становить, дБ:

$$R_{сер} = 10\lg ( 52,96 / ( 3 \cdot 10^{-0,1 \cdot 23} + 1,6 \cdot 10^{-0,1 \cdot 12} + 48,36 \cdot 10^{-0,1 \cdot 38} ) ) = 26,35.$$

Очікуване зниження шуму кабіною  $R_{каб}$  становить:

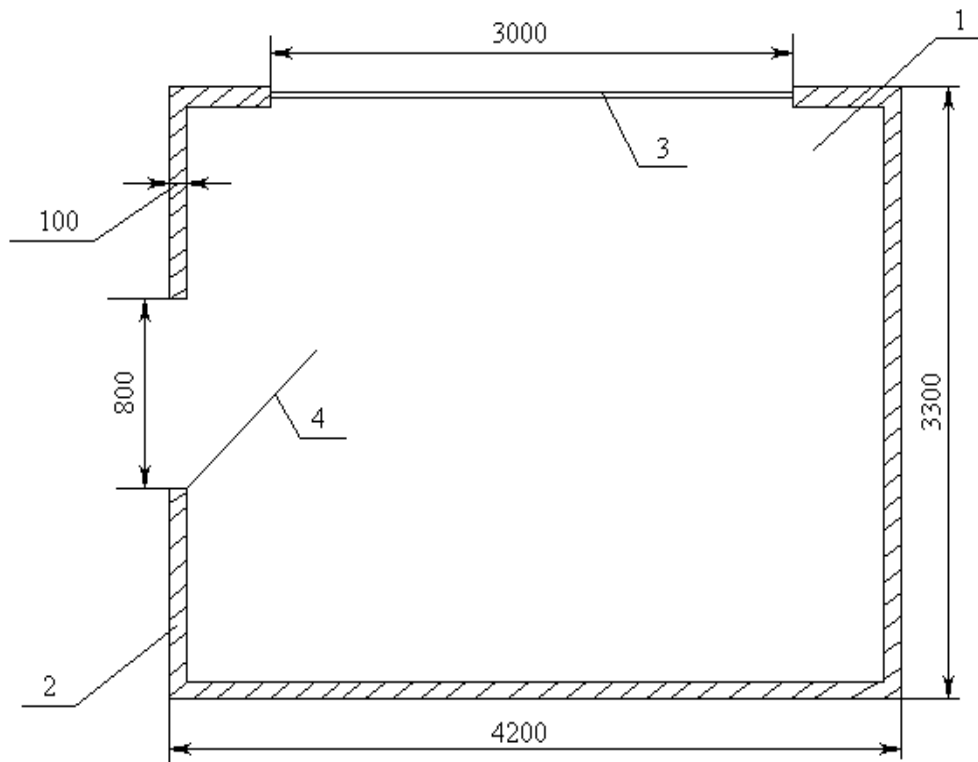
$$R_{каб} = 25,32 + 10 \lg 1,19 - 10 \lg 52,96 = 8,83.$$

Перевіряємо умову  $R_{каб} \geq R_{каб.н.}$ :  $8,83 \geq 8$  дБ – умова виконується.

Таким чином, вибрано звукоізолюючу кабіну технолога:

- стіни кабіни виготовляються залізобетонною панеллю товщиною 100 мм, поверхневою густиною  $250 \text{ кг/м}^2$ ;
- двері із стандартного полотна завтовшки 40 мм без ущільнювальних прокладок;
- одинарне вікно з органічним склом товщиною 20 мм.

Звукоізольовану кабіну технолога зображено на рисунку 4.1.



1 – робоча зона; 2 – стіна; 3 – вікно; 4 – двері.

Рисунок 4.1 – Звукоізольована кабіна технолога

Таким чином, кабіна технолога забезпечує необхідну звукоізоляцію, адже за розрахунком:  $R_{каб} \geq R_{каб.н.}$ :  $8,83 \geq 8$  дБ – умова виконується.

### 4.3 Виробнича санітарія

Суттєвий вплив на стан організму працівника, його працездатність здійснює мікроклімат (метеорологічні умови) виробничого приміщення, який визначається температурою, відносною вологістю та рухом повітря.

Під оптимальними мікрокліматичними умовами розуміють поєднання параметрів мікроклімату, які при тривалому та систематичному впливі на людину забезпечують зберігання нормального теплового стану організму без активізації механізмів терморегуляції. Вони забезпечують відчуття теплового комфорту та створюють передумови для високого рівня працездатності.

Показники мікроклімату в приміщенні представлено в таблиці 4.4.

Таблиця 4.3 – Нормовані величини температури, відносної вологості і швидкості руху повітря в киснево-компресорному цеху

Період року	Категорія робіт	Температура			Відносна вологість, %		Швидкість руху, м/с	
		Оптимальна	допустима		Оптимальна	допустима	Оптимальна, не більше	Допустима на робочих місцях
			Верхня межа	Нижня межа		На робочих місцях, не більше		
			Постійна	Постійна				
Холодний	Середньої важкості Па	19-21	23	17	40-60	75	0,2	Не більше 0,3
Теплий	Середньої важкості Па	21-23	27	18	40-60	65 (при 26°C)	0,3	0,2-0,4

Створення необхідних параметрів мікроклімату у виробничому приміщенні забезпечується природною та механічною загальною вентиляцією повітря, яка представляє собою зміну повітря в приміщенні, призначену підтримувати в ньому відповідні метеорологічні умови і чистоту повітряного середовища.

Вентиляція приміщень досягається видаленням з них нагрітого або забрудненого повітря і подачею чистого зовнішнього повітря.

Оптимальна температура повітря в цеху в холодну пору року забезпечується водяною системою опалення.

Одним із чинників, які визначають сприятливі умови праці, є раціональне освітлення робочої зони. Якщо освітлення виробничих приміщень правильно розраховане і виконане, очі працівника протягом тривалого часу зберігатимуть здатність добре розрізняти предмети і знаряддя праці, не втомлюючись. Це сприяє зниженню виробничого травматизму і професійного захворювання очей.

Недостатнє освітлення робочих місць є однією з причин низької продуктивності праці. У цьому випадку очі працівника сильно напружені, важко розрізняють оброблювані предмети, у людини знижується темп і якість роботи, погіршується загальний стан.

У киснево-компресорному цеху використовується природне бокове та штучне освітлення в якості люмінесцентних ламп типу ДРЛ.

Розряд зорових робіт у приміщенні цеху – VIII а. Загальне освітлення становить 75 Лк.

#### 4.4 Електробезпека

Приміщення цеху згідно ПУЕ можна віднести до I класу — з підвищеною небезпекою ураження струмом (відносна вологість повітря



понад 75%; струмопровідний пил; температура понад 350С або короткочасно 400С незалежно від пори року; можливість одночасного дотикання людини до металевих корпусів електрообладнання і заземлених металевих конструкцій будівлі; наявність струмопровідних підлог земляних, залізобетонних, цегляних та ін.) [29].

Для захисту від електричного струму передбачається надійне захисне заземлення електростаткування. Заземлюючі пристрої забезпечують безпеку людей і захист електроустановок, експлуатаційні режими роботи. Для тієї частини електростаткування, яка може виявитися під напругою внаслідок порушення ізоляції, забезпечено надійний контакт із заземлюючим пристроєм. Запропоновано проводити інструментальну перевірку стану захисного заземлення не рідше одного разу на рік, а також після монтажу або ремонту.

Для забезпечення електробезпеки запропоновано дотримуватися наступних вимог:

- конструкція виробничого устаткування, що приводиться в дію електроенергією, повинна включати пристрій для забезпечення електробезпеки;
- в устаткуванні має бути забезпечено захист від випадкового дотику до частин, що знаходяться під напругою;
- ручки, важелі і кнопки устаткування, до яких торкаються руками при нормальній експлуатації, не повинні виявлятися під напругою при пошкодженні ізоляції.

Основними організаційними заходами запобігання ураження електричним струмом є інструктаж і навчання безпечним методам праці, перевірка знань правил безпеки та інструкцій відповідно до виконуваної роботи.

#### 4.5 Пожежна безпека

Будівлю, в якій знаходиться лабораторія, по вибуховій і пожежній небезпеці можна віднести до приміщення категорії Д, оскільки в цеху є горючі і важкозаймісті речі, які при взаємодії з вогнем можуть горіти без вибуху. За конструктивними характеристиками будівлю можна віднести до будівель переважно з каркасною конструктивною схемою. Елементи каркаса — з металевих незахищених конструкцій. Огороджувальні конструкції — з негорючих листових матеріалів з негорючим утеплювачем або утеплювачем груп низької та помірної горючості (ступінь вогнестійкості будівлі — IIIa) [30].

Можливими причинами пожежі є підвищена температура довкілля, обладнання та наявність горючо-змазочних матеріалів.

Запобігання пожежі повинно досягатися запобіганням утворенню горючого середовища, запобіганням утворення в горючому середовищі джерел запалення.

Протипожежна безпека в енергосиловому цеху забезпечується:

- застосуванням засобів пожежогасіння і відповідної пожежної техніки;
- застосуванням автоматичних установок пожежної сигналізації;
- застосуванням основних будівельних конструкцій об'єктів з
- регламентованими межами вогнестійкості і межами поширення вогню;
- нанесенням на поверхні конструкцій вогнезахисних фарб;
- пристроями, що забезпечують обмеження поширення пожежі;
- організацією своєчасної евакуації людей;
- застосуванням засобів колективного і індивідуального захисту людей від небезпечних чинників пожежі;
- застосуванням систем протипожежного захисту.

Запобігання виникненню джерела вибуху досягаються шляхом: регламентації вогневих робіт; запобіганням нагріву устаткування до температури самозаймання вибухонебезпечного середовища; застосуванням швидкодіючих засобів захисного відключення можливих електричних джерел ініціації вибуху; застосуванням вибухозахищеного устаткування.

Для зовнішнього пожежогасіння передбачається установка гідрантів із загальною витратою води 20 л/с.

Для гасіння одягу, насиченого киснем, передбачено протипожежні душові кабінки з автоматичною подачею води при вході в кабінку.

У приміщеннях передбачаються первинні засоби пожежогасіння: пінні вогнегасники типу ОХП-10, ОП-М і ОП-9ММ (густопінні хімічні), ОХВП-10 (повітряно-пінний хімічний), вуглекислотні типу ВВ, азбестові ковдри, ящики з піском, протипожежні щити.

В якості датчиків використані димові і теплові датчики. На виході з приміщень встановлюються сповіщувачі ручні. Сигнал про пожежу виводиться на прилад “Дунай”, встановлюваний в приміщенні, в якому знаходиться цілодобовий черговий персонал. Передбачено автодозвон для передачі сигналу про пожежу на пульт централізованого спостереження державної пожежної охорони.

Передбачено систему оповіщення про пожежу першого і другого типу з використанням гучномовного зв'язку, установкою світлових показників та звукових сигналів.

Передбачено блискавкозахист та заземлення споруд. В якості блискавко приймального пристрою використовуються металоконструкції цеху.

Захист від електростатичної індукції забезпечується шляхом приєднання всіх металевих корпусів обладнання та комунікацій до внутрішньої магістралі заземлення.

Для захисту від занесення від високих потенціалів по підземних і надземних комунікаціям їх необхідно при вводі в споруду приєднати до заземлювального пристрою.

#### 4.6 Засоби індивідуального захисту

На робочих місцях, де не вдається знизити шум і вібрацію допустимих рівнів технічними засобами, або де це недоцільно з техніко-економічних міркувань, застосовують засоби індивідуального захисту (далі – ЗІЗ).

ЗІЗ не тільки сприяють профілактиці захворювань, прямо або побічно пов'язаних з впливом шуму (приглухуватість, шумова хвороба, порушення нервової, серцево-судинної систем тощо), але і підвищують працездатність людини.

У залежності від конструктивного виконання ЗІЗ поділяються на протишумові навушники, що закривають вушну раковину зовні; протишумові вкладиші, що перекривають зовнішній слуховий прохід або прилегли до нього; протишумові шоломи і каски; протишумові костюми.

Протишумові вкладиші роблять з твердих, еластичних і волокнистих матеріалів. Вони бувають одноразового та багаторазового користування.

Щодо ефективності захисту від шуму, маси і сили притиснення до привушної зони навушники й вкладиші діляться на три групи: А, Б та В. ЗІЗ вибирають виходячи з частотного спектру шуму на робочому місці і враховують зручність їх носіння при виконанні даної робочої операції і кліматичні умови.

Протишумові шоломи закривають всю голову, вони застосовуються при дуже високих рівнях шуму в поєднанні з навушниками, а також протишумні костюмами. Навушники виконані із звукопоглинальних

матеріалів, щільно облягають вушну раковину і стримуються дугоподібною пружиною.

При роботі з ручним механізованим електричним і пневматичним інструментом застосовують ЗІЗ рук від дії вібрацій. Це рукавиці, а також віброзахисні прокладки або пластини, оснащені кріпленнями до рук. Враховуючи несприятливу дію холоду на розвиток віброхвороб, в зимовий час працівників треба забезпечувати теплими рукавицями.

При роботі з ручними механізмами та за умов дотримання гігієнічних норм, сумарний час роботи в контактi з вібрацією не повинен перевищувати 2/3 робочого часу. Крім того, одноразове безперервне дію вібрації, включаючи мікропаузи, не повинно перевищувати для ручних машин 15-20 хвилин. Обідня перерва рекомендується не менше ніж 40 хвилин, необхідні також дві регламентованих перерви (для активного відпочинку, виробничої гімнастики за спеціальним комплексом, фізіопротілактичних процедур): 20 хвилин через 1-2 години після початку зміни і 30 хвилин через 2 години після обідньої перерви.

Таким чином, приміщення киснево-компресорного цеху ПАТ «Запоріжсталь» відповідає майже всім вимогам з охорони праці та техногенної безпеки. Для зниження шуму, пов'язаного з роботою компресорного обладнання, розраховано шумоізоляцію кабіни технолога.

## ВИСНОВК

Таким чином, в процесі дослідження вирішено задачу щодо зниження грошових витрат на придбання електричної енергії за рахунок підвищення точності прогнозування обсягів споживання електричної енергії на перспективний період в залежності від об'ємів виготовленої продукції та оцінки достовірності прогнозу:

1. Невідповідність фактичних значень енергоспоживання киснево-компресорного цеху ПАТ «Запоріжсталь» на виробництво кисню, азоту, аргону та стисненого повітря запланованим витратам виявила необхідність підвищення точності прогнозування з метою усунення ризиків сплати можливих штрафів за споживання понад договірних обсягів електричної енергії, або за їх менше споживання, що призводить до перевитрат грошових коштів.

За результатами аналізу існуючих методів прогнозування в якості найбільш доцільного методу вибрано кореляційно-регресійний аналіз з використанням теорії ймовірностей для підтвердження достовірності прогнозу.

2. За допомогою кореляційно-регресійного аналізу знайдено залежності між обсягами спожитої електроенергії та об'ємами виготовленого кисню і азоту, аргону, стисненого повітря, які представлено у вигляді відповідних рівнянь:  $y = 0,345x^{1,047}$  та  $y = 0,186x^{0,972}$ .

Величини розрахованих індексів кореляції  $R = 0,953$  та  $R = 0,978$  для кисню та іншої продукції відповідно свідчать про тісноту зв'язку розглядуваних ознак, а також про надійність знайдених рівнянь регресії.

Оцінки величин розрахованих індексів детермінації  $R^2 = 0,91$  та  $R^2 = 0,96$  для кисню та іншої продукції відповідно свідчать про те, що рівняння регресії пояснюють значну долю дисперсії, а також про значимість підібраних моделей в цілому.

Величини розрахованих середніх помилок апроксимації  $A = 0,44\%$  та  $A = 0,2\%$  свідчать про якість вибраної моделі. В результаті розрахунку

стандартних помилок коефіцієнтів регресії та кожного прогнозного значення зроблено висновок про їх значимість.

Не дивлячись на те, що планові витрати електричної енергії також розташовані в розрахованому довірчому інтервалі, їх математичне очікування менше, ніж очікування прогнозних значень. Знайдені ймовірності попадання величин відхилення питомого електроспоживання від середнього значення в цей інтервал ( $P = 0,87$  та  $P = 0,92$  в залежності від об'ємів виготовленого кисню та аргону, азоту, стисненого повітря відповідно) свідчать про високу достовірність прогнозу.

В якості технічного рішення зниження витрат електричної енергії для покращення роботи електродвигунів запропоновано використання пристроїв плавного запуску типу УПЗ-2, які дозволять продовжити термін служби двигунів та компресорного обладнання в цілому. Термін окупності пристроїв – 6 місяців.

3. Економічний ефект від запропонованого прогнозування обсягів споживання електричної енергії киснево-компресорним цехом в середньому складатиме 6,5 млн. кВт·год або 14 млн. грн., тобто 1,5 % на рік, в порівнянні з плановими витратами.

Розмір економічного ефекту від покращення роботи компресорного обладнання за рахунок встановлення пристроїв плавного запуску складатиме в середньому 1,6 млн. кВт·год або 3,3 млн. грн., тобто 1,6% від загального обсягу споживання електричної енергії двигунами на рік.

Скорочення розміру заявки на придбання електричної енергії за рахунок прогнозування та впровадження пристроїв плавного запуску можливе в середньому на 8,1 млн. кВт·год або на 17,3 млн. грн., тобто на 1,5 % від загальних витрат на придбання електричної енергії за планом. на рік на рік.

Таким чином, результати проведеного дослідження дозволять: мінімізувати витрати, пов'язані з неточністю прогнозування, усунути ризики

можливих зупинок виробництва через ремонт обладнання, та зменшити розмір відповідної заявки про обсяги споживання електричної енергії в енергосистему.

Результати дослідження можуть бути використані для інших цехів або промислових підприємств за наявності достатньої для проведення аналізу статистичної бази даних з енергоспоживання та об'ємів виготовленої продукції.

Можливим напрямком розвитку дослідження є визначення впливу на регресійну модель інших факторів та розробка багатофакторної моделі залежності обсягів споживання електричної енергії для підвищення точності прогнозування.



## ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Шелобаев С. И. Математические методы и модели/ С. И. Шелобаев. – М.: ЮНИТИ, 2000.– 368 с.
2. Горелова Г. В. Теория вероятностей и математическая статистика в примерах и задачах с применением Excel / Г. В. Горелова, И. А. Кацко. – Ростов-на-Дону: Феникс, 2002. – 400 с.
3. Лугінін О.Є. Економетрія. Навч. пос. 2-е видання, перероб. та доп./ О. Є. Лугінін. – К.: Центр учбової літератури, 2008. – 278 с.
4. Эконометрика: Учебно-методическое пособие / А. К. Шалабанов, Д. А. Роганов – Казань: ТИСБИ, 2002. – 56с.
5. Бородич С.А. Вводный курс эконометрики: Учебное пособие / С. А. Бородич – Мн.: БГУ, 2000, – 354 с.
6. Елисеева И. И. Эконометрика: Учебник / И.И. Елисеева. – М.: Финансы и статистика, 2006. – 576 с.
7. Кремер Н.Ш. Эконометрика: Учебник для вузов / Под ред. проф. Н.Ш. Кремера. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2002. – 311 с.
8. Доугерти К. Введение в эконометрику: Пер. с англ. / К. Доугерти. – М.: ИНФРА-М, 1999. – 402 с.
9. Кремер Н. Ш. Теория вероятностей и математическая статистика/ Н. Ш. Кремер. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2000. – 420 с.
10. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика / В. Е. Гмурман. – М.: Высшая школа, 1998.– 368 с.
11. Гмурман В. Е. Руководство по решению задач по теории вероятностей и математической статистике / В. Е. Гмурман. – М.: Высшая школа, 1998. – 400 с.
12. Айвазян С.А. Теория вероятностей и прикладная статистика / С.А. Айвазян, В.С. Мхитарян. – 2-е изд., испр. – М. : ЮНИТИ-ДАНА, 2001. – 656 с.
13. Айвазян, С.А. Теория вероятностей и прикладная статистика / С.А. Айвазян, В.С. Мхитарян. – 2-е изд., испр. – М. : ЮНИТИ-ДАНА, 2001. – 656 с.

14. Глизманенко Д. Л. Получение кислорода. Изд. 5-е. – М.: “Химия”, 1972.–752 с.
15. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. 4-е изд. / Е. С. Вентцель. – М.: Наука, Физматгиз, 1969 – 576 с.
16. Карабин А. И. Сжатый воздух/ А. И. Карабин. – М.: Машиностроение, 1964. – 344 с.
17. Блейхер И.Г. Компрессорные станции/ И. Г. Блейхер, В. П. Лисеев. – М.: Машгиз, 1959. – 323 с.
18. Страхович К. И. Компрессорные машины/ К. И. Страхович, М. И. Френкель. – М.: Гостопиздат, – 1961. – 351 с.
19. Храпач Г. К.. Эксплуатация компрессорных установок/ Г. К. Храпач. – М., Недра – 1972. – 401 с.
20. Кислицин А.Л. Синхронные машины. учебное пособие по курсу «Электромеханика».– Ульяновск: УлГТУ, 2000 – 108 с.
21. Раздорожный А.А. Охрана труда и производственная безопасность/ А. А. Раздорожный. – М.: Экзамен, 2007. – 512 с.
22. Фролов О. П. Безопасность жизнедеятельности. Производственная безопасность и охрана труда/ О. П. Фролов. – М.: Высшая школа. – 432 с.
23. ДНАОП 0.00-1.21-98 “Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів”. [Электронный ресурс] — Режим доступа: <http://zakon1.rada.gov.ua/laws/show/z1143-06>
24. ДСН 3.3.6.042-99 «Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень». [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://document.ua/sanitarni-normi-mikroklimatu-virobnichih-primishen-nor4880.html>
25. ДСН 3.3.6.037-99 «Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку». [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://document.ua/sanitarni-normi-virobnichogo-shumu-ultrazvuku-ta-infrazvuku-nor4878.html>

26. Бобкова О. В. Охрана труда и техника безопасности/ О. В. Бобкова. – Москва: Омега-Л. – 2009. – 346 с.

27. Шалагина М. А. Охрана труда и техника безопасности/ М. А. Шалагина. – Москва: Экзамен. – 2008. – 346 с.

28. Басаков М. И. Охрана труда. Безопасность жизнедеятельности в условиях производства/ М. И. Басаков. – Москва: Феникс. – 2008. – 352 с.

29. Березюк О. В. Безпека життєдіяльності: навчальний посібник / О. В. Березюк, М. С. Лемешев.– Вінниця : ВНТУ, 2011. – 204 с.

30. ГОСТ 27331-87 “Пожежна техніка. Класифікація пожеж”. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://prometey.in.ua/ua/usloviya/>