

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Запорізький національний університет
Навчально-науковий інженерний інститут ім. Ю.М. Потебні

Кафедра електричної інженерії та кіберфізичних систем

Пояснювальна записка
до магістерської роботи

рівень вищої освіти другий (магістерський) рівень

на тему Підвищення ефективності споживання електричної енергії системою
газоочищення ПрАТ «Запоріжсталь»

Виконав: студент 2 курсу, групи 8.1412-з
Мирошніченко С.П.

(прізвище та ініціали) (підпис)

спеціальності

141 Електроенергетика, електротехніка та

електромеханіка

(шифр і назва)

спеціалізація

(шифр і назва)

освітньо-професійна програма

141.00.11 Електроенергетика, електротехніка та

електромеханіка

(шифр і назва)

Керівник

Коваленко В.Л.

(прізвище та ініціали) (підпис)

Запоріжжя
2023 рік

Запорізький національний університет

Навчально-науковий інженерний інститут ім. Ю.М. Потебні

(повне найменування вищого навчального закладу)

Кафедра електротехніки та енергоефективності

(по овна назва кафедри)

Рівень вищої освіти другий (магістерський) рівень

(повна назва кафедри)

Спеціальність 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

(шифр і назва)

Спеціалізація _____

(шифр і назва)

Освітньо-професійна програма 141.00.11 Електроенергетика,

електротехніка

(шифр і назва)

та електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

д.т.н., доц.



В.Л.

Коваленко

« 07 » грудня 2023 року

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу студенту

Мирошніченку Сергію Павловичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема магістерської роботи Підвищення ефективності споживання
електричної

енергії системою газоочищення ПрАТ «Запоріжсталь»

керівник магістерської роботи

Коваленко В.Л., д.т.н., професор

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

затверджені наказом ЗНУ від «01» травня 2023 року № 639 - с

2. Строк подання студентом магістерської роботи 01 грудня 2023 року

3. Вихідні дані роботи поточний тариф вартості електроенергії; напруга
живлення – 10 кВ; час роботи електродвигунів на рік – 7200 годин; потужність
електродвигунів

приводу вентиляторів 630 та 800 кВт

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які рекомендується
розробити):




вступ; загальні відомості про підприємство ПрАТ «Запоріжсталь»; аналіз

споживання електричної енергії обладнанням заводу; розробка заходів зі

зменшення електричних втрат пневмосистеми; техніко- економічне
обґрунтування розроблених заходів

5. Перелік графічного матеріалу (пропонується): аналіз споживання електроенергії підприємством; аналіз споживання енергоресурсів обладнанням газового господарства; схеми підключення електроприводів для керування вентиляторами

6. Консультанти розділів магістерської роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1	Коваленко В.Л., професор		
Розділ 2	Коваленко В.Л., професор		
Розділ 3	Коваленко В.Л., професор		
Нормоконтроль	Бандуренко І.І., асистент		

7. Дата видачі завдання 01.06.2023 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Строк виконання етапів магістерської роботи	Примітка
1	Загальновідомі відомості про ПрАТ «Запоріжсталь»	01.10.2023	
2	споживання електричної енергії в системі	01.11.2023	
3	підвищення енергоефективності електроприводів системи газоочищення печей	01.12.2023	

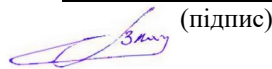
Студент



Мирошніченко С.П.

(прізвище та ініціали)

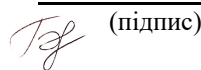
Керівник дипломної роботи


(підпис)

Коваленко В.Л.

(прізвище та ініціали)

Нормоконтролер


(підпис)

Бандуренко І.І.

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

У даному магістерській роботі виконано аналіз використання електроенергії для електропривода системи газоочищення на підприємстві «Запоріжсталь». Проведено аналіз споживання електроенергії обладнанням, враховуючи різноманітні технологічні процеси. Робота розглядає різні методи керування електроприводами вентиляторів та шляхи підвищення їх енергоефективності. Також проведено моделювання витрат електроенергії обладнанням систем газоочищення та запропоновано вдосконалений частотно-регульований електропривід.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: електрична енергія, енергозаощадження, енергоефективність, електропривід, перетворювач, пневмосистема

ANNOTATION

In this master's thesis, an analysis of the use of electricity for the electric drive of the gas purification system at the Zaporizhstal enterprise was performed. An analysis of the electricity consumption by the equipment was carried out, taking into account various technological processes. The work considers various methods of controlling electric fan drives and ways of increasing their energy efficiency. Modeling of electricity consumption by the equipment of gas purification systems was also carried out and an improved frequency-regulated electric drive was proposed.

KEY WORDS: electric energy, energy saving, energy efficiency, electric drive, converter, pneumatic system

ЗМІСТ

ВСТУП	10
1 ЗАГАЛЬНОВІДОМІ ВІДОМОСТІ ПРО ПрАТ «ЗАПОРІЖСТАЛЬ»	12
1.1 Загальна характеристика та виробничі потужності ПрАТ «Запоріжсталь»	12
1.2 Газове господарство ПрАТ «Запоріжсталь»	17
2 СПОЖИВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В СИСТЕМІ ГАЗООЧИЩЕННЯ ПЕЧЕЙ	28
2.1 Моделювання споживання електроенергії системою газоочищення вихідних газів печей	44
3 ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ СИСТЕМИ ГАЗООЧИЩЕННЯ ПЕЧЕЙ	57
3.1 Керування асинхронними приводами	60
3.1.1 Асинхронний електропривод із скалярним керуванням	60
3.1.2 Асинхронний електропривод з векторним керуванням (ВК)	62
3.2 Використання векторного керування в електроприводах вентиляторів системи газоочищення	64
3.3 Техніко-економічне обґрунтування запропонованих заходів	71
ВИСНОВКИ	76
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	78
ДОДАТКИ	82

ВСТУП

Збереження енергії є ключовою складовою природоохоронного заходу та розв'язання екологічних проблем. Електродвигуни різної потужності та призначення займають значну частку серед споживачів електроенергії, використовуючи понад половину виробленої енергії. Це вказує на те, що ефективність енергозбереження може бути вдосконалена, зокрема в цьому сегменті.

Наразі проблемою є той факт, що більшість електродвигунів працюють у нерегульованому режимі, проявляючи низьку ефективність. Дослідження підтверджують, що коефіцієнт завантаження багатьох машин не досягає 50% під час експлуатації електропривода. Це призводить до суттєвих втрат, особливо в умовах недовантаження, ігноруючи знижене значення коефіцієнта потужності. Враховуючи загальну встановлену потужність асинхронних двигунів, що становить приблизно 40-50 мільйонів кВт у країні, ця проблема стає нагальною.

Акціонерне товариство «Запоріжсталь», яке є одним із найбільших промислових підприємств в Україні, відоме своєю продукцією як на внутрішньому, так і на міжнародному ринку. Спеціалізація підприємства включає в себе виробництво високоякісного сталевого гарячекатаного і холоднокатаного рулону, а також гарячекатаного і холоднокатаного листа. Значна частка споживачів включає підприємства автомобільного, сільськогосподарського та транспортного машинобудування, виробників зварних труб та побутової техніки.

Необхідно відзначити, що в газовому господарстві підприємства спостерігаються значні витрати на електроенергію, особливо в системах газоочищення. Зокрема, виробництво водню, очистка азоту, змішування газу та інші процеси супроводжуються великим споживанням електроенергії. Система газоочищення мартенівських печей має на меті очищення димових газів від плавильного пилу та сірчистого ангідриду, а також примусову евакуацію димових газів. Вентилятори в цій системі працюють на асинхронних

електродвигунах потужністю 630 та 800 кВт, більшість з яких використовуються в нерегульованому режимі.

Дослідження вказує, що впровадження керованого електроприводу може призвести до заощадження до 40-60% електроенергії та покращення інших експлуатаційних показників. Енергозбереження визнається одним із пріоритетних напрямів економіко-технічної політики компанії "Запоріжсталь", що стає необхідним у контексті проблем із складністю видобутку та зростанням вартості основних енергоресурсів в країні.

Об'єктом дослідження є асинхронний електропривід вентиляторів системи газоочищення мартенівських печей "Запоріжсталі", а предметом дослідження є визначення характеристик систем векторного керування асинхронним електродвигуном.

1 ЗАГАЛЬНОВІДОМІ ВІДОМОСТІ ПРО ПрАТ «ЗАПОРІЖСТАЛЬ»

1.1 Загальна характеристика та виробничі потужності ПрАТ «Запоріжсталь»

Приватне акціонерне товариство "Запоріжсталь" визначається як одне з найбільших промислових підприємств в Україні. Вироблення комбінату, що включає в себе високоякісний сталевий гарячекатаний і холоднокатаний рулон, а також гарячекатаний і холоднокатаний лист товщиною 0,5–8,0 мм з вуглецевих, низьколегованих, легованих і нержавіючих сталей, і сталева стрічка та жерсть, відома та популярна серед споживачів як на внутрішньому, так і на міжнародному ринках.

"Запоріжсталь" займає стійке положення на ринку, регулярно піднімаючи своє становище в рейтингах найбільших виробників сталі. Спрямовані на освоєння нових ринків та продукції, фахівці приватного акціонерного товариства "Запоріжсталь" вкладають зусилля в закріплення позитивного іміджу підприємства. Їхня продукція широко відома у понад 50 країнах світу, включаючи Туреччину, Італію, Польщу, Сирію, Ізраїль, Болгарію, Ефіопію, Нігерію та інші, але стратегічною фокусованою точкою залишається внутрішній ринок України.

Основою успіху є постійне вдосконалення технологічних процесів, висока якість продукції, дотримання договірних зобов'язань та орієнтація на потреби ринку. Для підвищення конкурентоспроможності своєї продукції на світових ринках металу, "Запоріжсталь" в 2015 році вивела виробництво сталі з вищим гарантованим вмістом алюмінію. Ця нова продукція відповідає технічним характеристикам європейського стандарту EN 10025-1: 200 та знаходить попит серед європейських виробників трубної продукції, оскільки підвищує міцність та довговічність оцинкованих труб. Серед ключових клієнтів комбінату варто відзначити світову італійську компанію Marcegaglia.

Підприємства автомобільного, сільськогосподарського, транспортного машинобудування, виробники зварних труб та побутової техніки входять до числа споживачів продукції комбінату "Запоріжсталь." Сам комбінат складається з 8 основних та 56 допоміжних цехів, в яких зайнято приблизно 11 тис. чоловік працівників.

Річна виробнича потужність підприємства включає виробництво понад 3,1 млн тон чавуну, 3,8 млн тон сталі та 3,1 млн тон прокату. Загалом, виробничі показники комбінату в 2019 році становили 3807,8 тис. тон чавуну, 3979,5 тис. тон сталі і 3354,0 тис. тон прокату.

Металургійне виробництво включає чотири основних цехи: агломераційний, доменний, мартенівський та цех підготовки сталерозливних складів. Прокатне виробництво складається з чотирьох прокатних цехів: обтискного, цеху гарячої прокатки тонкого листа, цеху холодного прокатки № 1 та цеху холодного прокатки № 3, які відіграють ключову роль у виробництві гарячекатаної та холоднокатаної листової сталі, сталевий стрічки, білої жерсті та холодногнутих профілів.

Упродовж останніх років керівництво ПАТ "Запоріжсталь" систематично реалізує комплекс заходів, спрямованих на підвищення ефективності виробництва, продуктивності праці та енергоефективності.

Виробництво продукції на ПАТ «Запоріжсталь» складається з таких структурних підрозділів:

- агломераційний цех (6 агломашин);
- доменний цех (4 доменні печі);
- мартенівський цех (7 мартенівських печей і 1 двохванний
- сталеплавильний агрегат);
- цех підготовки складів;
- ливарний цех;
- обтискний цех;
- цех гарячої прокатки тонкого листа;
- цех холодної прокатки № 1;

- цех холодної прокатки № 3.

Агломераційний цех комбінату "Запоріжсталь" спеціалізується на виробництві основного залізрудного агломерату, де практично всі процеси автоматизовані для забезпечення ефективності та якості виробництва.

Доменне виробництво річно виплавляє приблизно 3,5 млн тон чавуну. Важливою особливістю чавуну, виробленого на комбінаті, є його низький вміст сірки і фосфору.

Мартенівський цех виробляє близько 4,0 млн тон сталі щорічно. Використання природного газу у мартенівських печах та процесі продування сталі киснем і аргонном забезпечує високу якість продукції. Виплавлена сталь розливається в злитки масою до 18,6 тон, які використовуються для виробництва листового прокату.

Ливарне виробництво є базою для отримання литих заготовок для запчастин та металургійного устаткування для цехів комбінату та сторонніх споживачів. Включає спеціалізоване відділення з виробництва виливниць, із проектною потужністю 360 тис. тон на рік.

Цех гарячої прокатки тонкого листа виробляє гарячекатаний прокат в листах і рулонах товщиною від 2,0 до 8,0 мм. Оснащений агрегатами для постачання прокату в листах і рулонах, цей цех має безперервний тонколистовий стан "1680" з максимальною виробничою потужністю 3,7 млн тон на рік. Для виробництва холодногнутих профілів використовуються триєх профільних агрегатів, що дає більше 500 типорозмірів профілів з вуглецевих і низьколегованих марок сталі товщиною від 1,0 до 8,0 мм і шириною розгортки до 1440 мм.

Цех холодної прокатки №1 на комбінаті "Запоріжсталь" виготовляє холоднокатаний плоский прокат в листах завтовшки від 0,5 до 2,0 мм і шириною від 850 до 1500 мм, як в рулонах масою до 16 т, так і у листах завдовжки до 4000 мм. Також виробляється холоднокатана стрічка товщиною від 0,2 до 2,0 мм. У цьому цеху використовуються безперервний чотирьохкільтовий стан "1680", два однокільтові реверсивні стани "1680" і "1200", а також два безперервних

вузькосмугових чотирьохкільтьових стани "450" і "650" для виробництва холоднокатаного прокату з вуглецевої і низьколегованої сталі. У цеху є засоби для дресирування, поперечного різання і подовжнього розпуску, що дозволяє виготовляти холоднокатаний прокат різних параметрів.

Цех холодної прокатки №3 виробляє холоднокатаний лист завтовшки від 1,5 до 5,0 мм, шириною 1000-2300 мм і довжиною до 3500 мм з вуглецевих марок сталі. У складі цього цеху діє спеціалізоване відділення, яке виготовляє шліфовані і поліровані листи і рулони. Технологічний процес включає використання стану "2800" для холодної прокатки.

Загальна виробнича потужність цехів складає до 3,7 млн тон для гарячекатаного прокату, до 1,1 млн тон для холоднокатаного прокату та до 500 тис. тон для холодногнутого профілю. Технологія виробництва та взаємодія кожного цеху представлені на рисунку 1.1 [1].

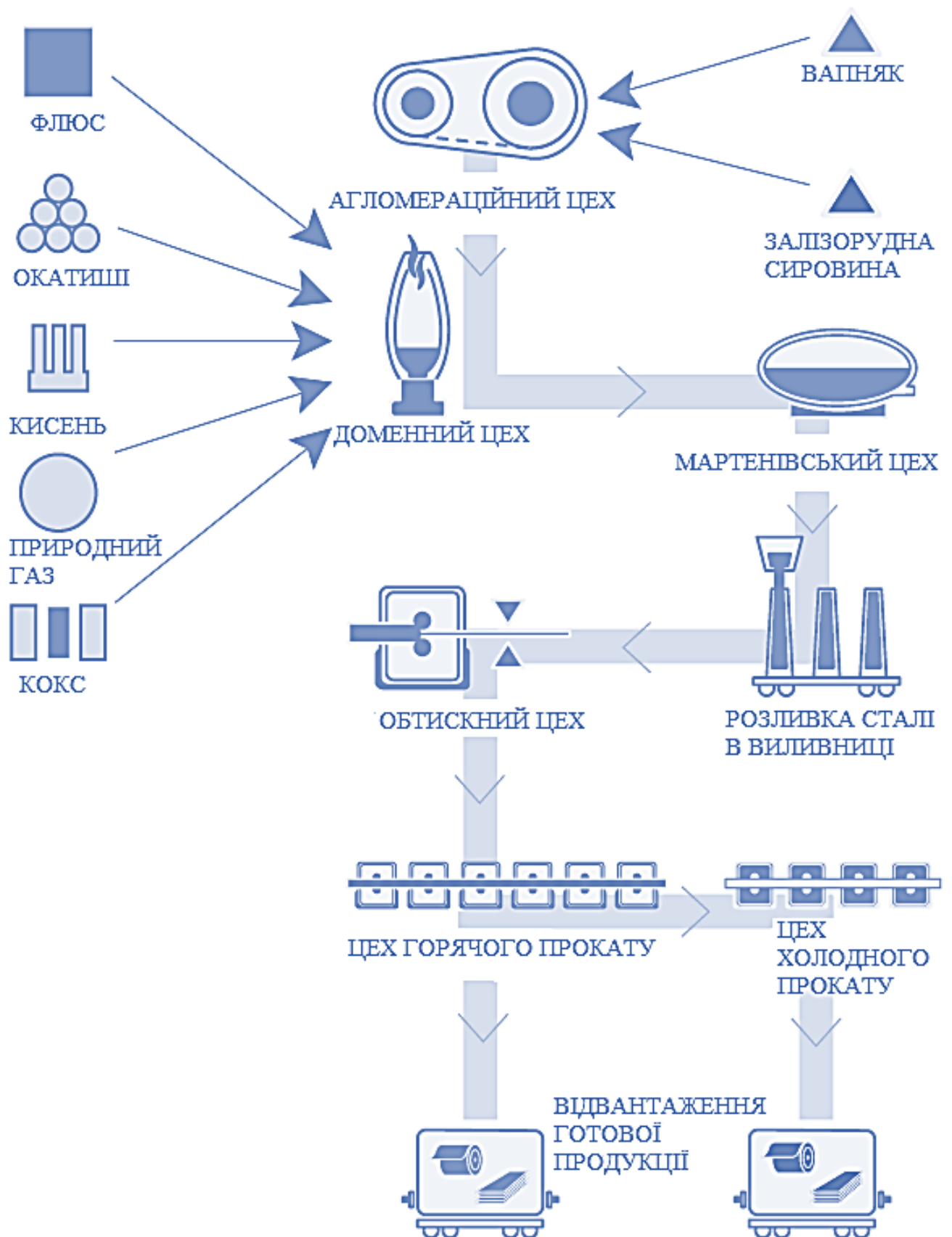


Рисунок 1.1 – Технологія виробництва продукції [1]

1.2 Газове господарство ПрАТ «Запоріжсталь»

Система газоочищення доменної печі (СГО ДП) має за мету проведення очищення та охолодження доменного газу, що виводиться. Доменний газ формується під час процесу виплавлення чавуну в доменних печах та представляє собою результат неповного згоряння вуглецю. Теплова енергія згоряння доменного газу становить приблизно 3,6...4,6 МДж/м³. Збагачення дуття киснем призводить до зниження вмісту азоту в газі та відповідно збільшення кількості інших газів (включаючи окисли вуглецю і водень), а також теплоти згоряння [4...7]. Доменний газ, що утворюється в доменній печі, містить колошниковий пил, який є сумішшю дрібних частинок руди, коксу, агломерату, вапняку та інших матеріалів, що завантажуються у доменну піч. Утворення пилу виникає внаслідок механічного роздрібнення матеріалів під час їх виробництва, транспортування, завантаження та зношування під час руху у шахті печі. Вивід пилу з печі пов'язаний із збільшенням кількості дрібних частинок разом з потоком газу, який пролягає через шар шихти, а також підняттям деяких елементів шихти в області високих температур доменного газу [6, 8]. Необхідно проводити очищення доменного газу від пилу до концентрації (вмісту) не більше 10 мг/м³. Для цього на комбінаті застосовується багатоступінчаста система очищення доменного газу, що включає чотири послідовно з'єднані апарати.

Окрім вищезазначеного, СГО МП також застосовується для очищення димових газів мартенівських печей від плавильного пилу та сірчистого ангідриду, а також для примусової евакуації димових газів з мартенівських печей [5, 9]. Технологічні гази, які виходять з мартенівської печі з температурою 600...700 °С, направляються в боров, а потім в котел-утилізатор КУ-90М. Після цього відходячі гази, з температурою 250...350 °С, по газогону "брудного" газу діаметром 2420 мм, надсилаються на турбулентний омивач, який складається з батареї (10 шт.) паралельно працюючих труб Вентурі та двох скрубєрів вологоуловлювачів.

Змішувально-підвищувальні станції включають таке обладнання [6]:

- два приточні вентилятори;
- чотири повітряні вентилятори-нагнітачі;
- шість бустерів змішаного газу;
- один бустер коксового газу.

Перераховане обладнання після виконання операцій по змішуванню газів направляє отримані суміші до пунктів газоочистки доменних печей, які, у свою чергу включають таке обладнання:

- камери переливу;
- поплавкові камери;
- гідрозатвори;
- насоси підкачки води;
- редуктори;
- секторні задвижки;
- інше допоміжне обладнання.

Два паралельно працюючих млинових вентилятори ВМ 100/1200У (з продуктивністю 125,000 м³/г, колесо ротора 1810 мм, 20 лопаток, електродвигун потужністю 630 кВт – 1500 об/хв.) виступають в ролі збудників тяги у системі газовідвідного тракту газоочищення мартенівських печей №2, 6, 7, 8. Також використовується вентилятор ВМ 20А (з продуктивністю 150,000 м³/г, колесо ротора 2010 мм, 10 лопаток, електродвигун потужністю 800 кВт – 1500 об/хв.) для системи газоочищення мартенівських печей № 1, 5, 10 та 12. Очищені гази, які мають початковий рівень запиленості 10 г/м³, після проходження через процес очищення зменшуються до 0,1 г/м³ та випускаються в атмосферу через димову трубу з діаметром 2900 мм та висотою 86 м.

Станція виробництва інертних газів призначена для генерації захисного газу з продуктів неповного згорання природного газу. Цей захисний газ використовується для проведення безокисної термообробки прокату у термічних печах цехів ЦХП-1 та ЦХП-3.

В середньому (за рік) продуктивність станції складає [2]:

- при роботі на повітрі до 2200 м³/год;
- при роботі на азотоповітряній суміші (АПС з використанням технічного азоту) до 2900 м³/год.

Склад захисного газу, що виробляється:

- водень – у межах 5.0...5,2 %;
- кисень – біля 0,001 %;
- вуглецевий газ становить 0,1 %;
- монооксид вуглецю складає 0,1 %;
- азот – інше.

При температурі точки роси не вище -60 °С та тиску захисного газу на виході з компресорно-сорбційної засоби захисного газу (ЦСЗГ) в межах 1,5 - 2,9 кПа або 1500 – 290 мм водяного стовпа, забезпечено оптимальні параметри для забезпечення ефективного функціонування системи. ЦСЗГ включає в себе комплекс технологічного обладнання, яке включає загальностанційну установку повітряних компресорів та холодильників, вісім агрегатів типу "N2 - 400 ПКН", загальностанційну систему двоконтурного сушіння захисного газу за допомогою холоду, адсорбційну систему сушіння захисного газу, загальностанційну систему виробництва конденсату та його постачання агрегатам "N2 - 400 ПКН", а також систему колекторів енергоносіїв та захисного газу. Ця інтегрована система гарантує надійність та високу якість захисного газу, що є важливим аспектом в різноманітних технологічних процесах, де вимагається високий ступінь чистоти захисного газу для уникнення можливих контамінацій.

Станція змішування та підвищення тиску (рис. 1.2) призначена для оптимізації складу доменного газу та збільшення тиску, який надається користувачам, включаючи коксовий та змішаний газ. Підвищення тиску газу досягається за допомогою спеціальних нагнітачів [1...3], які використовуються у наступних процесах:

- 1) для транспортування коксодоменної суміші до обтискного цеху та подачі її на нагрівальні колодязі використовується турбогазовувка ЕГЕР;
- 2) для постачання змішаного газу на методичні печі цеху гарячої прокатки тонкого листа також використовуються зазначені нагнітачі.

Ця станція відіграє важливу роль у забезпеченні необхідних параметрів газу для ефективності та стабільності виробничих процесів, а використання турбогазовувок ЕГЕР дозволяє забезпечити потрібний тиск для подачі газу у різні ділянки виробництва.

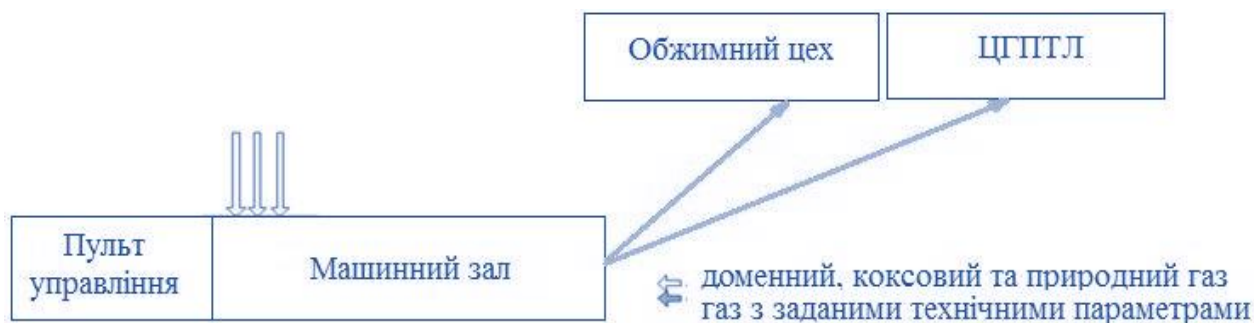


Рисунок 1.2 – Схема подачі змішаного газу

Виробнича ділянка газового цеху, спеціалізована на виробництві водню та доочистці азоту, включає ряд ключових елементів для забезпечення високоефективного виробництва та стабільності процесів. На даній станції експлуатуються три електролізери серії 1000/60/10, загальна потужність яких складає 165 м³/Г водню. Кисень, в якості побічного продукту, викидається в атмосферу. Дві лінії доочищення азоту, із загальною потужністю 200 м³/Г захисного газу (з складом N₂ = 0,5 % та N₂ = 99,5 %), включають змішувальний вузол, компресор, малий ресивер, станцію видалення кисню та вузол адсорбційної осушки.

Отриманий водень та азот подаються на пічні установки фірми «Ебнер», де відбувається світле відпалювання холоднокатаних рулонів. Азот використовується для продувки системи електролізерів, апаратів трубопроводів, а також для тушіння можливих пожеж. Електроліт для електролізерів

виготовляється із застосуванням 30 % розчину їдкого калію (КОН) у воді.

Процес очищення води для отримання водню виконується за допомогою системи зворотного осмосу, а охолодження обладнання відбувається за рахунок оборотної води насосної станції із градирнею, розташованою на даху [7, 9]. Цей комплексний підхід гарантує надійність та високу якість виробництва водню та азоту, забезпечуючи ефективність в різних аспектах виробничого процесу. Схема розподілу інертних газів представлена на рисунку 1.3.

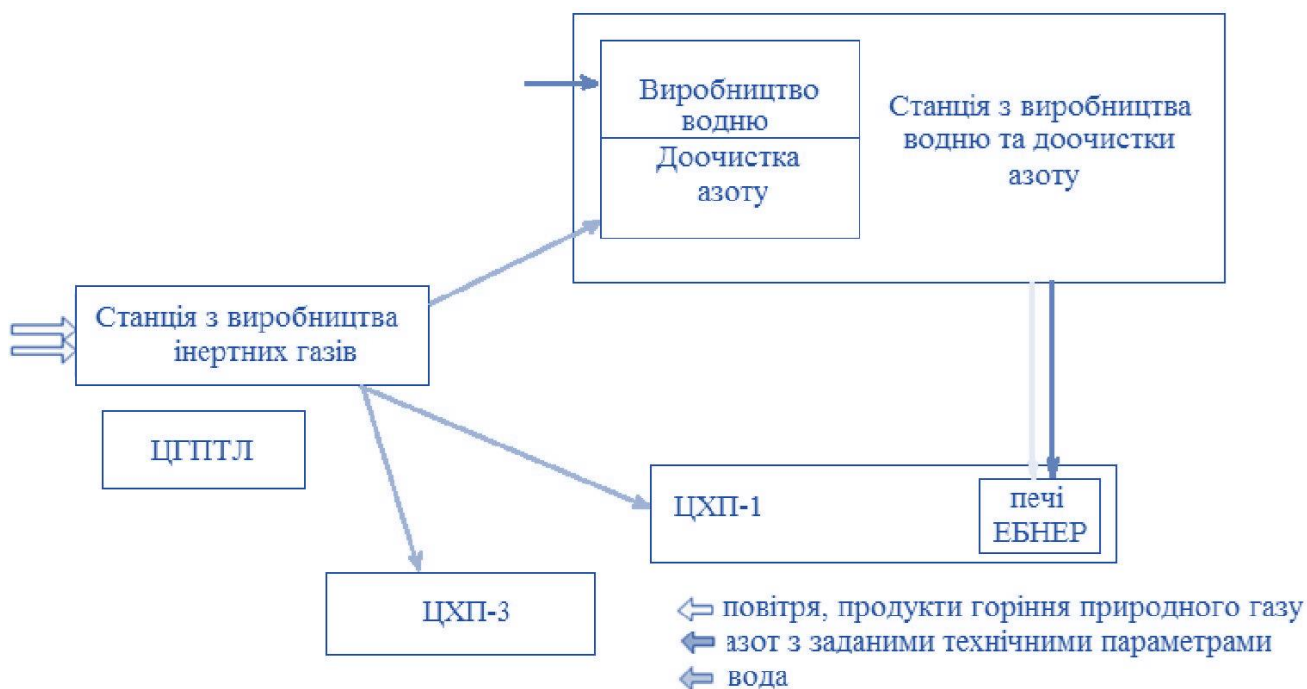


Рисунок 1.3 – Схема розподілу інертних газів

Газові мережі комбінату, що включають міжцехові газопроводи, підтримуються оперативною бригадою та призначені для ефективного транспортування різних видів газу до споживачів, зокрема доменного, коксового, природного та змішаного газу. Система газопроводів на підприємстві [1] ретельно налаштована та включає в себе ряд важливих елементів:

- 1) доменний газ: постачається газопроводом діаметром 900 мм на рудо-розморожувальну установку (РРУ);
- 2) направляється газопроводом діаметром 1500 мм на ДСС (доменно-сталевидобувну суміш);

- 3) подається газопроводами діаметром 1500 мм на свічі скидання доменного газу № 1 та 2;
- 4) транспортується газопроводом діаметром 1500 мм на повітронагрівачі доменних печей № 2-5.

Інші газові потоки:

- 1) забезпечується газопроводом діаметром 2400 мм у обтискний цех;
- 2) переміщується газопроводом діаметром 2000 мм на змішувально-підіймальну станцію ЦГПТЛ;
- 3) подається газопроводом діаметром 2400 мм на ТЕЦ підприємства;
- 4) транспортується газопроводом діаметром 800 мм на ПУТ (піч утилізації тепла).

Природний газ, який постачається на комбінат із середнім тиском $5.5 \text{ кг}\cdot\text{с}/\text{см}^2$, піддається регулюванню тиску на газорегулюючих пунктах (ГРП). На комбінаті функціонує 10 ГРП, які забезпечують необхідний тиск перед подачею газу до користувачів.

Коксовий газ подається на комбінат від Заводу коксохімічних завдань (ЗКХЗ) через газопровід діаметром 900...1000 мм. Цей газ використовується на ТЕЦ та подається через Станцію подачі сировини Ліпецького приладобудівного комбінату (СПС ЛПЦ) на нагрівальні колодязі обтискного цеху.

Всі ці системи та мережі газопостачання детально організовані для забезпечення надійності, ефективності та високоякісного транспортування різних типів газу для різноманітних виробничих процесів на комбінаті.

У газовому господарстві використовуються такі енергоресурси: електрична енергія, технічна вода, стиснене повітря, водяна пар, кисень. Розподіл витрати електричної енергії наведено на рисунку 1.4 [1].

Витрати електроенергії системою газоочищення є актуальною проблемою на сучасному етапі. Наразі електродвигуни, які приводять вентилятори, функціонують постійно при підвищених обертах, і відсутнє регулювання їх обертів. Шихтові матеріали основного мартенівського процесу складаються, як у інших сталеплавильних процесах, з металевої (чавун, металевий лом,

розкислювачі) та неметалічної частини (залізна руда, мартенівський агломерат, вапняк, вапно, боксит). Чавун може використовуватися в рідкому вигляді або у формі чушок. Залежно від агрегатного стану чавуну, що вводиться в піч, розрізняють скрап-процес і скрап-рудний процес. Скрап-рудний процес є поширеним варіантом мартенівського процесу, де рідкий чавун є основною складовою металевої частини шихти (зазвичай 50...70 %). Цей процес включає передел високовуглецевого напівпродукту, отриманого в конвертерах, і відрізняється меншою кількістю утвореного шлаку порівняно з роботою на рідкому чавуні, завдяки відсутності кремнію і низькому вмісту марганцю в напівпродукті.

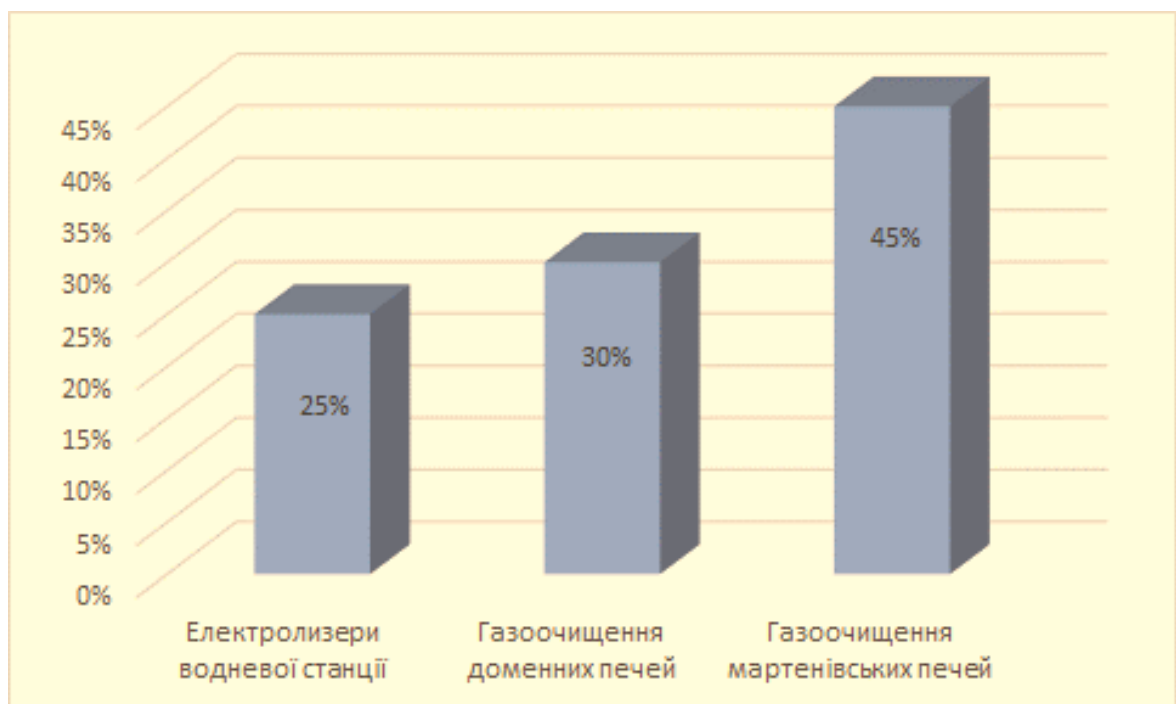


Рисунок 1.4 – Витрати електроенергії [1]

Скрап-процес в основному застосовується на заводах, які не мають доменного виробництва, і використовує металевий лом як основну металеву складову шихти (зазвичай 25...45 %). В цьому випадку чавун може бути твердим або рідким, і залізна руда додається в обмежених кількостях (зазвичай 1...2 %) лише під час плавлення, а не під час завантаження. Таким чином, газова фаза є основним джерелом кисню в процесі [4...7].

Згідно з [6] процес виплавки сталі в мартенівській печі, незалежно від його конкретного варіанту, включає кілька ключових періодів:

- заправка печі. Цей етап передбачає підготовку печі для подальших операцій, зокрема відновлення зношених ділянок, наварювання передньої і задньої стінок, а також укосів;
- завалка і прогрів твердих шихтових матеріалів. Цей етап важливий для успішного плавлення і скорочення часу плавки, особливо у випадку скрап-рудного процесу;
- заливка рідкого чавуну (завалка твердого чавуна) і плавлення. Заливка рідкого чавуну зазвичай займає 15-30 хвилин. Важливо заливати чавун повільно, щоб уникнути бурхливого окислення вуглецю чавуна і викидів металу і шлаку з печі;
- доведення плавки. Цей період розпочинається після заливки рідкого або завалки твердого чавуна. Основні завдання включають розплавлення металу і нагрівання його вище температури плавлення. Доведення плавки зазвичай включає дві стадії: поліровку (рудне кипіння) і чисте (вільне) кипіння. Цей етап спрямований на остаточне рафінування металу та додаткове нагрівання ванни.

Період, присвячений наведенню шлаку для забезпечення необхідної міри дефосфорації і десульфурації металу, відомий як поліровка. У свою чергу, період чистого кипіння служить для остаточної підготовки металу до випуску, включаючи нагрівання його до заданої температури для видалення газів і неметалічних включень. Випуск плавки [5, 6] охоплює розкислювання і легування металу, які можуть відбуватися як у самій печі, так і в ковші (на жолобі) під час випуску плавки. Під час випуску в ковш додають розкислювачі та легуючі добавки. Сучасні практики спрямовані на повне перенесення цих операцій з печі в ковш. Загальна тривалість плавки в мартенівських печах зазвичай коливається від 7 до 8 годин.

Аналіз технологічного процесу свідчить, що на деяких етапах плавки можливо суттєво економити електричну енергію, яка витрачається

технологічним обладнанням системи газоочищення. Середньодобове споживання електроенергії до впровадження енергозберігаючих заходів в системі газоочищення мартенівських печей наведено на рисунку 1.5.

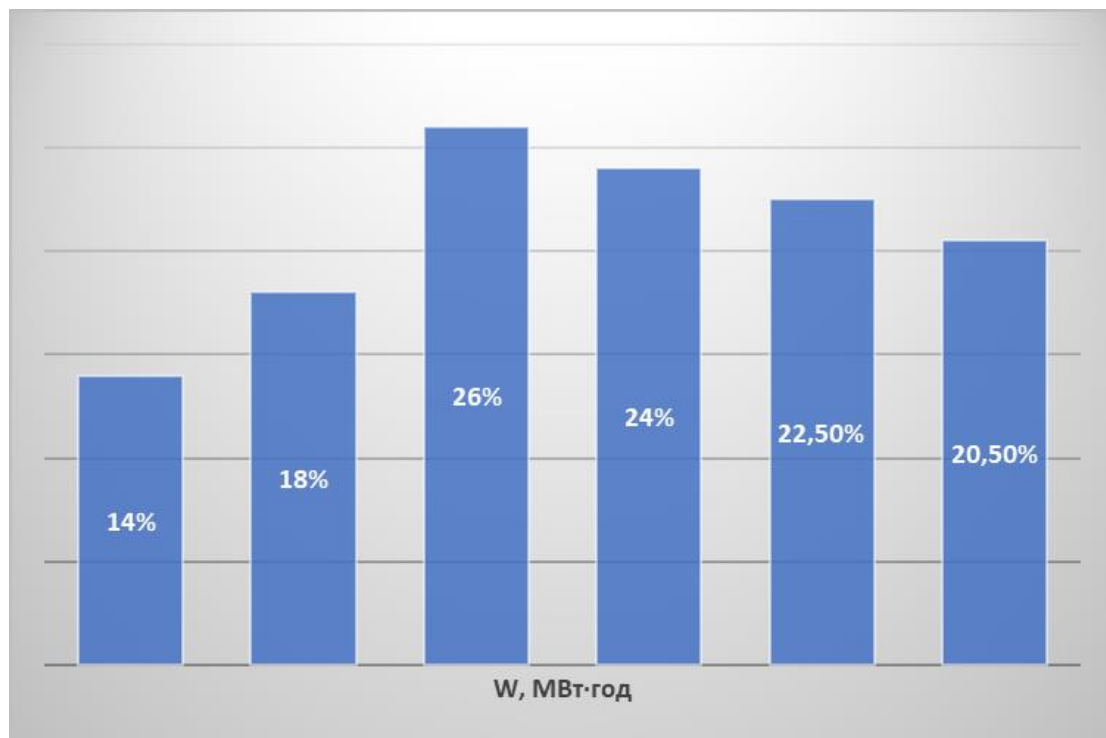


Рисунок 1.5 – Середньодобовий обсяг споживання електроенергії системою газоочищення до впровадження енергозберігаючих заходів

Визначальним параметром був випуск встановленого обсягу продукції, при цьому кількість використаних енергоресурсів не враховувалася. Це призвело до високого рівня споживання електричної енергії системою газоочищення. Після встановлення дросельної заслінки на млинові вентилятори з'явилася можливість регулювання продуктивності вентиляторів у певному діапазоні (див. рисунок 1.6).

З метою здійснення раціонального використання енергії, в останній період часу були впроваджені дросельні заслінки в систему газоочищення. У результаті встановлення дросельних заслінок (тип МЕУ) на млинові вентилятори системи газоочищення печей Мартенса спостерігається певне зменшення електроспоживання. Це досягнуто шляхом регулювання потужності на різних етапах технологічного процесу плавки, таких як перевірка печі перед заправкою

та твердий етап плавки, що відображено на рисунку 1.6. Незважаючи на відзначене скорочення електроспоживання в результаті впровадження дросельних заслінок, важливо зауважити, що такий метод регулювання потужності є неефективним і застарілим.

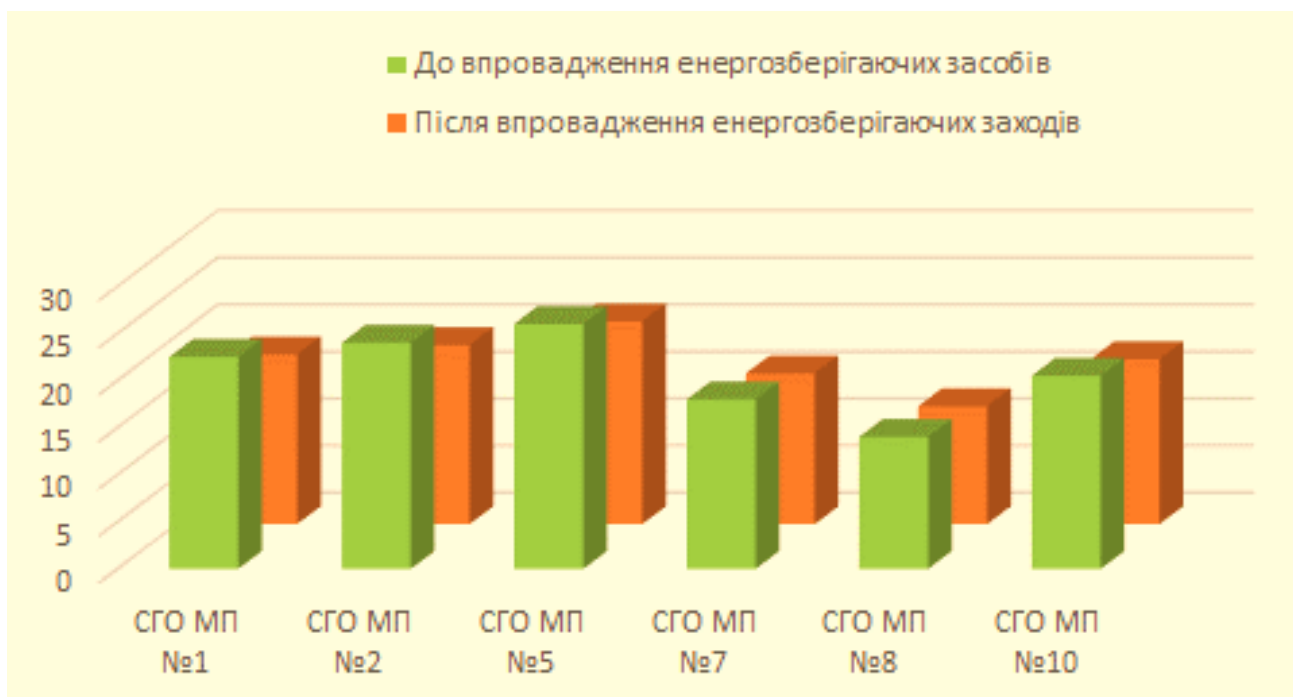


Рисунок 1.6 – Середньодобове споживання електроенергії до та після впровадження дросельної заслінки

Під час проведення процесу плавки оператор вручну налаштовує заслінку, виходячи із спостережень за роботою системи газоочищення, вимірюючи об'єм повітря та рівень викидів у атмосферу. Цей ручний підхід передбачає часті зміни заслінки залежно від характеру навантаження та різних етапів плавки. У зв'язку з вищевикладеним, приводні електродвигуни млинових вентиляторів з потужністю 630...800 кВт фактично працюють постійно на повну потужність. З метою оптимізації цього процесу важливо розглянути можливість впровадження автоматичного регулювання потужності, що б базувалося на етапах технологічного процесу плавки.

2 СПОЖИВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В СИСТЕМІ ГАЗООЧИЩЕННЯ ПЕЧЕЙ

Для зменшення обсягів споживання електроенергії системою газоочищення мартенівських печей необхідно провести аналіз обсягів споживання електроенергії, його характеру та виявити фактори, від яких залежать ці обсяги.

З метою досягнення поставленої мети пропонується зібрати статистичний матеріал щодо обсягів споживання електроенергії обладнанням систем газоочищення мартенівських печей ПрАТ «Запоріжсталь». Під час переддипломної практики отримано дані про обсяги споживання електроенергії системи газоочищення мартенівських печей.

На основі отриманих результатів статистичного збору інформації запропоновано провести розрахунок споживання електроенергії електроприводом млинових вентиляторів системи газоочищення мартенівських печей (СГО МП) для отримання даних по споживанню окремо по двигунам.

Визначаємо погодинне споживання електроенергії СГОМП №1, яке становить 55% від усього обсягу споживаної електроенергії агрегатом. СГО МП №1 працює на ділянці сталеплавильного агрегату, що є більшим за мартенівську піч за об'ємом. Обсяг погодинного споживання електричної енергії СГОМП №1 визначається за наступним виразом [4...6]:

$$W_{\text{СГО МП}} = W_{\text{заг.1-2}} \cdot 0,55$$

де $W_{\text{заг.1}}$ – загальна кількість електроенергії спожитої плавильним агрегатом №1 за 1 годину.

$$W_{\text{ГОМП}} = 1737,12 \cdot 0,55 = 955,42 \text{ кВт}\cdot\text{год.}$$

В інші години доби споживання електроенергії виконуємо аналогічно.

У таблиці 2.1 показано погодинне споживання електроенергії СГО МП

№1.

Таблиця 2.1 – Погодинне споживання електроенергії СГО МП №1

Час спостереження	Обсяг, кВт·год	Час спостереження	Обсяг, кВт·год	Час спостереження	Обсяг, кВт·год
00:00-01:00	955,42	08:00-09:00	1099,96	16:00-17:00	1156,45
01:00-02:00	1162,92	09:00-10:00	1182,46	17:00-18:00	1164,9
02:00-03:00	1169,26	10:00-11:00	1175,06	18:00-19:00	1176,78
03:00-04:00	1152,62	11:00-12:00	1165,56	19:00-20:00	1163,32
04:00-05:00	1156,98	12:00-13:00	1161,86	20:00-21:00	1123,45
05:00-06:00	1028,41	13:00-14:00	1077,12	21:00-22:00	1054,28
06:00-07:00	936,54	14:00-15:00	1082,66	22:00-23:00	1038,71
07:00-08:00	859,45	15:00-16:00	1084,38	23:00-00:00	1169,39

Визначаємо погодинне споживання електроенергії електродвигуна А СГОМП №1. Двигун А споживає 55% від усього обсягу споживаної електроенергії системи газоочищення.

$$W_{СГО МП1А} = W_{СГО МП1} \cdot 0,55$$

де $W_{СГО МП1}$ – споживання електроенергії системою газоочищення МП №1.

$$W_{ГО МП1а} = 955,42 \cdot 0,55 = 525,48 \text{ кВт·год.}$$

В інші години доби споживання електроенергії виконуємо аналогічно. У таблиці 2.2 представлено погодинне споживання електроенергії електродвигуном А СГО МП №1.

Таблиця 2.2 – Погодинне споживання електроенергії двигуна А СГО МП №1 (№1А)

Час спостереження	Обсяг, кВт·год	Час спостереження	Обсяг, кВт·год	Час спостереження	Обсяг, кВт·год
00:00-01:00	525,48	08:00-09:00	604,98	16:00-17:00	636,05
01:00-02:00	639,61	09:00-10:00	650,35	17:00-18:00	640,70
02:00-03:00	643,09	10:00-11:00	646,29	18:00-19:00	647,23
03:00-04:00	633,94	11:00-12:00	641,06	19:00-20:00	639,82
04:00-05:00	636,34	12:00-13:00	639,03	20:00-21:00	617,90
05:00-06:00	565,63	13:00-14:00	592,42	21:00-22:00	579,86
06:00-07:00	515,10	14:00-15:00	595,47	22:00-23:00	571,29
07:00-08:00	472,70	15:00-16:00	596,41	23:00-00:00	643,16

Графік погодинного споживання електроенергії електродвигуном СГОМП №1, двигун А. представлено на рисунку 2.1.

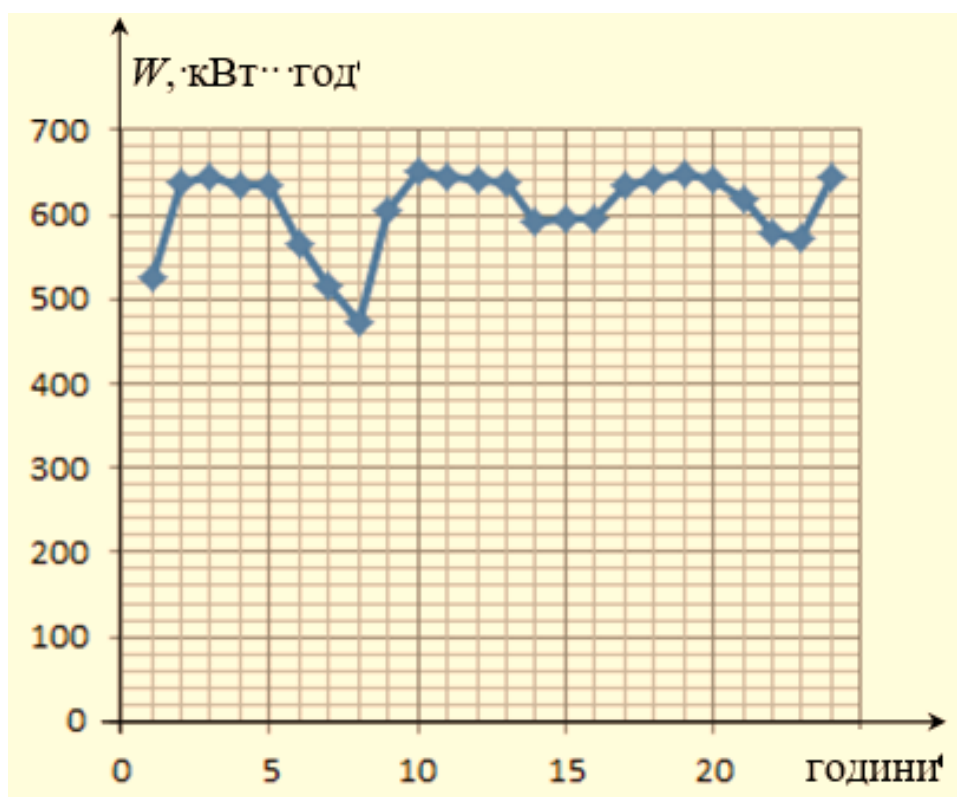


Рисунок 2.1 – Погодинне споживання електроенергії год приводним двигуном СГО МП №1А

Визначаємо погодинне споживання електроенергії електродвигуном Б СГО МП №1. Двигун Б споживає 45% від загального обсягу.

$$W_{\text{СГОМПБ}} = W_{\text{СГОМП}} - W_{\text{СГОМПА}}$$

$$W_{\text{СГОМПБ}} = 955,42 - 525,48 = 429,94 \text{ кВт}\cdot\text{год.}$$

В інші години доби споживання електроенергії виконуємо аналогічно. В таблиці 2.3 представлено погодинне споживання електроенергії двигуном Б СГОМП №1.

Таблиця 2.3 – Погодинне споживання електроенергії двигуном Б СГО МП №1 (№1Б)

Час спостереження	Обсяг, кВт·год	Час спостереження	Обсяг, кВт·год	Час спостереження	Обсяг, кВт·год
00:00-01:00	429,94	08:00-09:00	494,98	16:00-17:00	520,40
01:00-02:00	523,31	09:00-10:00	532,11	17:00-18:00	524,21
02:00-03:00	526,17	10:00-11:00	528,78	18:00-19:00	529,55
03:00-04:00	518,68	11:00-12:00	524,50	19:00-20:00	523,49
04:00-05:00	520,64	12:00-13:00	522,84	20:00-21:00	505,55
05:00-06:00	462,79	13:00-14:00	484,70	21:00-22:00	474,43
06:00-07:00	421,44	14:00-15:00	487,20	22:00-23:00	467,42
07:00-08:00	386,75	15:00-16:00	487,97	23:00-00:00	526,22

На рисунку 2.2 представлено погодинне споживання електроенергії електродвигуном СГОМП №1, двигун Б.

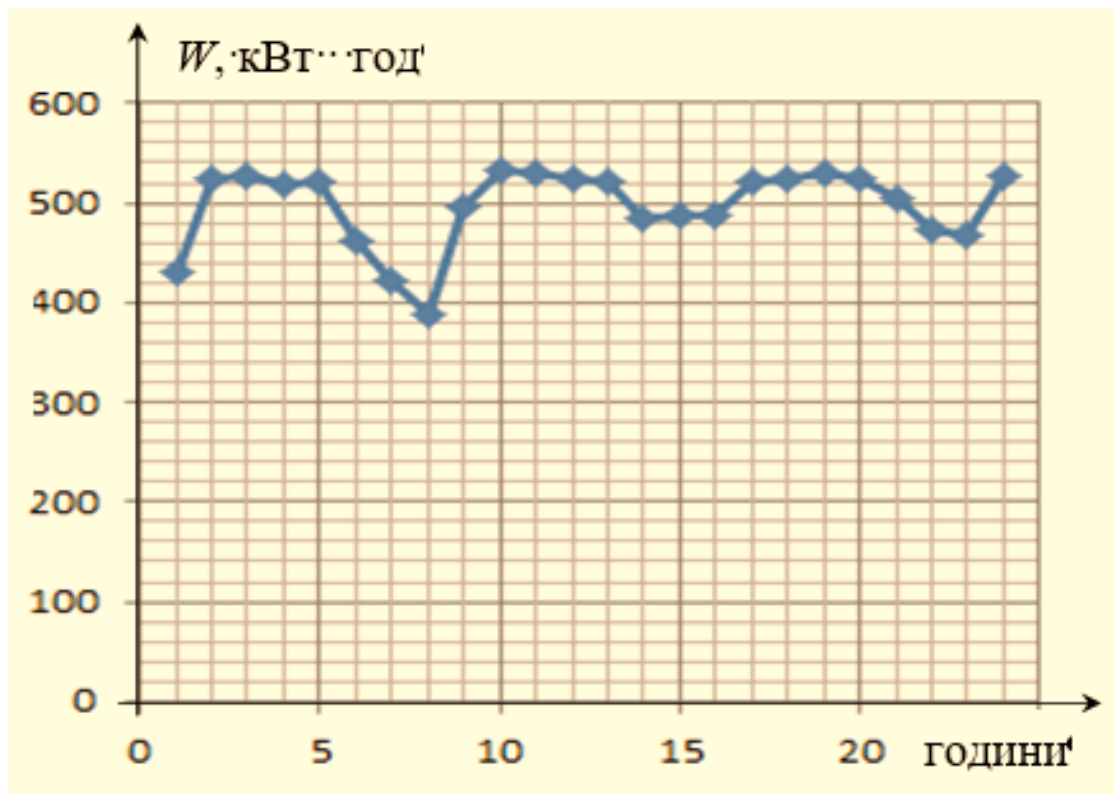


Рисунок 2.2 – Погодинне споживання електроенергії приводним двигуном СГО МП №1Б

Визначаємо погодинне споживання електроенергії СГО МП №2. СГО МП споживає 45 %.

$$W_{СГОМП2} = W_{заг.1-2} - W_{СГОМП1}$$

$$W_{СГОМП2} = 2136,48 - 1175,06 = 961,42 \text{ кВт год.}$$

В інші години доби споживання електроенергії виконуємо аналогічно.

У таблиці 2.4 представлено погодинне споживання електроенергії СГО МП №2.

Визначаємо погодинне споживання електроенергії двигуном А СГОМП №2. Двигун А споживає 55% від усього обсягу.

$$W_{СГОМП2A} = W_{СГОМП2} \cdot 0,55,$$

$$W_{ГОМП2A} = 781,704 \cdot 0,55 = 429,9372 \text{ кВт·год.}$$

В інші години доби споживання електроенергії виконуємо аналогічно. У таблиці 2.5 представлено погодинне споживання електроенергії двигуна А СГО МП №2.

Таблиця 2.4 – Погодинне споживання електроенергії СГО МП №2

Час спостереження	Обсяг, кВт·год	Час спостереження	Обсяг, кВт·год	Час спостереження	Обсяг, кВт·год
00:00-01:00	961,42	08:00-09:00	899,96	16:00-17:00	946,19
01:00-02:00	951,48	09:00-10:00	967,46	17:00-18:00	953,10
02:00-03:00	956,66	10:00-11:00	961,42	18:00-19:00	962,82
03:00-04:00	943,06	11:00-12:00	953,64	19:00-20:00	951,80
04:00-05:00	946,62	12:00-13:00	950,62	20:00-21:00	919,19
05:00-06:00	841,43	13:00-14:00	881,28	21:00-22:00	862,60
06:00-07:00	766,26	14:00-15:00	885,82	22:00-23:00	849,85
07:00-08:00	703,19	15:00-16:00	887,22	23:00-00:00	956,77

Визначаємо погодинне споживання електроенергії двигуном А СГОМП №2. Двигун А споживає 55% від усього обсягу.

$$W_{СГОМП2А} = W_{СГОМП2} \cdot 0,55,$$

$$W_{ГОМП2А} = 781,704 \cdot 0,55 = 429,9372 \text{ кВт·год.}$$

В інші години доби споживання електроенергії виконуємо аналогічно. У таблиці 2.5 представлено погодинне споживання електроенергії двигуна А СГО МП №2.

Таблиця 2.5 – Погодинне електроспоживання двигуна А СГО МП №2 (№2А)

Час спостереження	Обсяг, кВт·год	Час спостереження	Обсяг, кВт·год	Час спостереження	Обсяг, кВт·год
00:00-01:00	429,94	08:00-09:00	494,98	16:00-17:00	520,40
01:00-02:00	523,31	09:00-10:00	532,11	17:00-18:00	524,21
02:00-03:00	526,17	10:00-11:00	528,78	18:00-19:00	529,55
03:00-04:00	518,68	11:00-12:00	524,50	19:00-20:00	523,49
04:00-05:00	520,64	12:00-13:00	522,84	20:00-21:00	505,55
05:00-06:00	462,79	13:00-14:00	484,70	21:00-22:00	474,43
06:00-07:00	421,44	14:00-15:00	487,20	22:00-23:00	467,42
07:00-08:00	386,75	15:00-16:00	487,970	23:00-00:00	526,22

Графік погодинного споживання електроенергії двигуном А СГО МП №2 представлено на рисунку 2.3.

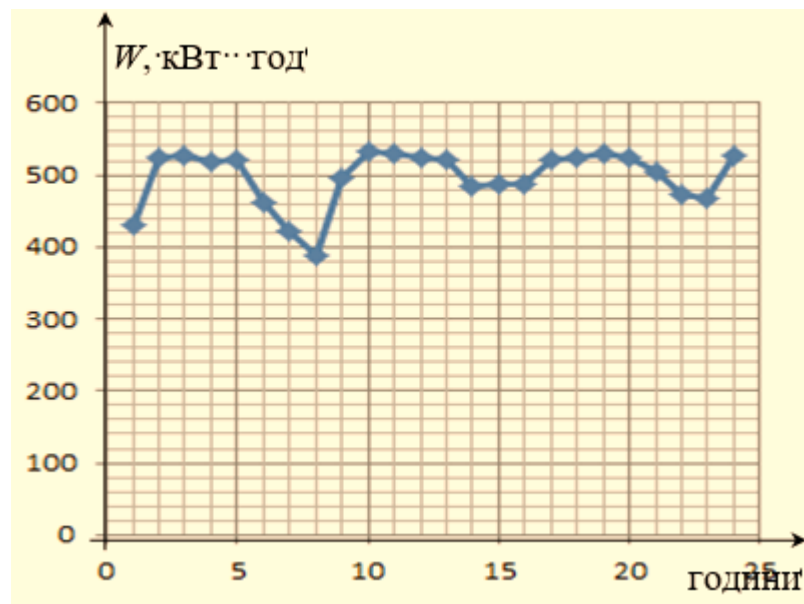


Рисунок 2.3 – Погодинне споживання електроенергії приводним двигуном СГО МП №2А

Визначаємо погодинне споживання електроенергії двигуном Б СГО МП №2. Двигун Б споживає 45 %.

$$W_{СГОМПБ} = W_{СГОМП} - W_{СГОМП2А},$$

$$W_{СГОМІЗБ} = 781,704 - 429,9372 = 351,7668 \text{ кВт}\cdot\text{год.}$$

В інші години доби споживання електроенергії визначаємо аналогічно. У таблиці 2.6 представлено погодинне електроспоживання двигуном Б СГО МП №2.

Таблиця 2.6 – Погодинне електроспоживання двигуном Б СГО МП №2 (№ 2Б)

Час спостереження	Обсяг, кВт·год	Час спостереження	Обсяг, кВт·год	Час спостереження	Обсяг, кВт·год
00:00-01:00	351,77	08:00-09:00	404,98	16:00-17:00	425,78
01:00-02:00	428,17	09:00-10:00	435,36	17:00-18:00	428,90
02:00-03:00	430,50	10:00-11:00	432,64	18:00-19:00	433,27
03:00-04:00	424,38	11:00-12:00	429,14	19:00-20:00	428,31
04:00-05:00	425,98	12:00-13:00	427,78	20:00-21:00	413,63
05:00-06:00	378,64	13:00-14:00	396,58	21:00-22:00	388,17
06:00-07:00	344,82	14:00-15:00	398,62	22:00-23:00	382,43
07:00-08:00	316,43	15:00-16:00	399,25	23:00-00:00	430,55

На рисунку 2.4 представлено графік погодинного споживання електроенергії двигуном Б СГО МП №2.

Визначаємо погодинне споживання електроенергії двигуном А СГО МП № 5. Двигун А споживає 55% від усього обсягу.

$$W_{СГОМІ5А} = 1085,24 \cdot 0,55 = 596,88 \text{ кВт}\cdot\text{год.}$$

В інші години доби споживання електроенергії виконуємо аналогічно. У таблиці 2.7 представлено погодинне електроспоживання двигуном А СГОМІ №5.

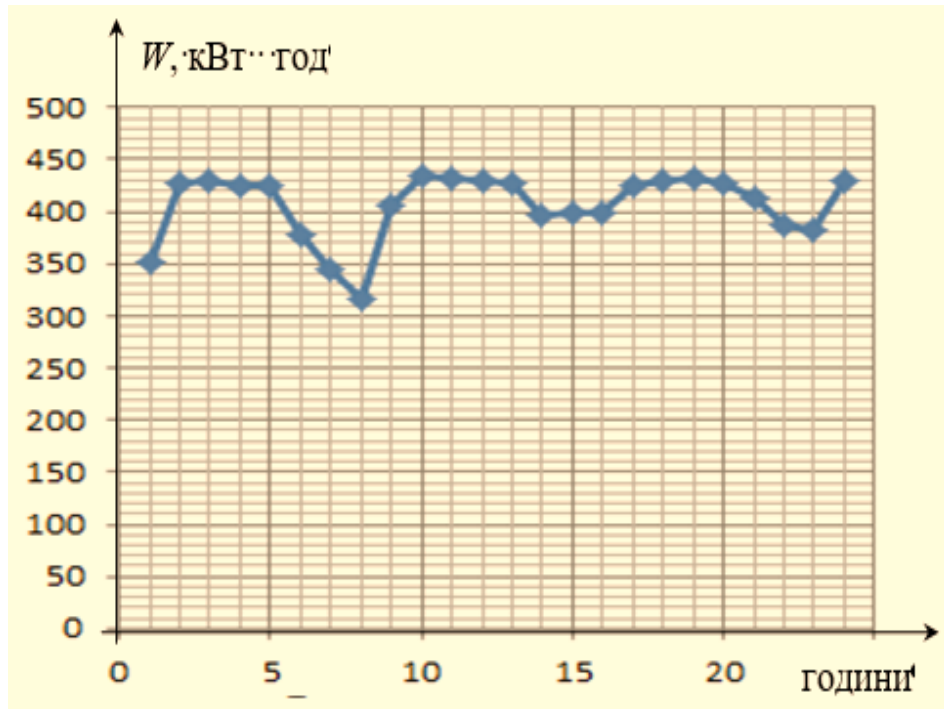


Рисунок 2.4 – Погодинне споживання електроенергії приводним двигуном СГО МП №2Б

Таблиця 2.7 – Погодинне споживання електроенергії приводним електродвигуном А системи газоочищення мартенівської печі №5 (№5А)

Час спостереження	Обсяг, кВт·год	Час спостереження	Обсяг, кВт·год	Час спостереження	Обсяг, кВт·год
00:00-01:00	596,88	08:00-09:00	577,17	16:00-17:00	595,53
01:00-02:00	589,86	09:00-10:00	569,88	17:00-18:00	579,96
02:00-03:00	598,59	10:00-11:00	559,08	18:00-19:00	580,95
03:00-04:00	625,86	11:00-12:00	607,68	19:00-20:00	576,99
04:00-05:00	651,42	12:00-13:00	638,82	20:00-21:00	645,03
05:00-06:00	614,43	13:00-14:00	630,63	21:00-22:00	651,33
06:00-07:00	575,01	14:00-15:00	594,72	22:00-23:00	575,37
07:00-08:00	577,71	15:00-16:00	595,98	23:00-00:00	578,16

На рисунку 2.5 представлено графік погодинного споживання електроенергії двигуном № 5А.

Визначаємо погодинне споживання електроенергії двигуном Б СГО МП №5. Двигун Б споживає 45%.

$$W_{СГОМПБ} = 1085,24 - 596,88 = 488,36 \text{ кВт·год.}$$

В інші години доби споживання електроенергії визначаємо аналогічно. У таблиці 2.8 представлено погодинне споживання двигуном Б СГО МП №5.

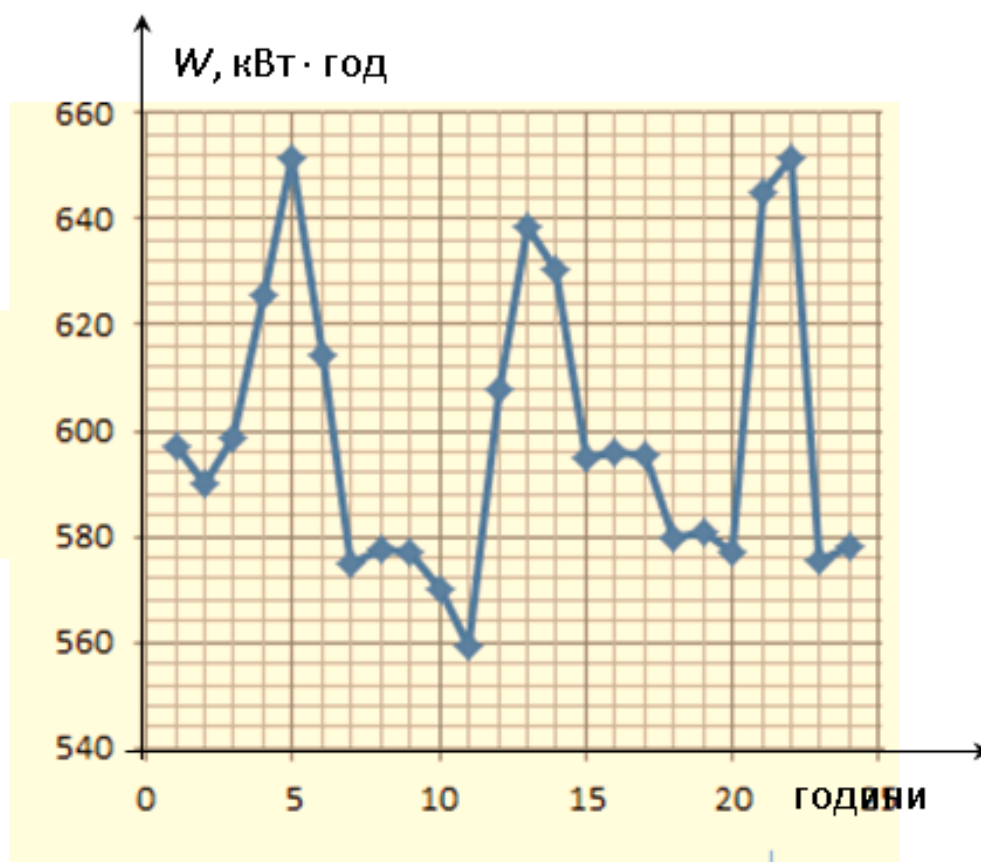


Рисунок 2.5 – Погодинне споживання електроенергії приводним двигуном СГО МП №5А

Таблиця 2.8 – Погодинне споживання електроенергії приводним електродвигуном Б системи газоочищення мартенівської печі №5 (№5Б)

Час спостереження	Обсяг, кВт·год	Час спостереження	Обсяг, кВт·год	Час спостереження	Обсяг, кВт·год
00:00-01:00	408,48	08:00-09:00	521,64	16:00-17:00	472,50
01:00-02:00	390,78	09:00-10:00	514,98	17:00-18:00	459,36
02:00-03:00	363,60	10:00-11:00	504,90	18:00-19:00	459,81
03:00-04:00	299,97	11:00-12:00	312,66	19:00-20:00	457,2
04:00-05:00	181,35	12:00-13:00	234,09	20:00-21:00	200,61
05:00-06:00	356,85	13:00-14:00	291,96	21:00-22:00	183,60
06:00-07:00	518,85	14:00-15:00	469,44	22:00-23:00	509,76
07:00-08:00	521,73	15:00-16:00	471,60	23:00-00:00	511,92

На рисунку 2.6 представлено графік погодинного споживання електроенергії двигуном 5Б.

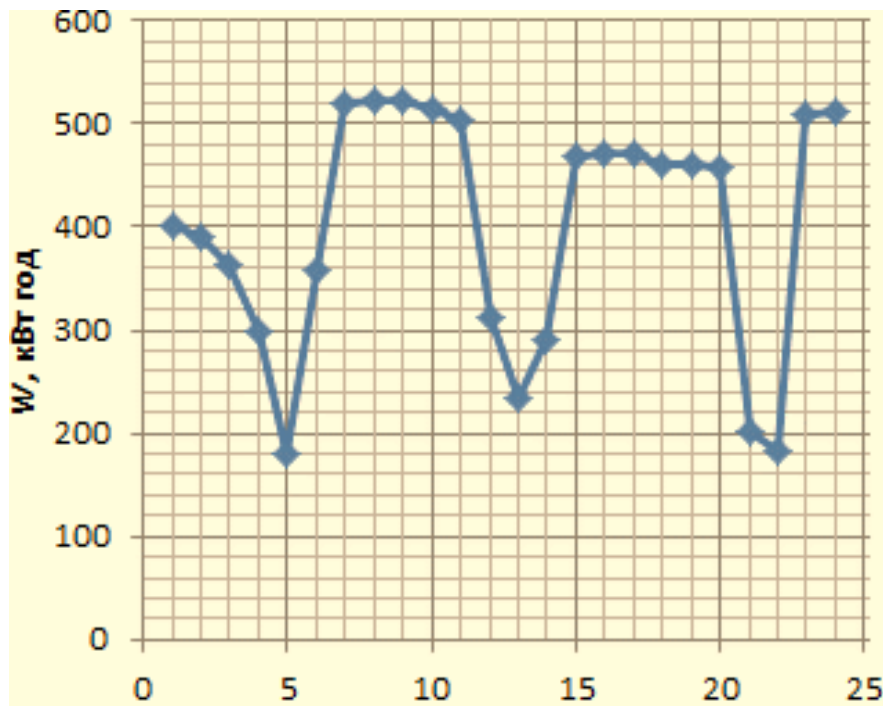


Рисунок 2.6 – Погодинне споживання електроенергії приводним двигуном СГО МП 5Б

Визначаємо погодинне споживання електроенергії СГО МП №7. СГО МП №7 споживає 55% від усього обсягу електроспоживання СГО МП 7 та 8.

$$W_{\text{СГОМП7}} = W_{\text{заг.7-8}} \cdot 0,55$$

$$W_{\text{СГОМП7}} = 1422 \cdot 0,55 = 782,1 \text{ кВт} \cdot \text{год.}$$

В інші години доби споживання електроенергії визначаємо аналогічно.

В таблиці 2.9 представлено погодинне споживання електроенергії СГО МП №7.

Визначаємо погодинне споживання електроенергії двигуном А СГО МП №7. Двигун А споживає 55% від усього обсягу.

$$W_{\text{СГОМП7A}} = W_{\text{ГОМП7}} \cdot 0,55$$

$$W_{\text{СГОМП7A}} = 782,1 \cdot 0,55 = 430,16 \text{ кВт} \cdot \text{год.}$$

В інші години доби споживання електроенергії визначаємо аналогічно. У таблиці 2.10 представлено погодинне споживання електроенергії двигуном А мартенівської СГО МП №7.

Таблиця 2.9 – Погодинне споживання електроенергії СГО МП №7

Час спостереження	Обсяг, кВт·год.	Час спостереження	Обсяг, кВт·год.	Час спостереження	Обсяг, кВт·год.
00:00-01:00	782,10	08:00-09:00	754,05	16:00-17:00	1126,29
01:00-02:00	753,39	09:00-10:00	795,30	17:00-18:00	1099,89
02:00-03:00	811,80	10:00-11:00	805,53	18:00-19:00	1120,68
03:00-04:00	773,85	11:00-12:00	754,71	19:00-20:00	1084,05
04:00-05:00	753,39	12:00-13:00	729,96	20:00-21:00	1171,17
05:00-06:00	763,29	13:00-14:00	867,57	21:00-22:00	1234,86
06:00-07:00	761,64	14:00-15:00	1207,5	22:00-23:00	1162,60
07:00-08:00	811,47	15:00-16:00	1171,5	23:00-00:00	1097,60

Таблиця 2.10 – Погодинне електроспоживання двигуна А СГО МП №7 (№7А)

Час спостереження	Обсяг, кВт·год.	Час спостереження	Обсяг, кВт·год.	Час спостереження	Обсяг, кВт·год.
00:00-01:00	430,16	08:00-09:00	414,73	16:00-17:00	619,46
01:00-02:00	414,36	09:00-10:00	437,42	17:00-18:00	604,94
02:00-03:00	446,49	10:00-11:00	443,04	18:00-19:00	616,37
03:00-04:00	425,62	11:00-12:00	415,09	19:00-20:00	596,23
04:00-05:00	414,36	12:00-13:00	401,48	20:00-21:00	644,14
05:00-06:00	419,81	13:00-14:00	477,16	21:00-22:00	679,17
06:00-07:00	418,90	14:00-15:00	664,11	22:00-23:00	639,42
07:00-08:00	446,31	15:00-16:00	644,33	23:00-00:00	603,67

Споживання електроенергії двигуном А СГО МП №7 показано на рисунку 2.7.

Визначаємо погодинне споживання електроенергії двигуном Б СГО МП №7.

$$W_{\text{СГОМПБ}} = W_{\text{СГОМП}} - W_{\text{СГОМПА}},$$

$$W_{\text{СГОМПБ}} = 782,10 - 430,16 = 351,94 \text{ кВт·год.}$$

У таблиці 2.11 представлено погодинне споживання електроенергії двигуном Б СГО МП №7.

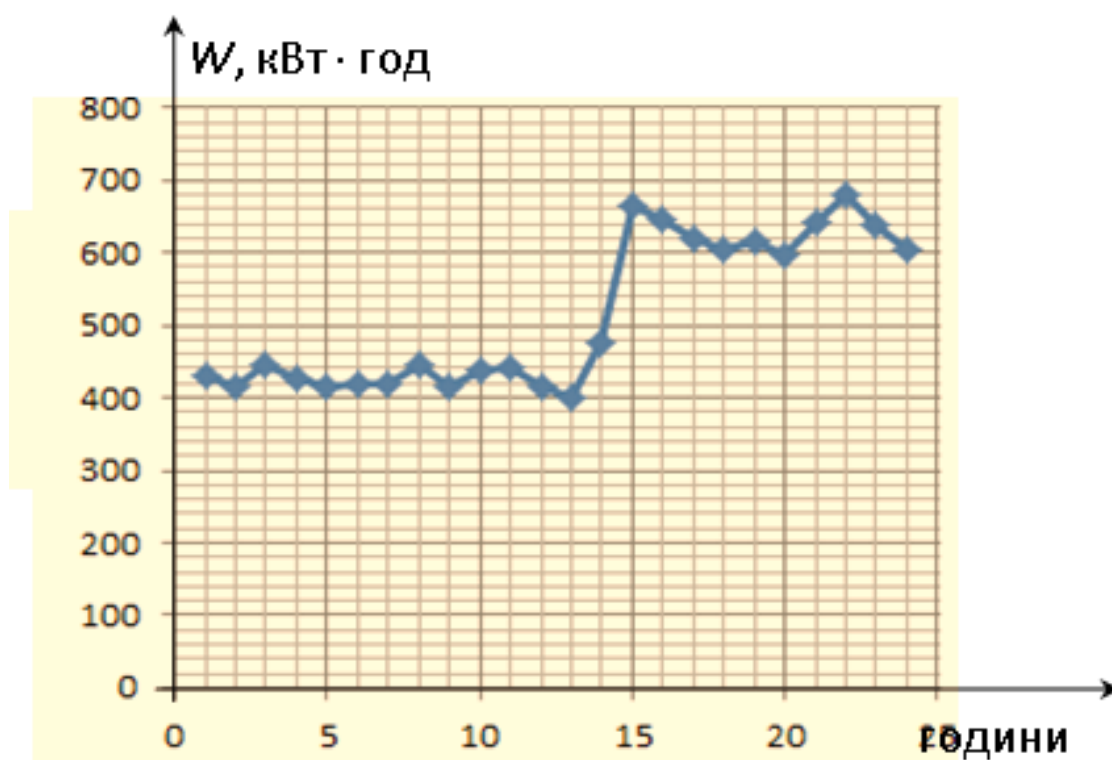


Рисунок 2.7 – Погодинне споживання електроенергії приводним двигуном СГО МП №7А

Таблиця 2.11 – Погодинне електроспоживання двигуна Б СГО МП №7 (№7Б)

Час спостереження	Обсяг, кВт·год	Час спостереження	Обсяг, кВт·год.	Час спостереження	Обсяг, кВт·год
00:00-01:00	351,95	08:00-09:00	339,32	16:00-17:00	506,83
01:00-02:00	339,03	09:00-10:00	357,89	17:00-18:00	494,95
02:00-03:00	365,31	10:00-11:00	362,49	18:00-19:00	504,31
03:00-04:00	348,23	11:00-12:00	339,62	19:00-20:00	487,82
04:00-05:00	343,48	12:00-13:00	390,41	21:00-22:00	555,69
05:00-06:00	342,74	13:00-14:00	543,36	22:00-23:00	523,17
06:00-07:00	365,16	14:00-15:00	527,18	23:00-00:00	493,91

На рисунку 2.8 представлено споживання електроенергії двигуном Б СГО

МП №7.

Визначасмо погодинне споживання електроенергії СГО МП №8. СГО МП №8 споживає 45%.

$$W_{\text{СГОМП8}} = W_{\text{заг.7-8}} - W_{\text{СГОМП7}}$$

$$W_{\text{СГОМП8}} = 1422 - 782,1 = 639,9 \text{ кВт год.}$$

У таблиці 2.12 представлено погодинне електроспоживання СГО МП №8.

$$W_{\text{СГОМПА}} = W_{\text{СГОМП8}} \cdot 0,55$$

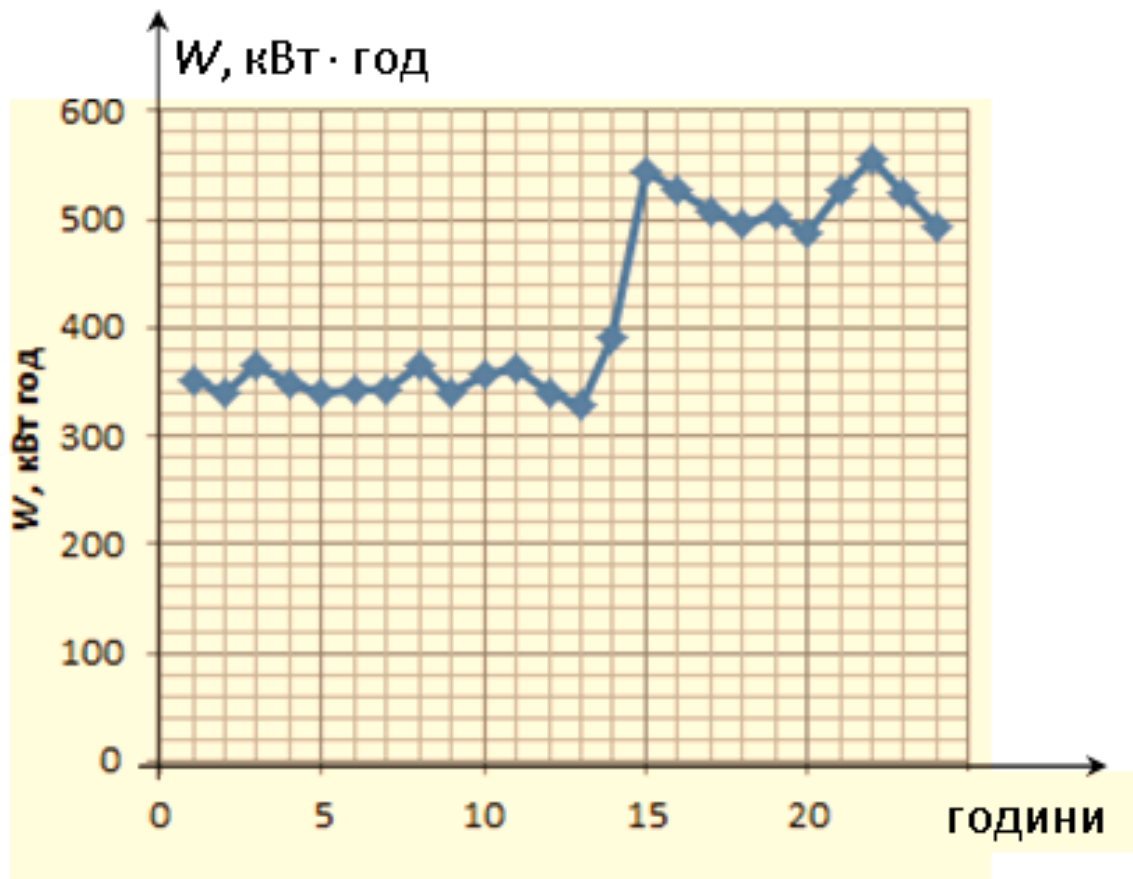


Рисунок 2.8 – Погодинне споживання електроенергії приводним двигуном СГО МП 7Б

$$W_{\text{СГОМПА}} = 639,9 \cdot 0,55 = 351,95 \text{ кВт год.}$$

В інші години доби споживання електроенергії визначаємо аналогічно. У таблиці 2.13 представлено погодинне споживання електроенергії двигуна А СГО МП №8.

Таблиця 2.12 – Погодинне споживання електроенергії СГО МП №8

Час спостереження	Обсяг, кВт·год	Час спостереження	Обсяг, кВт·год.	Час спостереження	Обсяг, кВт·год
00:00-01:00	639,90	08:00-09:00	616,95	16:00-17:00	921,51
01:00-02:00	616,41	09:00-10:00	650,70	17:00-18:00	899,91
02:00-03:00	664,2	10:00-11:00	659,07	18:00-19:00	916,92
03:00-04:00	633,15	11:00-12:00	617,49	19:00-20:00	886,95
04:00-05:00	616,41	12:00-13:00	597,24	20:00-21:00	958,23
05:00-06:00	624,51	13:00-14:00	709,83	21:00-22:00	1010,34
06:00-07:00	623,16	14:00-15:00	987,93	22:00-23:00	951,21
07:00-08:00	663,93	15:00-16:00	958,50	23:00-00:00	898,02

Визначаємо погодинне споживання електроенергії двигуна А СГО МП №8.

Таблиця 2.13 – Погодинне електроспоживання двигуна А СГО МП №8 (№8А)

Час спостереження	Обсяг, кВт·год	Час спостереження	Обсяг, кВт·год.	Час спостереження	Обсяг, кВт·год
00:00-01:00	351,95	08:00-09:00	339,32	16:00-17:00	506,83
01:00-02:00	339,03	09:00-10:00	357,89	17:00-18:00	494,95
02:00-03:00	365,31	10:00-11:00	362,49	18:00-19:00	504,31
03:00-04:00	348,23	11:00-12:00	339,62	19:00-20:00	487,82
04:00-05:00	339,03	12:00-13:00	328,48	20:00-21:00	527,03
05:00-06:00	343,48	13:00-14:00	390,41	21:00-22:00	555,69
06:00-07:00	342,74	14:00-15:00	543,36	22:00-23:00	523,17
07:00-08:00	365,16	15:00-16:00	527,18	23:00-00:00	493,91

Визначаємо погодинне споживання електроенергії двигуном Б СГО МП №8.

$$W_{\text{СГОМП8Б}} = W_{\text{СГОМП8}} - W_{\text{СГОМП8А}}$$

$$W_{\text{СГОМП8Б}} = 639,9 - 351,945 = 287,96 \text{ кВт год.}$$

В інші години доби споживання електроенергії визначаємо аналогічно.
У таблиці 2.14 представлено споживання двигуна Б СГО МП № 8.

Таблиця 2.14 – Погодинне електроспоживання двигуна Б СГО МП №8(№8Б)

Час спостереження	Обсяг, кВт·год	Час спостереження	Обсяг, кВт·год.	Час спостереження	Обсяг, кВт·год
00:00-01:00	287,96	08:00-09:00	277,63	16:00-17:00	414,68
01:00-02:00	277,38	09:00-10:00	292,81	17:00-18:00	412,61
02:00-03:00	298,89	10:00-11:00	296,58	18:00-19:00	399,13
03:00-04:00	284,92	11:00-12:00	277,87	19:00-20:00	431,20
04:00-05:00	277,38	12:00-13:00	268,76	20:00-21:00	454,65
05:00-06:00	281,03	13:00-14:00	319,42	21:00-22:00	428,045
06:00-07:00	280,42	14:00-15:00	444,57	22:00-23:00	404,11
07:00-08:00	298,77	15:00-16:00	431,33	23:00-00:00	454,65

Споживання електроенергії двигуном Б СГО МП №8 показано на рисунку 2.10.

Визначаємо погодинне споживання електроенергії двигуном А СГО МП №10.

$$W_{\text{СГОМП10А}} = W_{\text{СГОМП10}} \cdot 0,55$$

$$W_{\text{СГОМП10А}} = 867,96 \cdot 0,55 = 477,38 \text{ кВт год.}$$

У таблиці 2.15 представлено погодинне споживання електроенергії двигуна А СГО МП № 10.

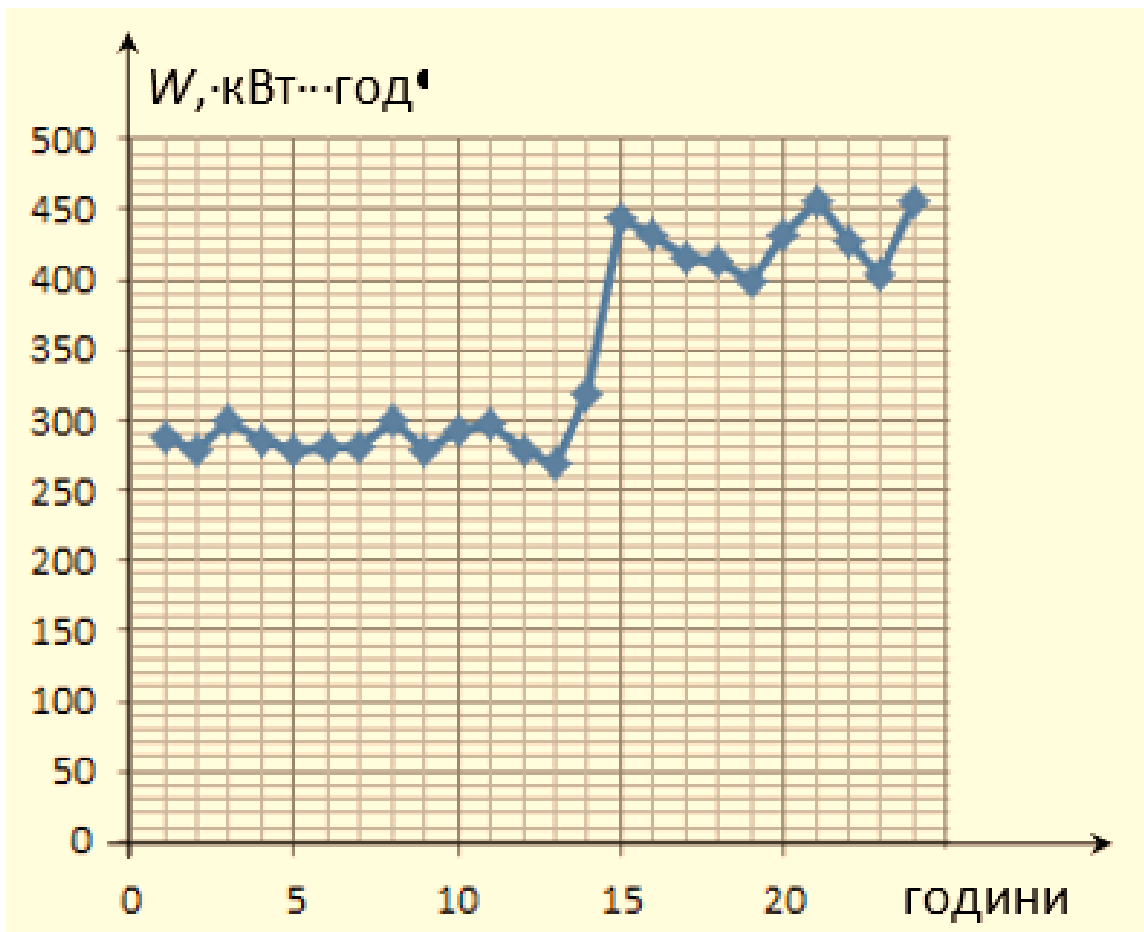


Рисунок 2.10 – Погодинне споживання електроенергії приводним двигуном СГО МП №8Б

Таблиця 2.15 – Погодинне електроспоживання двигуна А СГОМП №10(№10А)

Час спостереження	Обсяг, кВт·год	Час спостереження	Обсяг, кВт·год.	Час спостереження	Обсяг, кВт·год
00:00-01:00	477,38	08:00-09:00	584,50	16:00-17:00	518,17
01:00-02:00	474,41	09:00-10:00	559,15	17:00-18:00	487,48
02:00-03:00	587,47	10:00-11:00	555,98	18:00-19:00	490,05
03:00-04:00	620,53	11:00-12:00	636,57	19:00-20:00	632,21
04:00-05:00	625,28	12:00-13:00	630,83	20:00-21:00	637,16
05:00-06:00	631,82	13:00-14:00	627,07	21:00-22:00	626,87
06:00-07:00	618,95	14:00-15:00	621,72	22:00-23:00	615,78
07:00-08:00	614,99	15:00-16:00	616,18	23:00-00:00	601,52

Споживання електроенергії двигуном А СГО МП №10 показано на рисунку 2.11.

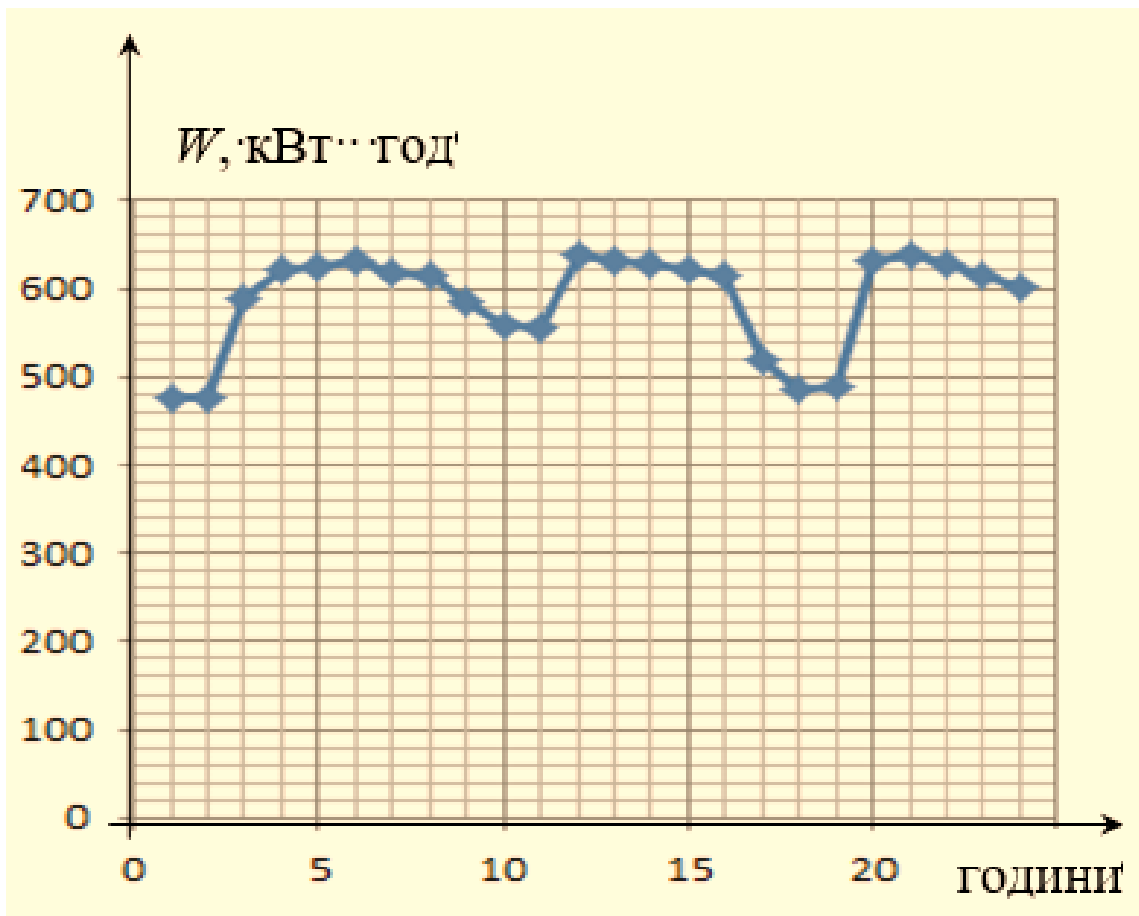


Рисунок 2.11 – Погодинне споживання електроенергії приводним двигуном СГО МП №10А

Погодинне споживання електроенергії двигуном Б СГО МП №10.

$$W_{\text{СГОМП10Б}} = W_{\text{СГОМП10}} - W_{\text{СГОМП10А}}$$

$$W_{\text{СГОМП10Б}} = 867,96 - 477,38 = 390,58 \text{ кВт год.}$$

В інші години доби споживання електроенергії визначаємо аналогічно. У таблиці 2.16 представлено погодинне споживання електроенергії двигуна Б СГО МП №10.

Таблиця 2.16 – Погодинне споживання електроенергії приводним електродвигуном Б системи газоочищення мартенівської печі №10 (№10Б)

Час спостереження	Обсяг, кВт·год	Час спостереження	Обсяг, кВт·год.	Час спостереження	Обсяг, кВт·год
00:00-01:00	390,58	08:00-09:00	478,22	16:00-17:00	423,95
01:00-02:00	388,15	09:00-10:00	457,49	17:00-18:00	398,84
02:00-03:00	480,65	10:00-11:00	454,90	18:00-19:00	400,95
03:00-04:00	507,71	11:00-12:00	520,83	19:00-20:00	517,27
04:00-05:00	511,60	12:00-13:00	516,13	20:00-21:00	521,32
05:00-06:00	516,94	13:00-14:00	513,05	21:00-22:00	512,89
06:00-07:00	506,41	14:00-15:00	508,68	22:00-23:00	503,82
07:00-08:00	503,17	15:00-16:00	504,14	23:00-00:00	492,16

На рисунку 2.12 представлено споживання електроенергії двигуном Б СГ ОМП №10.

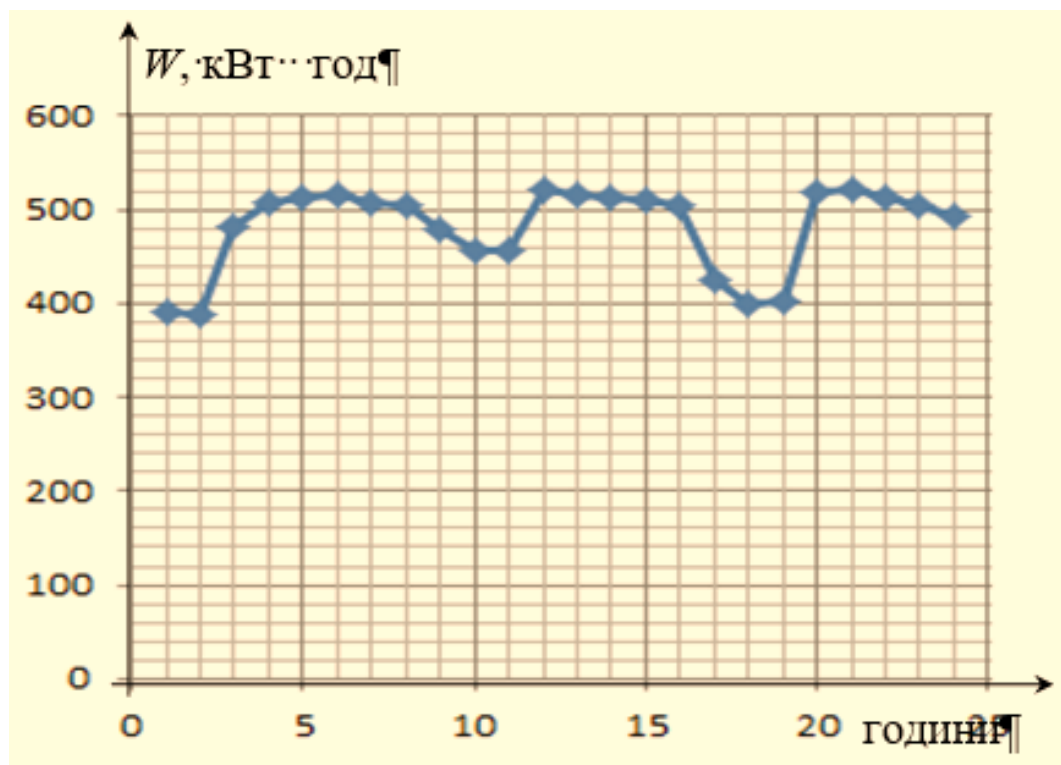


Рисунок 2.12 – Погодинне споживання електроенергії приводним двигуном СГО МП 10Б

Отримані обсяги погодинного електроспоживання приводними електродвигунами системи газоочищення мартенівських печей

підсумовуємо і зводимо в таблицю 2.17.

Таблиця 2.17 – Сумарне добове споживання електроенергії приводними електродвигунами систем газоочищення мартенівських печей

Система газоочищення	Електроспоживання, кВт·год	Система газоочищення	Електроспоживанн я, кВт·год
ГОМП 1А	14573,8	ГОМП 8А	10077,3
ГОМП 1Б	11924,0	ГОМП 8Б	8245,1
ГОМП 2А	11924,0	ГОМП 5А	9611,6
ГОМП 2Б	9756,0	ГОМП 5Б	14387,0
ГОМП 7А	12316,7	ГОМП 10А	14092,0
ГОМП 7Б	10077,3	ГОМП 10Б	11529,8

На основі проведеного аналізу та розрахунків прийнято висновок, що обсяги споживання електроенергії електроприводом млинових вентиляторів систем газоочищення мартенівських печей прямо залежать від періоду проведення плавки, витрат електроенергії під час технологічного процесу подачі кисню, споживання природного газу, повітря, а також рівня розрідження у борві.

З метою подальшого оптимізації споживання електроенергії системою газоочищення мартенівських печей постає завдання розробити математичну модель, яка враховуватиме вплив цих факторів. Побудова такої моделі дозволить розробити ефективні заходи зі зменшення обсягів електроспоживання у конкретні моменти проведення плавки металу.

Моделювання витрати електроенергії системою газоочищення вихідних газів печей представляє собою значущу складову наукових досліджень. Експеримент, який базується на науково сформульованих дослідах з управліними умовами, що детально розглядаються, є важливою складовою цього процесу [11...13].

З розвитком науки експеримент визначався як потужний інструмент для вивчення природних явищ та технічних об'єктів. Проте його систематичне дослідження стало актуальним нещодавно. Увага вчених до оптимальних

методів проведення експерименту виникла як результат досягнутого рівня та розмірів експериментальних досліджень на сучасному етапі розвитку науки і техніки. Цей етап відзначається збільшенням кількості експериментів, ростом числа фахівців, які займаються експериментальною діяльністю, складнішими об'єктами дослідження та використанням ускладненого експериментального обладнання [14]. Так само, як і в будь-якому науковому напрямку, теорія планування експерименту сформулювала систему понять і термінів.

Як відомо, планування експерименту передбачає процедуру вибору числа та умов проведення дослідів, необхідних і достатніх для вирішення поставленого завдання з необхідною точністю. Принципи, що лежать в основі теорії планування експерименту, націлені на підвищення ефективності проведення експериментів. Це включає:

- мінімізація загального числа дослідів. Основна ідея полягає в тому, щоб досягти максимальної інформативності експерименту при мінімізації кількості проведених досліджень;
- одночасне варіювання усіма змінними за спеціальними правилами. Це означає використання алгоритмів для систематичного змінювання всіх факторів, що визначають процес, з метою отримання комплексної інформації;
- використання математичного апарату для формалізації дій експериментатора. Використання математичних методів дозволяє точно визначити взаємозв'язки та тренди в отриманих даних, що допомагає у більш ефективному аналізі результатів;
- вибір чіткої стратегії для обґрунтованих рішень. Встановлення конкретного плану дій, який дозволяє здійснювати обґрунтовані висновки на основі кожної серії експериментів.

Завдання, для яких може бути застосоване планування експерименту, дуже різноманітні. Це може включати пошук оптимальних умов, розробку інтерполяційних формул, вибір важливих факторів, оцінку та уточнення констант теоретичних моделей, а також вибір найбільш прийнятних гіпотез про

механізм явищ. Отже, можна стверджувати, що там, де проводиться експеримент, існує наука про його планування – теорія планування експерименту.

Головною метою проведення експерименту є виявлення характеристик об'єктів, їхніх властивостей та перевірка справедливості гіпотез, що в свою чергу дозволяє ретельно і глибоко вивчати предмет дослідження. Задачі постановки та організації експерименту визначають його цілі [12...15]. Для ефективного планування експерименту необхідно визначити фактори, які впливають на конкретну величину. У даному випадку це споживання електроенергії системою газоочищення, на яке впливають наступні фактори [14]:

- 1) споживання O_2 ;
- 2) споживання природного газу.
- 3) розрідження у борові;
- 4) споживання кисню.

На рисунку 2.13 наведено графічне представлення факторів, які впливають на обсяги споживання електроенергії обладнанням системи газоочищення мартенівських печей.

Фактори, що впливають на витрату електроенергії обладнанням системи газоочищення, визначені і представлені в таблиці 2.18, яка містить умови проведення факторного експерименту.

Таблиця 2.18 – Умови проведення факторного експерименту

Характеристика плану	Споживання кисню, m^3 x_1	Споживання природного газу, m^3 x_2	Споживання повітря, m^3 x_3	Розрідження у борові, мм.вод.ст x_4
Мінімум	8212,18	108318,0	20763,9	16,0
Максимум	10187,14	139065,0	29046,2	35,0

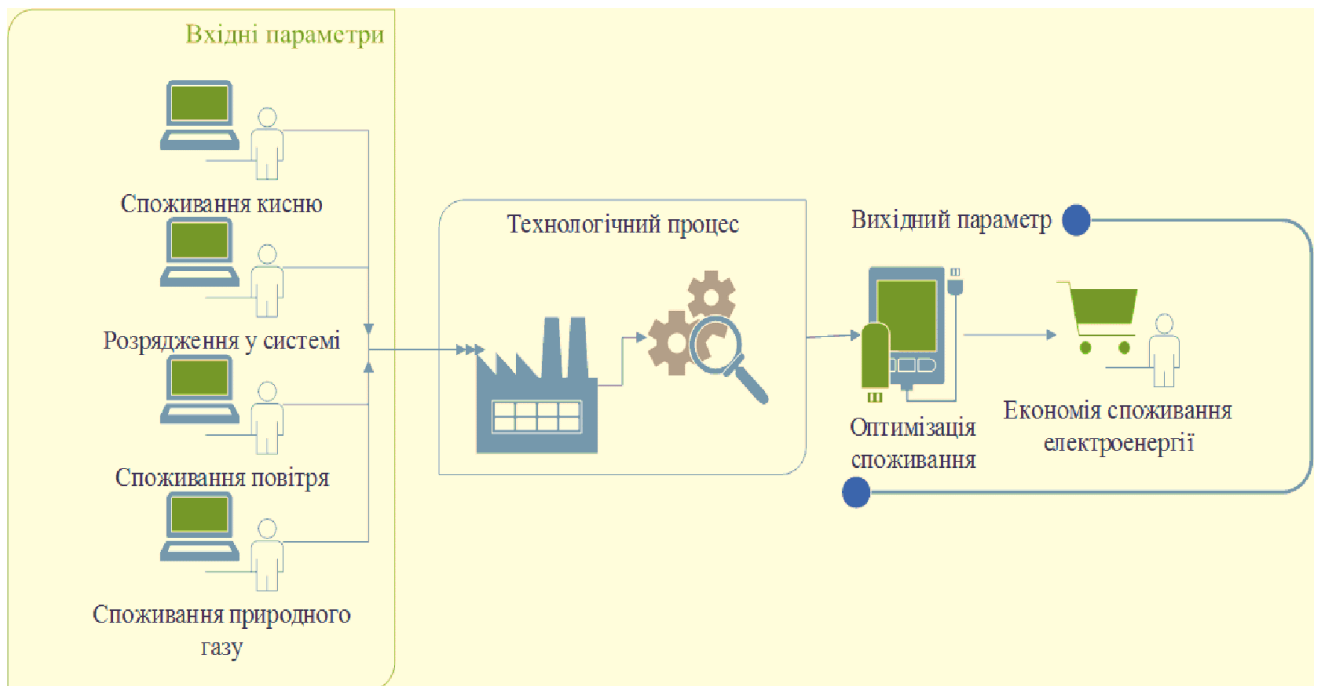


Рисунок 2.13 – Фактори, що впливають на витрату електроенергії обладнанням системи газоочищення

У цій таблиці представлені різні фактори та рівні, які вони можуть мати під час експерименту, що дозволяє систематично досліджувати їх вплив на споживання електроенергії системою газоочищення.

Побудуємо матрицю експерименту з чотирма факторами. У таблиці 2.19 представлено план проведення експерименту.

Ця таблиця вказує на періоди, протягом яких змінюється характеристика кожного етапу, що служить ключовою інформацією для подальшого вивчення впливу на споживання електроенергії системою газоочищення.

Розрідження в борві, споживання кисню, споживання повітря та споживання природного газу визначаються етапом плавлення мартенівської печі. Залежно від технологічного процесу на різних етапах плавлення вводиться різна кількість газу, кисню та повітря, що також супроводжується змінами в рівні розрідження в борві. Ці зміни призводять до відповідних коливань у споживанні електричної енергії приводними двигунами млинових вентиляторів системи газоочищення. Визначимо 100% проміжок часу як тривалість 60 хвилин.

Таблиця 2.19 – План проведення експерименту (матриця експерименту)

№	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	x_1x_2	x_1x_3	x_1x_4	x_2x_3	x_2x_4	x_3x_4	y
1	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	+	y_1
2	+	-	+	+	+	-	+	+	+	+	+	y_2
3	+	-	-	+	+	-	-	-	-	-	+	y_3
4	+	-	-	-	+	-	+	+	-	-	+	y_4
5	+	-	-	-	-	-	+	-	-	+	-	y_5
6	+	+	-	-	-	+	-	+	-	+	-	y_6
7	+	+	+	-	-	+	+	-	+	-	-	y_7
8	+	+	+	+	-	+	-	+	+	-	-	y_8
9	+	+	-	+	-	+	-	+	+	-	-	y_9
10	+	-	+	+	-	-	+	-	+	-	-	y_{10}
11	+	+	-	-	+	+	-	+	-	+	-	y_{11}
12	+	-	+	-	+	-	+	-	-	+	-	y_{12}

Сумарна тривалість технологічного процесу однієї плавки становить від 7 годин 10 хвилин до 7 годин 10 хвилин – приймаємо 8 годин. Витрата електричної енергії на систему газоочищення мартенівських печей залежить від ряду технологічних факторів. Ці фактори із плином часу впливають в тій чи іншій мірі на електроспоживання і представляють собою невизначені функції. На практиці необхідно визначити фактори, що найбільш суттєво впливають на споживання (витрату) електричної енергії. Для визначення ряду факторів, що суттєво впливають на електроспоживання, необхідно навести складну систему споживання електричної енергії у вигляді рівняння множинної лінійної регресії, що враховує взаємозв'язок між факторами і дозволяє визначити (оцінити) ступінь впливу того чи іншого фактора на вихідну величину. Споживання електроенергії можна записати наступним виразом.

Таблиця 2.20 – Тривалість етапів мартенівської плавки

Режими плавки	Час періоду плавки, хв.	Час періоду плавки, %
Випуск-заправка	25	41,6%
Заправка	15	25 %
Завалка	65	108,3%
	70	116,7%
	75	125%
	80	133,3%
	85	141,7%
Прогрівання	80	133,3%
	85	141,7%
	90	150%
Заливка 1	20	33,3%
Заливка 2	10	16,7%
Плавлення 1	60	100%
Плавлення 2	95	158,3%
	100	166,7%
	105	175%
Доводка	60	100%
РАЗОМ	430-480	

Сумарна тривалість технологічного процесу одного плавлення коливається від 7 годин 10 хвилин до 8 годин. Для цілей аналізу приймемо середнє значення в 8 годин. Витрата електричної енергії на систему газоочищення мартенівських печей залежить від різних технологічних факторів. Ці фактори, що з часом можуть впливати на електроспоживання, представляють собою невизначені функції.

На практиці важливо визначити ті фактори, які найбільше впливають на споживання (витрату) електричної енергії. Для визначення цих факторів необхідно моделювати складну систему споживання електричної енергії у вигляді рівняння множинної лінійної регресії. Така модель враховує взаємозв'язок між різними факторами і дозволяє оцінити ступінь впливу кожного фактора на вихідну величину - споживання електроенергії.

Загальний вираз для споживання електроенергії може бути записаний наступним чином:

$$E = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \varepsilon$$

де E – споживання електроенергії;

X_1, X_2, X_n – фактори, що впливають на споживання;

$\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_n$ – коефіцієнти регресії;

ε - помилка моделі.

Середній час плавки становить 8 годин.

У таблиці 2.21 представлено фактори які впливають на споживання електроенергії обладнанням системи газоочищення мартенівських печей.

Таблиця 2.21 – Фактори впливу на споживання електроенергії

Експеримент	Фактор x_1	Фактор x_2	Фактор x_3	Фактор x_4	Споживання W , кВт·год
1	10187,14	139065	29046,17	35	3904,44
2	8212,18	139065	29046,17	35	3832,814
3	8212,18	108318	29046,17	35	3761,188
4	8212,18	108318	20763,9	35	3689,562
5	8212,18	108318	20763,9	16	3617,936
6	10187,14	108318	20763,9	16	3689,562
7	10187,14	139065	20763,9	16	3761,188
8	10187,14	139065	29046,17	16	3832,814
9	10187,14	108318	29046,17	16	3761,188
10	8212,18	139065	29046,17	16	3689,562
11	10187,14	108318	20763,9	35	3617,936
12	8212,18	139065	20763,9	35	3689,562

Результати експерименту вказують на взаємозв'язок між розрідженням у борові та споживанням повітря, кисню та природного газу. Зокрема, розрідження у борові впливає на споживання електроенергії вентиляційним обладнанням системи газоочищення. Аналіз цих залежностей дозволяє визначити етапи, на яких можливо знизити потужність на двигунах, що в свою чергу призведе до зменшення споживання електроенергії.

Найменша витрата електроенергії спостерігається при експериментах № 4, 5, 6 та 11. Це вказує на те, що комбінація факторів, що відповідає цим експериментам, є оптимальною для зменшення споживання електроенергії. Ці фактори відповідають певним технологічним етапам плавки, таким як етап підігріву твердих слоїв (прогрівання), етап огляду та завалки. На цих етапах, які не потребують значного розрідження у борові, можливо ефективно зменшити споживання електроенергії електроприводом млинових вентиляторів системи газоочищення мартенівських печей.

З ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ СИСТЕМИ ГАЗООЧИЩЕННЯ ПЕЧЕЙ

Як вже було зазначено, після вдосконалення розглядуваної системи, оператор виконує запуск електродвигуна за допомогою закритого шибера. Після досягнення електродвигуном обертів, оператор вручну відкриває шиберну заслінку. Протягом процесу плавлення оператор регулює заслінку вручну, спостерігаючи за показниками витрати повітря та розрядження у борові на приладах. Регулювання здійснюється в залежності від етапу плавки, і кількість регулювань залежить від характеру навантаження. Необхідність забезпечення узгодженості між інформаційними каналами керування і стану виконавчих механізмів призводить до ускладнення вирішення питань підвищення ефективності системи [16...18].

У зазначеній схемі, електродвигун постійно працює на повну потужність, оскільки оператор регулює лише заслінку, але не впливає на потужність електродвигуна. Це може призводити до зайвого енергоспоживання, оскільки електродвигун функціонує на повну потужність, навіть коли це не є необхідним.

Для розробки оптимальних систем керування електроприводом важливим є аналіз методів керування і формування структурно-логічних схем оптимального керування виконавчими механізмами та технологічним процесом в цілому. Однак, враховуючи складність систем керування, важливо враховувати взаємозв'язки параметрів різної фізичної природи. Асинхронні електродвигуни широко використовуються у вентиляційних системах, і їх частотне регулювання може призвести до економії електроенергії до 60%. Такі технічні рішення можуть сприяти зниженню витрат електроенергії та покращенню ефективності систем [14, 21, 24].

Як відомо, при підключенні асинхронних двигунів приводу вентилятора «безпосередньо» до електромережі відбувається 5-7 кратний кидок номінального струму [20]. Цей феномен відомий як інерційний кидок і виникає унаслідок різкого збільшення електричного опору обмоток двигуна при його

пуску. Під час пуску асинхронного двигуна струм може бути значно вищим, ніж його номінальний струм, що призводить до кратного збільшення споживаної електроенергії та потужності.

Ці кратні кидки струму мають велике значення для електромережі, оскільки вони можуть викликати падіння напруги в мережі. Падіння напруги може призводити до неправильної роботи інших електричних пристроїв та споживати додаткову електроенергію. Більше того, це може призвести до суттєвого зменшення електромагнітного моменту електродвигунів, що працюють, та впливати на їхню ефективність.

Так, економія електроенергії при використанні частотного регулювання електроприводу вентиляторів може бути пояснена кубічною залежністю між потужністю асинхронного двигуна (АД) і витратою газо-повітряної суміші. Згідно з цим законом, потужність, споживана вентилятором, залежить від куба кутової швидкості ротора асинхронного двигуна.

У зв'язку із цим, частотне регулювання дозволяє плавно змінювати швидкість обертання ротора АД та, відповідно, кутову швидкість. Зменшення швидкості при частковому навантаженні приводить до зменшення витрати електроенергії. Оскільки витрата газо-повітряної суміші пропорційна кубу кутової швидкості, ефект економії стає істотним при зниженні швидкості ротора.

Впровадження регульованих електроприводів вентиляторів демонструє можливість істотного зниження енергоспоживання, як показано на рисунку 3.1. Це дозволяє оптимізувати роботу системи вентиляції в залежності від потреб та умов, що призводить до значної економії електроенергії та покращення ефективності системи.

Враховуючи зростання вартості електроенергії, енергозбереження в системах вентиляції стає актуальною проблемою. Економія електроенергії при використанні частотного регулювання електродвигуна може бути значною. Збереження електроенергії в системах вентиляції може бути досягнуте за рахунок ефективного управління регульованими електроприводами, що спрямоване на оптимізацію потужності та енергоефективності систем.

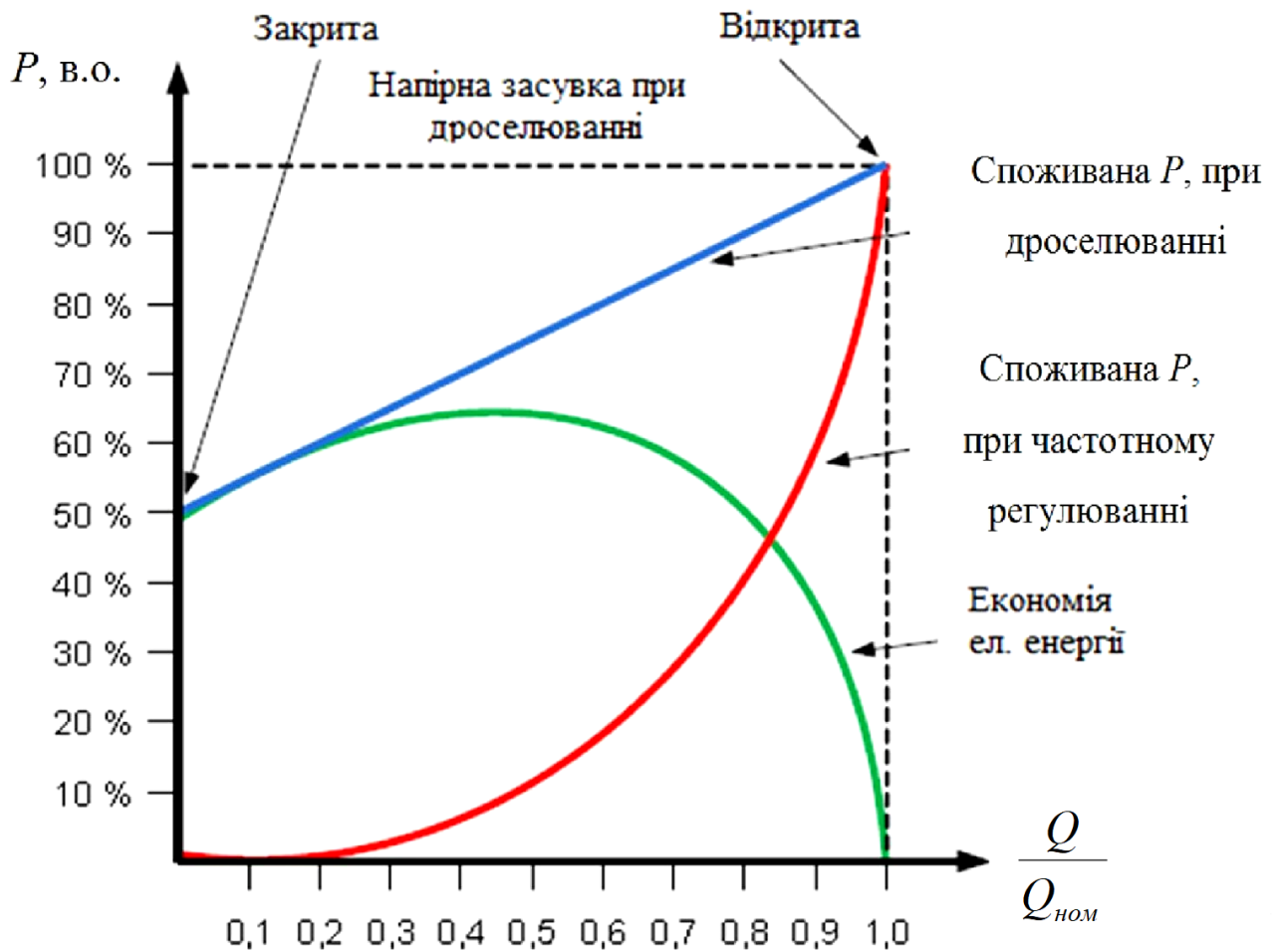


Рисунок 3.1 – Споживання потужності при різних способах регулювання продуктивності вентилятора

Частотне регулювання приводів електродвигунів вентиляторів має кілька важливих переваг, що сприяють оптимізації електропотужності та поліпшенню ефективності систем вентиляції. Зокрема, цей метод обмежує пусковий струм. Частотне регулювання дозволяє пусковий струм залишати на рівні, не вищому за номінальний, що сприяє ефективному пуску систем та уникненню перевантажень мережі.

Застосування частотного регулювання сприяє зменшенню падіння напруги в електричній мережі, що покращує стабільність системи, дозволяє плавно змінювати оберти вентиляторів, що впливає на тиск повітря в системі вентиляції, зменшуючи його за необхідності.

ЧП мінімізує ймовірність хвиль тиску. Зменшення тиску повітря в системі

за допомогою частотного регулювання сприяє зниженню ймовірності виникнення хвиль тиску, що може бути шкідливим для обладнання.

Також ЧП знижує собівартість електроенергії. Ефективне управління електроприводами через частотне регулювання призводить до зниження собівартості електроенергії, що є важливим фактором економії ресурсів.

За допомогою ЧП відбувається оптимізація роботи технологічного процесу. Використання регульованих електроприводів дозволяє створити спеціалізовані системи керування технологічним процесом, що допомагає підтримувати оптимальні параметри в залежності від умов та потреб.

Використання регуляторів технологічного параметра. Наявність регулятора технологічного параметра в перетворювачах частоти дозволяє автоматично керувати системою за допомогою датчиків, що сприяє ефективному регулюванню параметрів в залежності від умов.

Такий підхід до керування системами вентиляції за допомогою частотного регулювання дозволяє досягти великої економії електроенергії та підвищити загальну продуктивність систем вентиляції.

3.1 Керування асинхронними приводами

3.1.1 Асинхронний електропривод із скалярним керуванням.

Характеристики методу. У цьому випадку робота асинхронного двигуна розглядається в статорній системі координат, де всі змінні описуються гармонійними функціями

Максимальний діапазон регулювання досягає 10:1, що вказує на здатність змінювати швидкість ротора в широкому діапазоні.

Стабільність перевантажувальної здатності. Метод забезпечує сталість перевантажувальної здатності електроприводу незалежно від частоти і напруги.

Особливості скалярного керування:

- зниження моменту при низьких частотах: При частотах менше 0,1 від номінальної спостерігається зниження моменту асинхронного двигуна.

До переваг даного методу відноситься стабільність перевантажувальної

здатності. Скалярне керування забезпечує сталість перевантажувальної здатності, що важливо для систем вентиляції, де можуть виникати різні умови експлуатації.

До недоліків методу скалярного керування можна:

- 1) складно одночасно регулювати дві координати (момент і кутову швидкість), через що виникають труднощі при виборі параметра, який є найбільш важливим для даного технологічного процесу;
- 2) відсутність датчика швидкості на валу асинхронного двигуна не дає можливості регулювати кутову швидкість валу, оскільки вона залежить від величини і характеру навантаження, а похибка регулювання швидкості визначається ковзанням АД, яке для АД до 1000 кВт може досягати 6%, при цьому знижується витрата і ККД насоса, установка датчика швидкості частково вирішує цю проблему, але при цьому не можна регулювати момент на валу двигуна, однак варто зауважити, що більшість АД насосів не були призначені для регулювання швидкості і не мають конструктивної можливості для установки датчика швидкості.

Скалярне керування є ефективним методом для асинхронних електродвигунів у вентиляційних системах, забезпечуючи сталість перевантажувальної здатності. Даний метод може бути особливо корисним в умовах, де необхідна стабільність роботи системи вентиляції при різних частотах і умовах навантаження.

Враховуючи високу вартість імпортованих пристроїв, виробництво вітчизняних пристроїв, таких як ПЧ, може бути важливим напрямком для розвитку, сприяючи доступності і технічній самодостатності в галузі вентиляційних систем.

3.1.2 Асинхронний електропривод з векторним керуванням (ВК)

Іншим напрямком розвитку керування асинхронним двигуном став електропривод з векторним керуванням [22, 25]. У цьому випадку робота

асинхронного двигуна розглядається в системі координат, що пов'язана з вектором потокозчеплення ротора. Тому даний метод керування отримав назву векторного керування.

В даній системі координат всі змінні змінюються так, як це відбувається у відповідних змінних постійного струму з незалежним збудженням. Це створило можливість розробки системи керування, аналогічної системам електродвигунів постійного струму з незалежним збудженням. Графіки механічних характеристик асинхронного двигуна (АД), вентилятора і векторного керування подано на рисунку 3.1.



Рисунок 3.1 – Механічні характеристики вентилятора і АД

Основні особливості векторного керування.

Система координат. Робота асинхронного двигуна (АД) розглядається в системі координат, пов'язаній з вектором потокозчеплення ротора. Ця система координат є ключовою для векторного керування.

Аналогія з ДПС НЗ. У векторному керуванні змінні в системі координат змінюються аналогічно відповідним змінним двигунів постійного струму з незалежним збудженням (ДПС НЗ).

Будова системи керування. Система керування будується аналогічно системам ДПС НЗ. Це дозволяє використовувати принципи та методи керування, розроблені для двигунів постійного струму.

Тобто, векторне керування асинхронним електродвигуном у

вентиляційних системах є перспективним напрямком розвитку. Воно дозволяє використовувати принципи, аналогічні тим, які використовуються для двигунів постійного струму з незалежним збудженням, забезпечуючи високу ефективність та точність керування.

На сьогоднішній день існують два основних типи систем векторного керування: система бездатчикового векторного керування (без використання датчика кутової швидкості на валу двигуна) і система із зворотнім зв'язком за швидкістю.

Вибір між цими типами векторного керування визначається, в першу чергу, характеристиками виконавчого механізму. Бездатчикове векторне керування застосовується, коли необхідно змінювати швидкість в невеликих діапазонах (не більше 100:1) і вимоги до точності не перевищують $\pm 0,5\%$. У випадку потреби у широких межах зміни швидкості валу (більше 10000:1) і вимог до точності підтримки кутової швидкості (до $\pm 0,02\%$ при частотах менше 1 Гц), застосовується векторне керування із зворотнім зв'язком за швидкістю. При необхідності позиціонування валу при регулюванні моменту на валу двигуна на дуже низьких частотах використовують методи векторного керування зі зворотнім зв'язком за швидкістю.

Переваги використання векторного керування включають високу точність регулювання швидкості, навіть при відсутності датчика швидкості; плавні обертання електродвигуна в області малих частот; можливість забезпечення номінального моменту на валу при нульовій швидкості (при наявності датчика швидкості); та швидка реакція на зміну навантаження без стрибків швидкості. Недоліки включають необхідність знання значного обсягу параметрів двигуна та велику обчислювальну складність.

3.2 Використання векторного керування в електроприводах вентиляторів системи газоочищення

Застосування векторного керування в системах газоочищення дозволяє

отримати ряд переваг:

- можливість забезпечення номінального моменту на валу при початковій швидкості нуль;
- висока точність регулювання швидкості при відсутності датчика швидкості, що дозволяє підтримувати оптимальну витрату і вищий коефіцієнт корисної дії (ККД);
- підтримка високого ККД двигуна через роздільне керування намагнічувальною та моментною складовими струму статора. Це дозволяє мінімізувати втрати на нагрів і намагнічування, знижуючи реактивну складову струму статора при зменшенні навантаження;
- швидке керування при виникненні непередбачуваних різких стрибків тиску в системі;
- швидка реакція на зміну навантаження, уникання стрибків швидкості при різких змінах навантаження;
- формування траєкторії швидкості при гальмуванні до нульового значення з підтриманням відповідного моменту, що унеможливорює різкі зміни витрати газо-повітряної суміші;
- можливість незалежного і практично безінерційного регулювання двох координат одночасно – моменту і швидкості;
- плавне, майже без ривків, обертання валу двигуна в області малих частот (при пуску і гальмуванні) за визначеною траєкторією, що усуває резонанси в системі;
- економія електроенергії та можливість регулювання тиску в системі навіть без регулятора тиску.

Векторне керування дозволяє розглядати модель асинхронного двигуна (АД) як модель двигуна постійного струму, застосовуючи перетворення змінних зі стаціонарної системи координат у обертову, яка пов'язана з вектором потокозчеплення. Однак для досягнення якісного векторного управління необхідна точна інформація про кутову швидкість в цій системі координат, яка є кутовою швидкістю вектора потокозчеплення. Ця величина враховується при

обчисленні кутової швидкості ротора при бездатчиковому керуванні.

Для векторного керування асинхронним двигуном необхідно також знання його параметрів. Основними параметрами є індуктивності статора і ротора, взаємна індуктивність, активні опори статора і ротора, а також приведений момент інерції ротора. Зазначені опори можуть змінюватися в залежності від температур статора і ротора, що може значно впливати на характеристики системи керування та загальну працездатність. У зв'язку з цим важливо провести ідентифікацію цих параметрів і компенсувати вплив їх невизначеності.

Оскільки активний опір ротора визначається виразом [26]:

$$R_r = -\frac{1}{2} \cdot \frac{\frac{d}{dt} |\psi|^2}{i_r^T \cdot \psi},$$

то для його оцінки в реальному часі необхідна зміна модуля вектора потокозчеплення ротора ψ . З цією метою в намагнічуючу складову струму статора інжектується низькочастотну синусоїдальну складову з малою амплітудою

$$i_d = i_{d0} + i_{d\vartheta},$$

де $i_{d0} < 0$, $i_{d\vartheta}$ - постійна та інжектована складові статорного струму відповідно, причому $i_{d0} \gg i_{d\vartheta}$.

Відповідно, в потокозчепленні з'являється змінна гармонійна складова, яка бере участь в ідентифікації

$$\psi_d = \psi_{d0} + \psi_{d\vartheta},$$

де $\psi_{d0} = L_m i_{d0}$, $\psi_{d\vartheta}$ - постійна та змінна складові потокозчеплення ротора відповідно, причому $|\psi_{d0}| \gg |\psi_{d\vartheta}|$.

Інжектована складова струму намагнічування задається виразом

$$i_{d\vartheta} = I_{inj} \sin(\omega_{inj} t),$$

Для запобігання коливань необхідно, щоб виконувалась умова:

$$(i_{d0} + i_{d\vartheta}) \cdot (i_{q0} + i_{q\vartheta}) = i_{d0} + i_{q0},$$

де $i_{d\vartheta}, i_{q\vartheta}$ – гармонійні складові струмів i_d, i_q .

Блокова структура спрощує синтез і налагодження алгоритмів керування, а також дозволяє зменшити обсяг обчислень за рахунок можливості призначення свого такту рахування в кожному блоці.

Моделювання блоків в діапазоні середніх і високих частот підтвердило стійку роботу і відтворення інжектваної складової. На низьких швидкостях їх роботу можна визнати задовільною. Задовільним відтворенням інжектваної складової на нульовій швидкості відрізняються блоки 1-3. На нульовій швидкості блок 4 показав найкращий результат серед порівнюваних блоків. Основуючись на результаті моделювання, можна провести аналіз і вибір блоків, які точно відтворюють інжектовану складову у всьому діапазоні швидкостей, включаючи нульову [27].

Для живлення асинхронного двигуна в сучасних умовах використовують інвертори напруги з широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ). Вихідні напруги інверторів з ШІМ представляють собою послідовність прямокутних імпульсів малої тривалості. Для виділення основних гармонік вихідної напруги, які використовуються в системі керування, необхідно застосовувати блоки фільтрації.

Розглянемо блоки, спрямовані на усунення постійної складової з вимірюваних сигналів, а також програмну корекцію для компенсації спотворень, які виникають в результаті фільтрації силової частини асинхронного електроприводу (АЕП). Розробка попереджувального компенсатора спотворень статорної напруги важлива для зменшення впливу спотворень, що вносяться

силовими фільтрами.

На виході інвертора з ШІМ іноді встановлюють фільтри перетворення струму (ПСФ), що поліпшує гармонійний склад струму і напруги, зменшує акустичний шум та попереджає ефект старіння ізоляції. Проте, пасивні фільтри можуть спотворювати головні гармоніки вихідної напруги і струмів, що призводить до погіршення динаміки електроприводу. Для відновлення динаміки приводу можна використовувати алгоритмічно простий попереджувальний компенсатор (УК) з введенням перехресних зв'язків.

На рисунку 3.2 показана функціональна схема автономного інвертора з силовим фільтром.

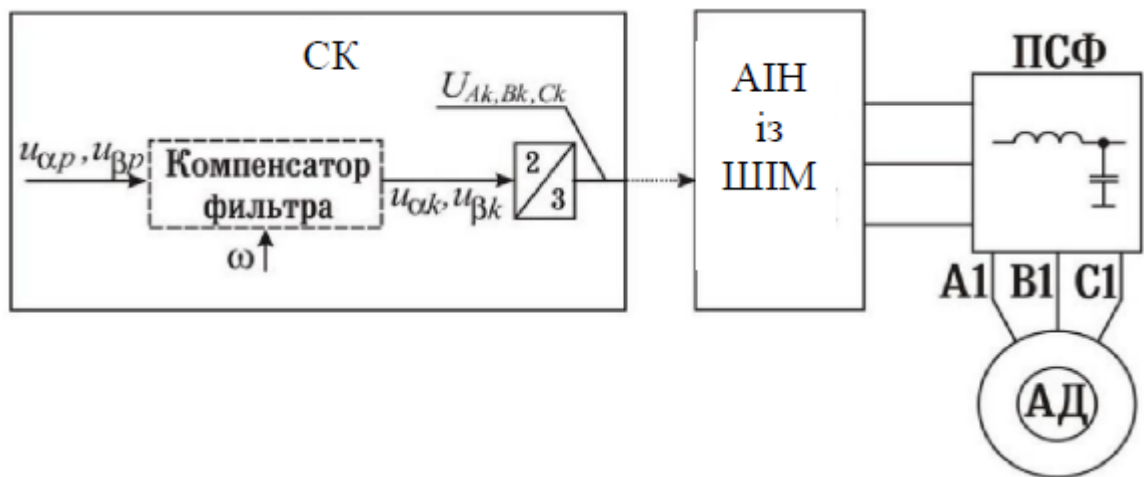


Рисунок 3.2 – Функціональна схема кола компенсації викривлень, що вносяться пасивним силовим фільтром:

СК – система керування автономним інвертором з ШІМ (АІН з ШІМ);

ПСФ – пасивний силовий LC-фільтр; АД – двигун змінного струму;

$u_{\alpha p}, u_{\beta p}$ – керуючі (програмні) сигнали системи керування АІН;

$u_{\alpha k}, u_{\beta k}$ – програмні сигнали з урахуванням компенсації;

u_{Ak}, u_{Bk}, u_{Ck} – фазні керуючі сигнали

На рисунку 3.3 представлена функціональна схема підключення пасивного силового фільтра.

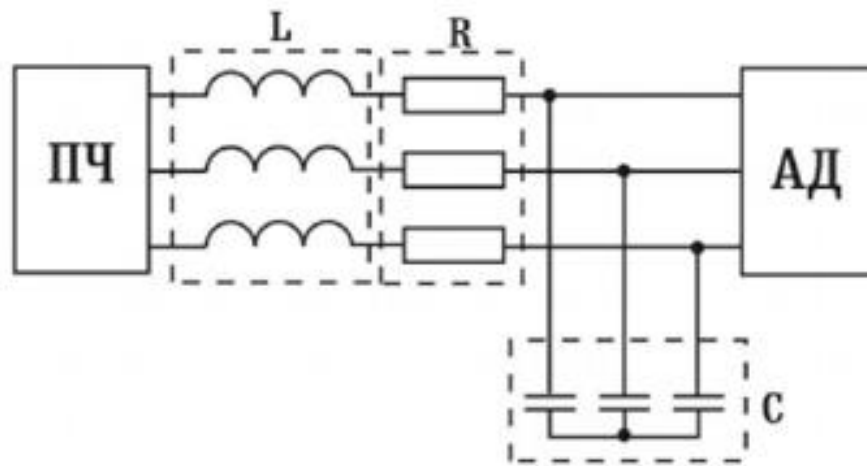


Рисунок 3.3 – Функціональна схема підключення пасивного силового фільтра

Вибір параметрів фільтрів перетворення струму (ПСФ) проводиться так, щоб усунути високочастотні перешкоди на їх виходах, спричинені широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ). Оскільки ці параметри визначаються умовою усунення високочастотних спотворень, вони вважаються відомими. З урахуванням параметрів навантаження можна вважати відомими також спотворення напруги на виходах ПСФ. Основне завдання полягає в тому, щоб упереджувально змінити програмні сигнали по амплітуді і фазі так, щоб вони компенсували спотворення, які вносяться ПСФ. Коефіцієнт передачі системи упереджувачого компенсатора (УК) до ПСФ повинен дорівнювати одиниці. Це досягається за рахунок введення перехресних зв'язків між фазами багатозначних сигналів, що зручно робити з двофазними сигналами.

Отже, під час дослідження блоків системи векторного керування асинхронним приводом з використанням інжекції для ідентифікації постійної часу ротора встановлено таке:

- помилка оцінки кутової швидкості ротора у всіх режимах роботи без навантаження не перевищує 0,02 рад/с, а на низьких швидкостях при номінальному навантаженні практично відсутня;
- подвійна амплітуда пульсацій кутової швидкості ротора, викликана інжекцією на холостому ході, становить 0,014 рад/с, а при номінальному навантаженні - 0,05 рад/с;

- нижня межа швидкості для даного двигуна складає 0,02 рад/с, що визначає теоретичний діапазон регулювання від 1 до 7500;
- пульсації на нижчій межі кутової швидкості становлять 35%, а на вищій межі - не більше 0,5 %;
- помилки визначення вектора потокозчеплення, синхронної швидкості, постійної часу ротора та інших параметрів в сталому режимі практично відсутні;
- компенсатори спотворень фільтрів вимірюваних сигналів повністю компенсують спотворення кривих головних гармонік струму і напруги, зміни амплітуди і фази, що вносяться фільтрами.

Завдяки підвищенню точності та розширенню діапазону працездатності розроблених блоків для оцінки вектора потокозчеплення, синхронної швидкості та кутової швидкості ротора з урахуванням зміни постійної часу ротора, а також застосування цих блоків у векторному керуванні, вдалося досягти підвищення точності управління та розширення діапазону регулювання швидкості.

У певних умовах, використовуючи розроблену систему векторного керування, можна обійтися без встановлення датчика швидкості ротора аж до діапазону 7500:1. Це дозволяє розширити застосування асинхронного приводу, особливо в тих випадках, коли конструктивно складно встановити датчик швидкості, і уникнути додаткових витрат на його придбання та експлуатацію.

Використання частотного регулювання також має свої позитивні аспекти:

- можливість скорочення часу простою двигунів СГОМП під час проведення балансування через плавний пуск та розгін двигуна;
- можливість регулювання потужності двигуна в ситуаціях, коли не потрібно високого розрідження системи газоочищення.

Такі підходи використання технологій дозволяють оптимізувати роботу приводу, зменшити витрати та поліпшити ефективність системи.

3.3 Техніко-економічне обґрунтування запропонованих заходів

Економічна ефективність проектів розглядається на різних етапах планування, і для її оцінки використовуються різні методи. Основні етапи та методи включають:

Етап технічного аналізу та фінансування проекту.

На цьому етапі, коли ще не всі умови підприємницької діяльності відомі, застосовується спрощений частковий аналіз. Важливо провести технічний аналіз та розглянути питання фінансування проекту.

Вирішальна стадія оцінки.

На цьому етапі розглядається проект у цілому, враховуючи результати часткового аналізу. Приймається рішення щодо впровадження або відхилення від проектного рішення.

Глобальні моделі.

Глобальні моделі враховують всі умови фінансової сфери та дозволяють розглядати проект у комплексі. Вони використовуються на різних етапах, враховуючи всі аспекти підприємницької діяльності.

Показники для оцінки ефективності проектів.

Сума інвестицій (капітальні вкладення): Вартість початкових грошових вкладень у проект. Річний економічний ефект: Оцінка річного ефекту, який приносить проект. Річний економічний ефект у грошовому вираженні: Переведення річного ефекту в грошовий еквівалент.

Капітальні вкладення.

Капітальні вкладення представляють вартість початкових грошових вкладень у проект. Вони мають довгостроковий характер та пов'язані з будівництвом та запуском проекту.

Ефективність проекту характеризується системою показників, які враховують витрати та вигоди. Важливо правильно визначити обсяг початкових витрат (капітальних вкладень), оскільки це є ключовим елементом для оцінки ефективності та окупності проекту.

Для розрахунку середнього споживання електроенергії за 1 плавку електроприводом системи газоочищення мартенівських печей, потрібно знати кількість годин, протягом яких відбувається одна плавка на кожній з печей, а також величину споживаної електроенергії за цей час.

На кожній з печей (№ 1, 2, 5, 7, 8 та 10) плавка виконується протягом 8 годин, і кількість плавки на добу дорівнює 3. За цими умовами можна визначити загальний час, протягом якого працює кожна піч, на добу:

$$W_{i \text{ нл.}} = W_{\text{ГОМПи}} / N_n$$

де $W_{\text{ГОМПи}}$ – споживання електроенергії за добу електроприводом i -ї системи газоочищення;

N_i – кількість плавки на добу в i -й мартенівській печі.

$$W_{\text{ГОМПи 1A}} = 14973 \div 3 = 4991 \text{ кВт}\cdot\text{год.}$$

Для інших електроприводів розрахунок виконуємо аналогічно і результати зводимо до таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Споживання електроенергії електроприводом за 1 плавку

Електропривод системи газоочищення	Електроспоживання, кВт·год	Електропривод системи газоочищення	Електроспоживання, кВт·год
ГОМП 1А	4875,8	ГОМП 7А	4160,5
ГОМП 1Б	4001,3	ГОМП 7Б	3556,8
ГОМП 2А	3986,6	ГОМП 8А	3403,1
ГОМП 2Б	3305	ГОМП 8Б	2804,6
ГОМП 5А	3309,8	ГОМП 10А	4846,6
ГОМП 5Б	4801,5	ГОМП 10Б	3968,3

Як відзначалося раніше, у технології мартенівського процесу плавки є два процеси, де не потрібна висока розрідженість у системі: це період у який виконується огляд та завантаження печі та у період твердої плавки. У сумі ці періоди становлять близько 3 годин. і у ці технологічні періоди можна знизити продуктивність пневмосистем, тобто обсяги споживання електроенергії електроприводом млинових вентиляторів (приблизно до 70 %).

Визначаємо споживання електроенергії за 2 процеси, які за часом становлять 37,5 % від загального циклу, коли не потрібне високе розрідження в системі:

$$W_{\text{проц}} = W_i \cdot 0.375 \cdot 0,7$$

$$W_{\text{проц ГОМП 1А}} = 4857,9 \cdot 0.375 \cdot 0,7 = 1280 \text{ кВт}\cdot\text{год.}$$

У таблиці 3.2 представлено споживання електроенергії системою газоочищення за 2 періоди плавки коли не потрібно велике розрядження у системі.

Таблиця 3.2 – Споживання електроенергії за 2 процеси

Електропривод системи газоочищення	Електроспоживання, кВт·год	Електропривод системи газоочищення	Електроспоживання, кВт·год
ГОМП 1А	1280	ГОМП 7А	1092,13
ГОМП 1Б	1050,34	ГОМП 7Б	933,66
ГОМП 2А	1046,48	ГОМП 8А	893,31
ГОМП 2Б	867,56	ГОМП 8Б	736,2
ГОМП 5А	868,82	ГОМП 10А	1265,14
ГОМП 5Б	1260,39	ГОМП 10Б	1572,6

Визначаємо обсяги зменшення споживання (економія) електроенергії:

$$\Delta W_i = 3 \cdot (W_{\text{ГОМП}i} - (W_{\text{ГОМП}i} \cdot 0,625 + W_{\text{проц ГОМП}i})),$$

У таблиці 3.3 представлено обсяги зменшення споживання електроенергії системою газоочищення за добу при використанні регульованого електроприводу.

Визначаємо сумарну економію електроенергії системами газоочищення за одну добу:

$$\Delta W_{\Sigma} = \Sigma \Delta W_i,$$

$$\Delta W_{\Sigma} = 40000,42 \text{ кВт год}$$

Визначаємо економію електроенергії системами газоочищення за рік:

$$\Delta W_{рік} = \Delta W_{\Sigma} \cdot 300,$$

$$\Delta W_{рік} = 40000,42 \cdot 300 = 12000126 \text{ кВт год} = 12 \text{ ГВт год.}$$

Таблиця 3.3 – Обсяги зменшення споживання (економія) електроенергії системою газоочищення за добу

Електропривод системи газоочищення	Електроспоживання, кВт·год	Електропривод системи газоочищення	Електроспоживання, кВт·год
ГОМП 1А	4213,63	ГОМП 7А	3592,17
ГОМП 1Б	3518,27	ГОМП 7Б	2963,52
ГОМП 2А	3498,35	ГОМП 8А	2949,32
ГОМП 2Б	2916,77	ГОМП 8Б	2413,26
ГОМП 5А	2805,65	ГОМП 10А	4127,78
ГОМП 5Б	4188,31	ГОМП 10Б	2813,39

Визначаємо економію електроенергії за одну добу у грошовому вираженні:

$$E_{\Delta w} = \Delta W_{\Sigma} \cdot B,$$

де B – тариф на електроенергію.

$$E_{\Delta w} = 40000,42 \cdot 3,65 = 146001,53 \text{ грн.}$$

Визначаємо економію електроенергії системами газоочищення за рік у грошовому вираженні:

$$E_{\Delta w_{рік}} = E_{\Delta w} \cdot 300,$$

$$E_{\Delta w_{рік}} = 146001,53 \cdot 300 = 43800459,9 \text{ грн.} = 43,8 \text{ млн. грн.}$$

На даний час орієнтовна вартість перетворювача частоти на напругу 10 кВ, потужністю 800 кВт становить 2,7 млн. грн. На підприємстві працює 5 систем газоочищення на яких встановлено по два приводних електродвигуна млинових вентиляторів. У зв'язку з цим необхідно 10 перетворювачів частоти.

Встановлення одного перетворювача частоти на 2 двигуни одночасно не є можливим з технологічних причин – при зупинці одного колеса на технічне обслуговування друге повинно працювати, а при груповому частотного регулюванні це не можливо.

Таким чином капіталовкладення на модернізацію електропривода системи газоочищення складають:

$$K = B_{чп} \cdot n + B_m.$$

де $B_{чп}$ – орієнтовна вартість частотного перетворювача;

B_m – орієнтовна вартість монтажу та налаштування частотного електропривода

$$K = 2,7 \cdot 10 + 0,2 \cdot 10 = 29,0 \text{ млн. грн.}$$

Термін окупності інвестицій ($T_{ок}$) – час, за який термін інвестор повертає початкові капіталовкладення. При постійному річному доході термін окупності визначають за виразом: $T_{ок} = K / E_{\Delta W_{рік}}$. Розрахунок $T_{ок}$ показав, що строк окупності складе приблизно 1 рік.

Техніко-економічні показники роботи зводимо до таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Техніко-економічні показники запропонованих заходів

Показники	Значення
Капітальні вкладення на впровадження заходів, млн. грн	29,0
Споживання електричної енергії, ГВт·год	42,7
Споживання електричної енергії після впровадження заходів, ГВт год	32,9
Економія електричної енергії за рік, ГВт·год	12
Економія електричної енергії за рік у грошовому вираженні, млн. грн	43,8
Термін окупності, рік	1

Таким чином, ми можемо побачити, що термін окупності складе приблизно один рік, що є достатньо гарним економічним показником щодо інвестицій в модернізацію.

ВИСНОВКИ

У даній роботі проведено аналіз електроенергетичного устаткування газового комплексу підприємства «Запоріжсталь» і здійснено оцінку ефективності споживання електричної енергії на даному об'єкті. Встановлено, що найбільший обсяг електроенергії використовується електроприводом вентиляторів системи газоочищення мартенівських печей.

Виявлено, що експлуатація електроприводів вентиляторів не ефективна з точки зору енергетичних показників, оскільки електричні двигуни працюють на постійній швидкості із постійним навантаженням. Запропоноване застосування дроселювання для регулювання подачі газоповітряної суміші не вирішує проблеми підвищення енергоефективності електроприводу.

Висловлено пропозицію про впровадження частотного регулювання обертання вентиляторів для більш ефективного впливу на продуктивність системи газоочищення. Це також дозволить знизити енергоспоживання цих електроприводів та очікувати збільшення терміну їх служби.

У роботі обґрунтовано доцільність використання частотно-регульованого електроприводу вентиляторів системи газоочищення з векторним керуванням. Це рішення дозволяє контролювати обертовий момент асинхронних двигунів та регулювати їх швидкість обертання в широкому діапазоні. Це, в свою чергу, забезпечить можливість регулювання подачі газоповітряної суміші.

В якості рекомендації виноситься ініціатива встановлення LC-фільтра з компенсатором на виході перетворювача частоти, що внесе інжектвану складову в намагнічуючу складову струму статора. Це дозволить зменшити втрати в системі «асинхронний двигун – перетворювач частоти». Прогнозується, що така вдосконалена система векторного керування електроприводом вентилятора забезпечить вихідні напруги ПЧ близькі до синусоїдальної форми із коефіцієнтом нелінійних спотворень до 5 %, а також точніше керуватиме кутовою швидкістю.

В цілому, запропоновані заходи мають потенціал зменшити споживання електроенергії в системах газоочищення печей до 25%. Оціночний період окупності складає близько 1 року.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. ПАТ «Запоріжсталь»: Фінансові та виробничі показники. [Електронний ресурс] / Запоріжсталь. – Режим доступу: \WWW/ URL: . <https://zaporizhstal.com/uk/investoram/finansovi-ta-virobnichi-pokazniki/> – 26.10.2019 р. – Загол. з екрану.
2. Презентація для інвесторів, 1 півріччя 2015 року [Електронний ресурс] / Запоріжсталь. – Режим доступу: \WWW/ URL: <https://zaporizhstal.com/uk/investoram/prezentaciyi/> – 04.11.2019 р.– Загол. з екрану.
3. Структура виробництва [Електронний ресурс] / Запоріжсталь. – Режим доступу: \WWW/ URL: <http://www.zaporizhstal.com/ru/predpriyatie/struktura-proizvodstva/> – 14.10.2019 р. – Загол. з екрану.
4. Презентація для інвесторів, 1 квартал 2015 року [Електронний ресурс] / Запоріжсталь. – Режим доступу: \WWW/ URL: <https://zaporizhstal.com/uk/investoram/prezentaciyi/> – 04.11.2019 р. – Загол. з екрану.
5. Чернега, Д. Ф. Проектування і обладнання електросталеплавильних і феросплавних цехів: Підручник / Д. Ф. Чернега, В. С. Богусhevський, Ю. Я. Готвянський та ін. – Дніпропетровськ: Системні технології, 2004. – 692с.
6. Свинолобов, Н. П. Печи черной металлургии [Текст]: Учебное пособие для вузов / Н.П. Свинолобов, В.Л. Бровкин. – Днепропетровск: Пороги, 2004.
7. Чернега, Д. Ф. Основи металургійного виробництва металів і сплавів: Підручник / Д. Ф. Чернега, В. С. Богусhevський, Ю. Я. Готвянський та ін.. – К.: Вища шк., 2006. – 503 с.
8. Смирнов, В. О. Фізичні та хімічні основи виробництва [Текст]: Навчальний посібник / В. О. Смирнов, В. С. Білецький. – Донецьк: Східний видавничий дім, 2005.
9. ДСТУ 2541-94 Виробництво ливарне. Терміни та визначення. Енергозбереження [Електронний ресурс] / Запоріжсталь. – Режим доступу: \WWW/ URL: <http://www.zaporizhstal.com/ru/predpriyatie//razvitie/>

energoberezhnie/ – 14.10.2019 р. – Загол. з екрану.

10. Термічна обробка [Електронний ресурс] / Вікіпедія. – Режим доступу: \WWW/ URL: [https://uk.wikipedia.org/wiki/Термічна обробка](https://uk.wikipedia.org/wiki/Термічна_обробка) – 04.11.2019 р. – Загол. з екрану.

11. Кислий В. М. Організація наукових досліджень [Текст]: навчальний посібник / В. М. Кислий. – Суми : Університетська книга, 2011. – 224 с.

12. Важинський, С.Е. Методика та організація наукових досліджень [Текст]: Навч. посіб. / С. Е. Важинський, Т І. Щербак. – Суми: СумДПУ імені А. С. Макаренка, 2016. – 260 с.

13. Лазарев, Г. Б. Мощные высоковольтные преобразователи частоты для регулируемого электропривода в электроэнергетике [Текст] / Г. Б. Лазарев // Электротехника. – 2005. – № 11. – С. 3–8.

14. Перельмутер, В.М. Прямое управление моментом и током двигателей переменного тока [Текст] / В.М. Перельмутер. – Х.: Основа, 2004. – 210 с.

15. Пересада, С. М. Векторное управление в асинхронном электроприводе: аналитический обзор [Текст] / С. М. Пересада // Вестник Донецкого национального технического университета. – 1999. – С. 1–23.

16. Тітов, Ю. П. Насосні станції водопостачання і водовідведення [Текст] / Ю. П. Тітов, М. М. Яковенко. Навчально-методичний посібник. – Харків, 2004. – 203 с.

17. Попович, Н. Г. Электромеханические системы автоматизации и задача энергосбережения [Текст] / Н. Г. Попович, Н. В. Печник // Вісник ХДПУ. Збірка наукових праць: Тематичний випуск 113. – Харків: ХДПУ, 2000. – С. 297–300.

18. Потапенко, Е. М. Определение скорости и постоянной времени ротора асинхронного двигателя с помощью адаптивного наблюдателя [Текст] / Е. М. Потапенко, Е. Е. Потапенко, А. В. Соломаха // Матеріали 12-ої міжнародної конференції з автоматичного управління —Автоматика–2005, 30 травня – 3 червня 2005 р. – Харків: НТУ —ХПШ, 2005. – Т. 2. – С. 123,124.

19. Бондаренко, В. І. Основи електричного привода [Текст] / В. І. Бондаренко. Навчальний посібник. - Запоріжжя: ЗНТУ, 2003. – 314 с.
20. Правила улаштування електроустановок. Четверте видання, перероблене й доповнене — Х.: Вид-во «Форт», 2011.— 736 с.
21. Blaschke, F. Das Prinzip der Feldorientierung die Grundlage für die TRANSVECTOR – Regelung von Asynchronmaschinen [Текст] / F. Blaschke // SiemensZeitschrift.–1971.– 45.– P.757.
22. Потапенко, Е. М. Синтез инвариантных и адаптивных к изменению сопротивления статора алгоритмов векторного управления асинхронным двигателем [Текст] / Е. М. Потапенко, Е. Е. Потапенко // Проблемы управления и информатики. – 2007. – №2. – С. 16–29.
23. Регулювання роботи насосів [Електронний ресурс] Насоси. Насосні станції. – Режим доступу : \WWW/ URL: <http://bibliograph.com.ua/spravochnik-117-nasos/15.htm> – 10.11.2019 р. – Загол. з екрану.
24. Соломаха, А.В. Формирование системы векторного управления асинхронным приводом с компенсацией неопределенностей [Текст] / А. В. Соломаха // Радіоелектроніка. Інформатика. Управління. – 2008. – №1. – С. 148–153.
25. Потапенко, Е. М. Простая система векторного управления асинхронными двигателями с клеммными измерениями [Текст] / Е. М. Потапенко, Е. Е. Потапенко, А. В. Соломаха // Вісник Національного технічного університету – ХПІІ. Збірник наукових праць – Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика. – Харків: НТУ – ХПІІ. – 2005. – №45. – с.134–136.
26. Salomaki J. Sensorless Control of Induction Motor Drives Equipped With Inverter Output Filter [Текст] / J. Salomaki, M. Hinkkanen, J. Luomi // IEEE Trans. on Ind. Electronics.– 2006.– Vol.53, № 4.– P.1188–1197.
27. Потапенко, Е. Е. Синтез и анализ компенсационных фильтров многофазных неопределенных сигналов [Текст] / Е. Е. Потапенко, Е. М. Потапенко // Вісник Національного технічного університету ХПІ Тематичний

випуск “Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика”. – Харків: НТУ ХПІ, 2003. – Т.2, №10. – С. 342–344.

28. ГКД 34.20.507 «Технічна експлуатація електричних станцій і мереж. Правила» Введ 2003 -К.:Вид. Об'єднання енергетичних підприємств «галузевий резервно-інвестиційний фонд розвитку енергетики» - 597с.

29. «Вимоги до окремих видів пристроїв» ГОСТ 12.2.007.3-75 (2001) «ССБТ. Электротехнические устройства на напряжение свыше 1000 В. Требования безопасности».Протоєрейський, О. І. Запорожець. – К. : НАУ, 2005. – 267с.

30. Покропивный, С. Ф. Экономика предприятия [Текст]: учебник / С.Ф. Покропивный. – К.: КНЭУ, 2003. – 608 с.