

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

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

Електричної інженерії та кіберфізичних систем

(повна назва кафедри)

**Кваліфікаційна робота**

перший (бакалаврський) рівень

(рівень вищої освіти)

на тему Аналіз можливості зменшення споживання електроенергії  
в умовах ПАТ «Запоріжсталь»

Виконав: студент 4 курсу, групи 6.1410-с  
спеціальності 141 Електроенергетика,  
електротехніка та електромеханіка

(код і назва спеціальності)

спеціалізації

(код і назва спеціалізації)

освітньої програми Електроенергетика,  
електротехніка та електромеханіка

Амслін Д.Д.

Керівник ас. Бандуренко І.І.

Консультант проф. Артемчук В.В.

Рецензент проф. Коваленко В.Л.

Запоріжжя

2023 р.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
Інженерний навчально-науковий інститут ім. Потебні Ю.М.

Кафедра Електричної інженерії та кіберфізичних систем  
Рівень вищої освіти перший (бакалаврський) рівень  
Спеціальність 141 – Електроенергетика, електротехніка та  
електромеханіка  
(код та назва)  
Спеціалізація \_\_\_\_\_  
(код та назва)  
Освітня програма Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри

д.т.н., доц.



В.Л. Коваленко

“ 12 ” червня 2023 року

**ЗАВДАННЯ**

на кваліфікаційну роботу студенту

Амеліну Денису Дмитровичу

**1. Тема роботи:** Аналіз можливості зменшення споживання електроенергії в умовах ПАТ «Запоріжсталь»

**Керівник роботи:** ас. Бандуренко І.І., конс. проф. Артемчук В.В.

затверджені наказом ЗНУ від « 29 » грудня 2022 року № 1893 - с

**2. Строк подання студентом роботи:** 10 червня 2023 року

**3. Вихідні дані до роботи:** Поточний тариф за споживання електроенергії; напруга живлення 10 кВ; час роботи електродвигунів на рік 7200 год.; потужність електродвигунів приводу вентиляторів 630 та 800 кВт.

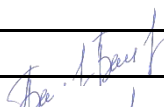

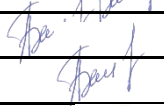

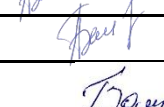

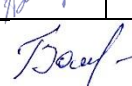
**4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які рекомендовано розробити):**

Вступ; Загальні відомості про підприємство ПАТ «Запоріжсталь»; Аналіз споживання електричної енергії обладнанням заводу; Розробка заходів зі зменшення електричних втрат вентиляторів

### 5. Перелік графічного матеріалу (рекомендовано):

Аналіз споживання електроенергії підприємством; аналіз споживання енергоресурсів обладнанням газового господарства; схеми підключення електроприводів для керування вентиляторами

### 6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Розділ 1	Бандуренко І.І, асистент		
Розділ 2	Бандуренко І.І, асистент		
Розділ 3	Бандуренко І.І, асистент		
Нормоконтроль	Башлій В.С., доцент		

7. Дата видачі завдання 30.12.2022

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз виробничо-господарської діяльності ПАТ «Запоріжсталь»	01.04.23	
2	Аналіз споживання електроенергії в системі газоочищення печей	01.05.23	
3	Розробка заходів підвищення енергоефективності електроприводів системи газоочищення печей	01.06.23	

Студент



(підпис)

Амелін Д.Д.

(прізвище та ініціали)

Керівник/консультант роботи



(підпис)

Бандуренко І.І.

(прізвище та ініціали)

Нормоконтролер



(підпис)

Башлій В.С.

(прізвище та ініціали)

## РЕФЕРАТ

Дипломна робота Амеліна Д.Д. Аналіз можливості зменшення споживання електроенергії в умовах ПАТ «Запоріжсталь».

Дипломна робота для здобуття ступеня вищої освіти бакалавра за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, науковий керівник Бандуренко І.І. Запорізький національний університет, Навчально-науковий інженерний інститут ім. Ю.М. Потебні. Кафедра електротехніки та енергоефективності, 2023 рік.

Анотація. У представленій роботі виконано аналіз споживання електричної енергії електроприводом системи газоочищення на підприємстві «Запоріжсталь». Було проведено аналіз споживання електроенергії обладнанням в залежності від технологічних процесів. У роботі розглянуто способи керування електроприводами вентиляторів та шляхи підвищення їх енергоефективності. Проведено моделювання споживання електроенергії обладнанням систем газоочищення та запропоновано удосконалений частотно-регульований електропривод.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** електрична енергія, електропривід, перетворювач, вентиляторна установка, енергоефективність

## ЗМІСТ

Вступ	6
1 Аналіз виробничо-господарської діяльності ПАТ «Запоріжсталь»	8
1.1 Характеристика ПАТ «Запоріжсталь»	8
1.2 Виробничі потужності ПАТ «Запоріжсталь»	9
1.3 Аналіз газового господарства підприємства	13
2 Аналіз споживання електроенергії в системі газоочищення печей	24
2.1 Моделювання споживання електроенергії системою газоочищення вихідних газів печей	44
3 Розробка заходів підвищення енергоефективності електроприводів системи газоочищення печей	51
3.1 Управління асинхронними приводами	53
3.2 Застосування векторного керування електроприводом вентиляторів системи газоочищення	56
3.3 Схема векторного керування асинхронним двигуном	58
3.4 Техніко-економічне обґрунтування запропонованих заходів	64
Висновки	73
Перелік посилань	75
Додатки	76

## ВСТУП

Енергозбереження є однією з важливих складових щодо захисту збереження природи та вирішення екологічних проблем. Серед споживачів електричної енергії значну частку займають електродвигуни різної потужності та призначення, що споживають більше половини виробленої енергії. Це означає, що саме тут необхідно шукати можливості енергозбереження.

На даний час проблемою є те, що більшість електродвигунів працюють у нерегульованому режимі, а значить з низькою ефективністю. Як показують дослідження з цього питання, при експлуатації електропривода коефіцієнт завантаження багатьох машин не перевищує 50%. Як наслідок, робота таких приводів в недовантаженому режимі призводить до значних втрат, не враховуючи зниженого значення коефіцієнта потужності, оскільки загальна встановлена потужність асинхронних двигунів у країні складає близько 40...50 млн кВт.

Відкрите акціонерне товариство металургійний комбінат «Запоріжсталь» – одне з найбільш великих промислових підприємств України. Продукція комбінату добре відома і має попит як у споживачів на внутрішньому ринку так і у багатьох країнах світу. Спеціалізація комбінату - високоякісний сталевий гарячекатаний і холоднокатаний рулон, гарячекатаний і холоднокатаний лист. Споживачами продукції комбінату є підприємства автомобільного, сільськогосподарського, транспортного машинобудування, виробники зварних труб та побутової техніки.

Зазначимо, що у газовому господарстві підприємства витрати на електроенергію є значними і потребують ретельного розгляду. Так, найбільше споживання електроенергії в системах газоочищення спостерігається при виробленні водню, доочистці азоту, змішуванні газу, тощо. Система газоочищення мартенівських печей призначена для очищення димових газів мартенівських печей від плавильного пилу, сірчистого ангідриду та для примусової евакуації димових газів з мартенівських печей. У якості електроприводу вентиляторів на системах

газоочищення встановлені асинхронні електродвигуни потужністю 630 та 800 кВт. У свою чергу, привід вентиляторів в системах газоочищення здійснюється за рахунок використання асинхронних двигунів. При цьому, переважна їх більшість застосовуються в нерегульованому приводі, що пояснюється складними нелінійними електромагнітними процесами в таких двигунах, і як наслідок, такі електроприводи мають низькі експлуатаційні показники. Застосування керованого електроприводу дозволяє заощадити до 40...60 % електроенергії та інші важливі експлуатаційні показники.

Таким чином, енергозбереження один з пріоритетних напрямів економіко-технічної політики ПрАТ «Запоріжсталь». Воно необхідно бо в країні є проблеми з ускладненнями добутку та підвищенням вартості основних енергоресурсів.

## 1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ПІДПРИЄМСТВО

### ПрАТ «ЗАПОРІЖСТАЛЬ»

#### 1.1 Характеристика ПрАТ «Запоріжсталь»

Приватне акціонерне товариство металургійний комбінат «Запоріжсталь» – одне з найбільш великих промислових підприємств України.

Продукція комбінату добре відома і має попит як у споживачів на внутрішньому ринку так і у багатьох країнах світу. Спеціалізація комбінату – високоякісний сталевий гарячекатаний і холоднокатаний рулон, гарячекатаний і холоднокатаний лист завтовшки 0,5...8,0 мм з вуглецевих, низьколегованих, легованих і неіржавіючих сталей, а також сталева стрічка і жерсть.

Комбінат займає стійке положення на ринку, рок за роком просуваючись вгору у списку крупніших виробників сталі. Основні зусилля спеціалістів ПАТ «Запоріжсталь» направлені на освоєння нових ринків та видів продукції, закріплення позитивного іміджу підприємства. Продукція комбінату добре відома більш ніж в 50 країнах світу (Туреччина, Італія, Польща, Росія, Сирія, Ізраїль, Болгарія, Ефіопія, Нігерія та інші), а стратегічним напрямом збутової політики комбінату залишається український ринок. Основою успіху є дотримання та постійне вдосконалення технологічних процесів, висока якість продукції, чітке виконання договірних зобов'язань та орієнтація на потреби ринку. Для підвищення конкурентоспроможності своєї продукції на світових ринках металу, ПАТ «Запоріжсталь» в 2015 році освоїв виробництво сталі з більш високим гарантованим вмістом алюмінію. Нова продукція за своїми технічними характеристиками відповідає вимогам європейського стандарту EN 10025-1: 200. Нова марка стали має попит у європейських виробників трубної продукції, так як підвищує міцність і довговічність оцинкованих труб. Серед споживачів ключовий клієнт комбінату – світова компанія Marcegaglia (Італія).



Споживачами продукції комбінату є підприємства автомобільного, сільськогосподарського, транспортного машинобудування, виробники зварних труб та побутової техніки.

Комбінат «Запоріжсталь» складається з 8 основних та 56 допоміжних цехів, в яких працюють приблизно 11 тис. чоловік.

Щорічно підприємство виробляє більш ніж 3,1 млн т чавуну, 3,8 млн т сталі та 3,1 млн т прокату. Загальна виробнича потужність по виробництву листової сталі – 3,5 млн. т. в рік і 600 тис. т холодногнутих профілів. Показники комбінату у 2019 році 3807,8 тис. т чавуну, 3979,5 тис. т сталі і 3354,0 тис. т прокату.

До складу металургійного виробництва входять 4 основних цеха – агломераційний, доменний, мартенівський та цех підготовки сталерозливних складів. Прокатне виробництво має в своєму складі 4 прокатних цеха – обтискний, цех гарячої прокатки тонкого листа, цех холодного прокатки № 1, цех холодного прокатки № 3, які необхідні для виробництва гарячекатаної та холоднокатаної листової сталі, сталевий стрічки, білої жерсті та холодногнутих профілів.

Впродовж останніх років керівництво ПАТ «Запоріжсталь» послідовно здійснює комплекс заходів, націлених на підвищення ефективності виробництва, продуктивності праці та енергоефективності.

## 1.2 Виробничі потужності ПАТ «Запоріжсталь»

Основу структури виробництва продукції на ПАТ «Запоріжсталь» складають:

- 1) агломераційний цех (6 агломашин);
- 2) доменний цех (4 доменні печі);
- 3) мартенівський цех (7 мартенівських печей і 1 двохванний сталеплавильний агрегат);
- 4) цех підготовки складів;

- 5) ливарний цех;
- 6) обтискний цех;
- 7) цех гарячої прокатки тонкого листа;
- 8) цех холодної прокатки № 1;
- 9) цех холодної прокатки № 3.

В агломераційному цеху комбінату виробляється основний залізорудний агломерат. Практично всі процеси виробництва агломерату автоматизовані.

Доменне виробництво щорічно виплавляє близько 3,5 млн. т чавуну/рік. Відмінною особливістю чавуну виробництва металургійного комбінату «Запоріжсталь» є низький вміст у ньому сірки і фосфору.

Виробництво мартенівського цеху становить близько 4,0 млн. т сталі/рік. Мартенівські печі використовують природний газ. Сталь продувається киснем і аргоном. Виплавляється сталь розливається в злитки масою до 18,6 тон, які використовуються для виробництва листового прокату.

Ливарне виробництво є базою для отримання литих заготовок запчастин і змінного металургійного устаткування для цехів комбінату і сторонніх споживачів, до складу якого входить спеціалізоване відділення з виробництва виливниць. Проектна потужність відділення виливниці – 360 тис. т/рік.

Цех гарячої прокатки тонкого листа виробляє гарячекатаний прокат в листах і рулонах товщиною від 2,0 до 8,0 мм. Цех гарячої прокатки тонкого листа оснащений агрегатами для забезпечення постачання прокату в листах і рулонах. Безперервний тонколистовий стан «1680» максимальної виробничою потужністю 3,7 млн т. на рік призначений для виробництва гарячекатаних смуг завтовшки 1,5...8,0 мм, шириною 860...1500 мм, масою рулону до 16 т. Також цех має свою дільницю обробки та відвантаження з агрегатами для поперечного та поздовжнього різання металу.

На трьох профілів агрегатах відділу гнутого профілю цеху гарячої прокатки тонкого листа виробляється більш ніж 500 типорозмірів холодногнутих профілів з

вуглецевих і низьколегованих марок сталі товщиною від 1,0 до 8,0 мм і з шириною розгортки профілю до 1440 мм.

Цех холодної прокатки №1 виробляє холоднокатаний плоский прокат завтовшки від 0,5 до 2,0 мм, шириною від 850 до 1500 мм в листах завдовжки до 4000 мм і в рулонах масою до 16 т, а також холоднокатану стрічку товщиною від 0,2 до 2,0 мм.

У цеху холодної прокатки №1 на безперервному чотирьохкільтовому стані «1680», двох однокільтових реверсивних станах «1680» і «1200» і двох безперервних вузькосмугових чотирьохкільтових станах, двадцативалковом стані "1700" і двох безперервних вузькосмугових чотирьохкільтових станах «450» і «650» проводиться холоднокатаний прокат з вуглецевої і низьколегваної сталі. Цех оснащений засобами для дресирування, поперечного різання і подовжнього розпуску, що забезпечують постачання холоднокатаного прокату товщиною від 0,2 до 2,0 мм, шириною від 10 до 1500 мм і довжиною листа до 3950 мм, а також рулонів масою до 15 т.

Цех холодної прокатки №3 на стані «2800» 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 цеху є спеціалізоване відділення з виробництва шліфованих і полірованих листів і рулонів. Максимальна виробнича потужність по гарячекатаному прокату – до 3,7 млн. т, по холоднокатаному прокату – 1,1 млн. т, по холодногнутому профілю – до 500 тис. т.

Технологія виробництва продукції та роль кожного з цехів в ній представлені на рисунку 1.1 [1].

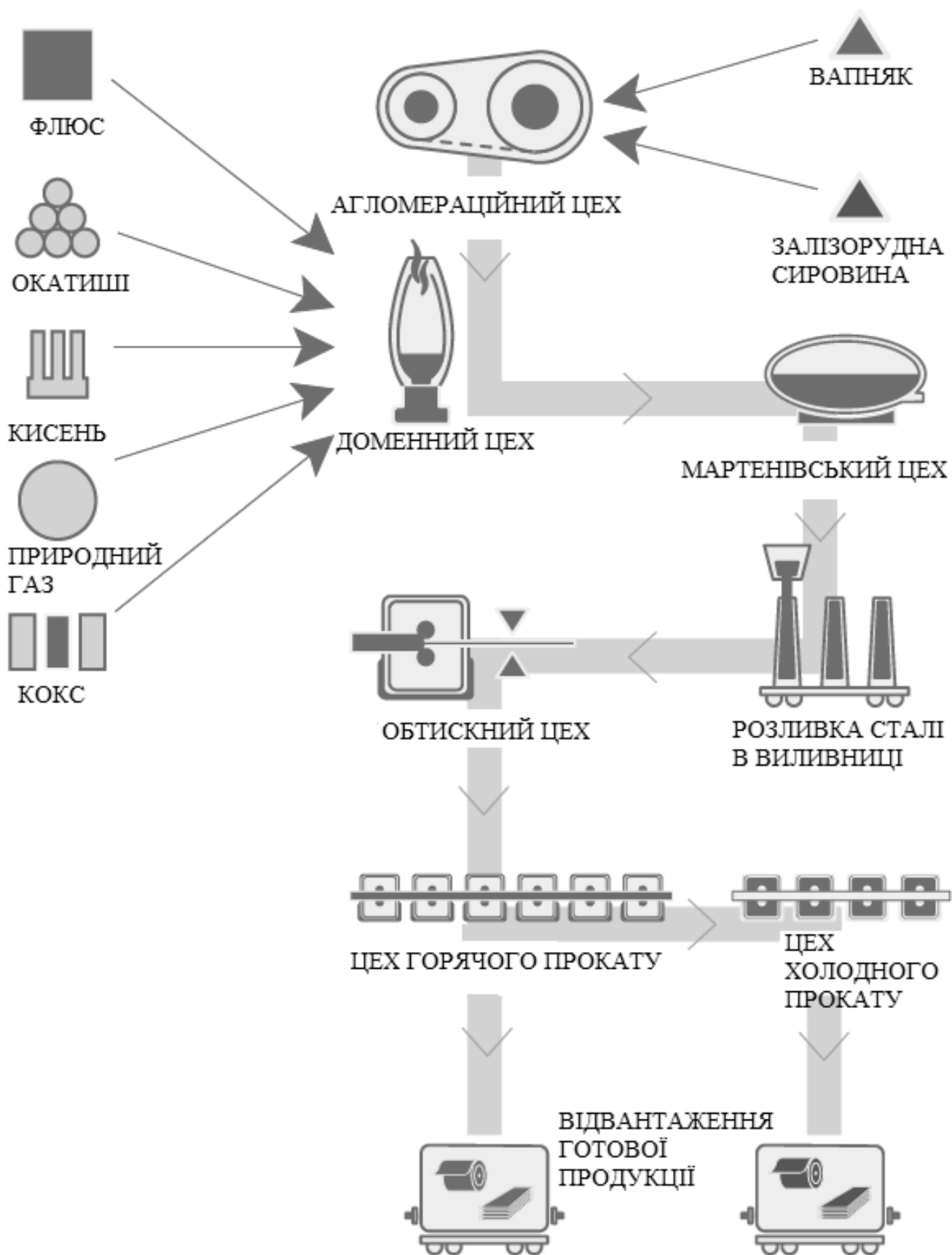


Рисунок 1.1 – Технологія виробництва продукції [1]

### 1.3 Аналіз газового господарства підприємства

Система газоочищення доменної печі (СГО ДП) призначена для очищення та охолодження доменного газу, що відводиться. Доменний газ утворюється під час виплавлення чавуну в доменних печах, є продуктом неповного згорання вуглецю. Теплота згорання доменного газу приблизно  $3,6 \dots 4,6$  МДж/м<sup>3</sup>. При збагаченні дуття киснем вміст азоту в газі знижується і відповідно цьому зростає кількість інших газів (у тому числі окисли вуглецю і водню), а також теплота згорання [5-8]. Доменний газ, який виникає у доменній печі, забруднений колошниковим пилом, який являє собою суміш малих частинок руди, коксу, агломерату, вапняку та інших матеріалів, що завантажуються у доменну піч. Пил виникає у результаті механічного подрібнення матеріалів при їх виробництві, транспортуванні, завантаженні та стиранні під час руху у шахті печі. Винос пилу з печі обумовлений збільшенням кількості малих частинок з потоком газу, що проходить через пласт шихти, а також підйманням деяких елементів шихти у області високих температур доменного газу [5, 6]. Доменний газ потребує очищення до концентрації (вмісту) пилу не вище  $10$  мг/м<sup>3</sup>. З цією метою на комбінаті використовують багатоступінчасте очищення доменного газу, яке зумовлює знепилення доменного газу у чотирьох послідовно з'єднаних апаратах. Схема подачі змішаного газу від змішувально-підвищувальної станції предсталено на рисунку 1.2 [5].

Окрім зазначеного вище, СГО МП призначена для очищення димових газів мартенівських печей від плавильного пилу, сірчистого ангідриду та для примусової евакуації димових газів з мартенівських печей [6, 8]. Технологічні гази від мартенівської печі з температурою  $600 \dots 700$  °С направляються у боров, потім у котел-утилізатор КУ-90М. Далі відхідні гази після котла-утилізатора з температурою  $250 \dots 350$  °С по газоходу «брудного» газу діаметром  $2420$  мм, направляються на турбулентний омивач. Турбулентний омивач складається з

батареї (10 шт.) паралельно працюючих труб Вентурі та двох скрубєрів вологоуловлювачів.

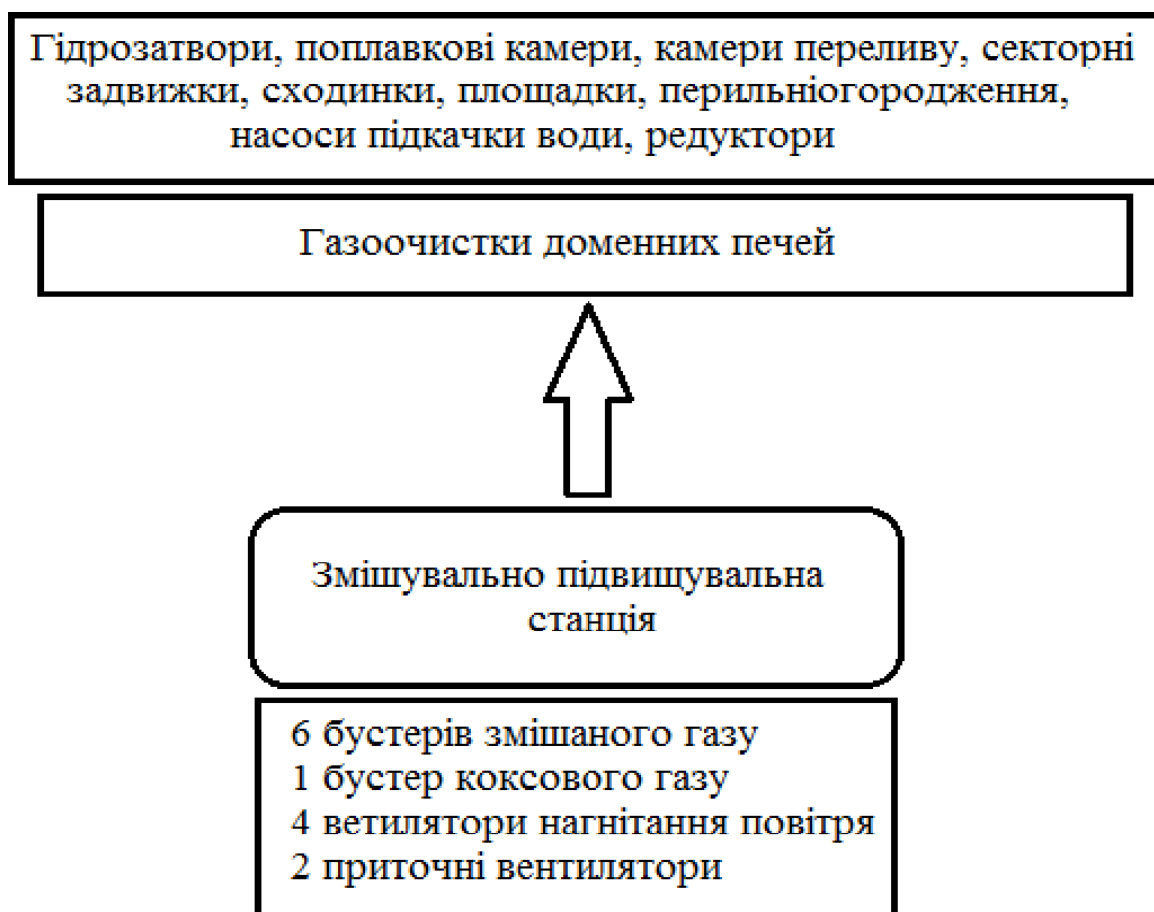


Рисунок 1.2 – Схема змішувально-підвищувальної станції [5]

Збудниками тяги у системі газовідвідного тракту служать два паралельно працюючих млинових вентилятори ВМ 100/1200У (продуктивністю 125000 м<sup>3</sup>/г, колесо ротора 1810 мм, 20 лопаток, електродвигун 630 кВт – 1500 об/хв.) на системі газоочищення мартенівських печей №2, 6, 7, 8 та ВМ 20А (продуктивністю 150000 м<sup>3</sup>/г, колесо ротора 2010 мм, 10 лопаток, електродвигун 800 кВт – 1500 об/хв.) на системі газоочищення мартенівських печей № 1, 5, 10 та 12. Очищені гази (запиленість газів до очищення – 10 г/м<sup>3</sup>, після очищення – до 0,1 г/м<sup>3</sup>) викидаються у атмосферу через димову трубу з діаметром 2900 мм, та висотою 86 м.

Станція виробництва інертних газів призначена для приготування захисного газу з продуктів неповного згорання природного газу з наступним застосуванням захисного газу для безоxygenної термообробки прокату у термічних печах цехів ЦХП-1 та ЦХП-3.

Продуктивність станції [1]:

- при роботі на повітрі до 2200 м<sup>3</sup>/год;
- при роботі на азотоповітряній суміші (АПС з використанням технічного азоту) до 2900 м<sup>3</sup>/год;

Склад захисного газу, що виробляється:

- Н<sub>2</sub> = 5.0-5,2 %;
- О<sub>2</sub> = 0,001 %;
- СО<sub>2</sub> = 0,1 %;
- СО = 0,1%;
- N<sub>2</sub> – інше.

Вологість по температурі точки роси не вище -60 °С. Тиск захисного газу на виході з ЦСЗГ до 1,5 -2,9 кПа чи 1500 – 290 мм вод. ст.

ЦСЗГ включає наступне технологічне обладнання:

- загальностанційну установку повітряних компресорів та холодильників;
- вісім агрегатів «N<sub>2</sub> - 400 ПКН»;
- загальностанційну систему двоконтурного сушіння захисного газу холодом;
- загальностанційну адсорбційну систему сушіння захисного газу;
- загальностанційну систему, виготовлення конденсату та постачання його агрегатам «N<sub>2</sub> - 400 ПКН»;
- систему колекторів енергоносіїв та захисного газу.

Змішувально-підвищувальна станція (рис. 1.3) призначена для збагачення доменного газу та підвищення тиску коксового та змішаного газів, що подається користувачам. Підвищення тиску газу створюється нагнітачами [1, 6]:

- для подачі коксодоменної суміші на нагрівальні колодязі обтискного цеху – 1 турбогазовука ЕГЕР;
- для подачі змішаного газу на методичні печі цеху гарячої прокатки тонкого листа.



Рисунок 1.3 – Схема подачі змішаного газу

Станція по виробництву водню та доочистки азоту є однією з виробничих ділянок газового цеху. На станції встановлено 3 електролізери серії 1000/60/10 загальною потужністю 165 с<sup>3</sup>/Г водню. Кисень, як побічний продукт скидається у атмосферу. Дві лінії доочищення азоту загальною потужністю 200 м<sup>3</sup>/Г захисного газу складом  $H_2 = 0,5 \%$ ;  $N_2 = 99,5 \%$  ( лінія включає у себе змішувальний вузол, компресор, малий ресивер, станцію видалення кисню, вузол адсорбційної осушки). Водень та азот, через ресивери, подаються на пічні установки фірми «Ебнер», де виробляється світле відпалювання холоднокатаних рулонів. Для продувки системи електролізерів, апаратів трубопроводів, а також для тушіння пожеж використовується азот. Для виготовлення електроліту використовується їдкий калій (КОН) - 30% розчин у воді. Очищення води, для отримання водню, виконується в системі зворотного ОСМОСУ, охолодження обладнання за рахунок оборотної води насосної станції з градирнею на даху [6].

На рисунку 1.4 представлена схема розподілу інертних газів.



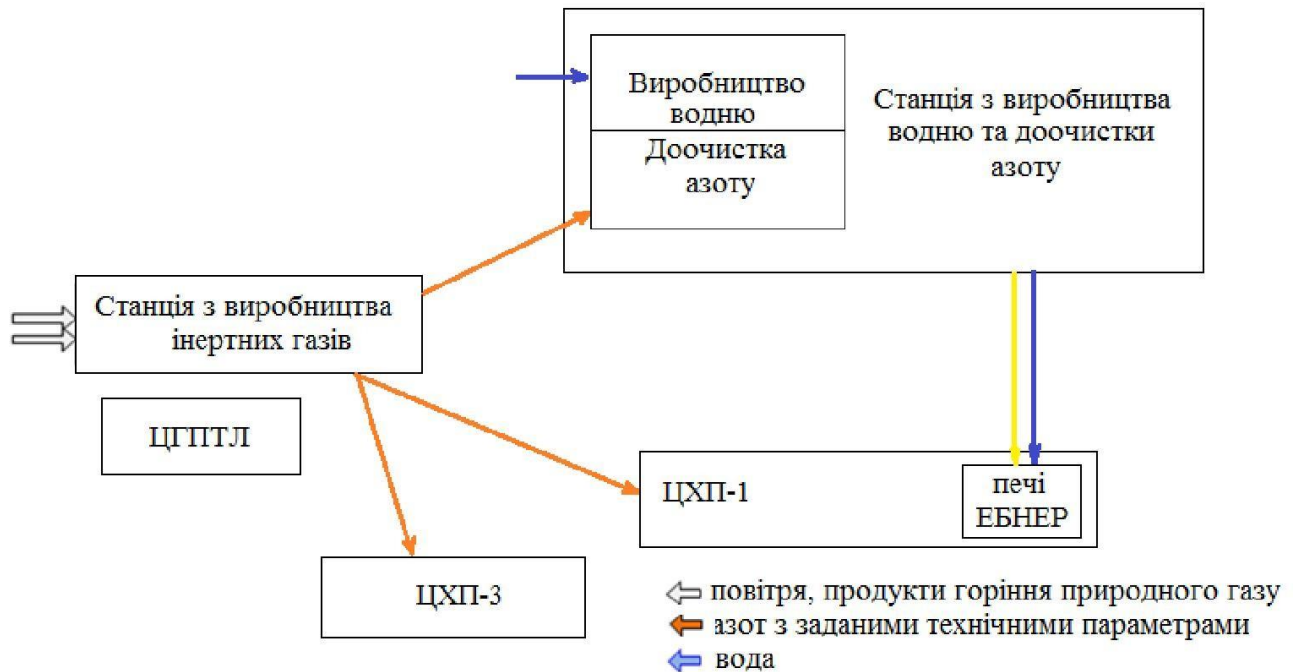


Рисунок 1.4 – Схема розподілу інертних газів

Газові мережі комбінату (міжцехові газопроводи) обслуговуються оперативною бригадою та призначені для транспортування до споживачів доменного, коксового, природного та змішаного газу.

На підприємстві газ подається по різних мережах [1]:

- доменний газ газопроводом 900 мм на рудо-розморожувальну установку (РРУ);
- газопроводом 1500 мм на повітрянагрівачі доменних печей № 2-5;
- газопроводом 1500 мм на свічі скидання доменного газу № 1 та 2;
- газопроводом 1500 мм на ДСС;
- газопроводом 2400 мм у обтискний цех;
- газопроводом 2000 мм на змішувально-підймальну станцію ЦГПТЛ;
- газопроводом 2400 мм на ТЕЦ підприємства;
- газопроводом 800 мм на ПУТ.

Природний газ подається на комбінат з середнім тиском  $5.5 \text{ кг}\cdot\text{с}/\text{см}^2$ . Перед подачею газу користувачам тиск газу знижується до заданої величини на ГРП

комбінату, всього в наявності 10 ГРП.

Коксовий газ подається на комбінат від ЗКХЗ по газопроводу 900...1000 мм. На ТЕЦ та через СПС ЛПЦ на нагрівальні колодці обтискного цеху.

На рисунку 1.5 представлено енергетичні витрати на енергоресурси, а на рисунку 1.6 розподіл витрат електричної енергії за переділами.

У газовому господарстві використовуються наступні енергоресурси:

- електрична енергія;
- стиснене повітря;
- кисень;
- технічна вода;
- водяна пара.

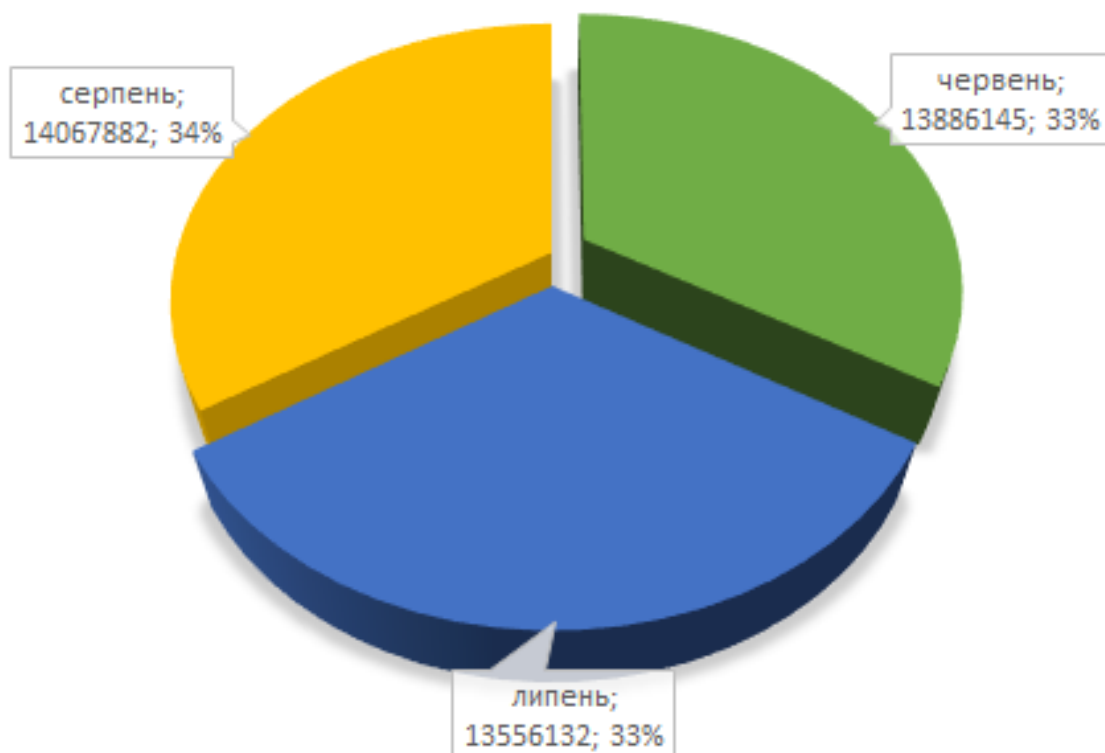


Рисунок 1.5 – Енергетичні витрати на енергоресурси

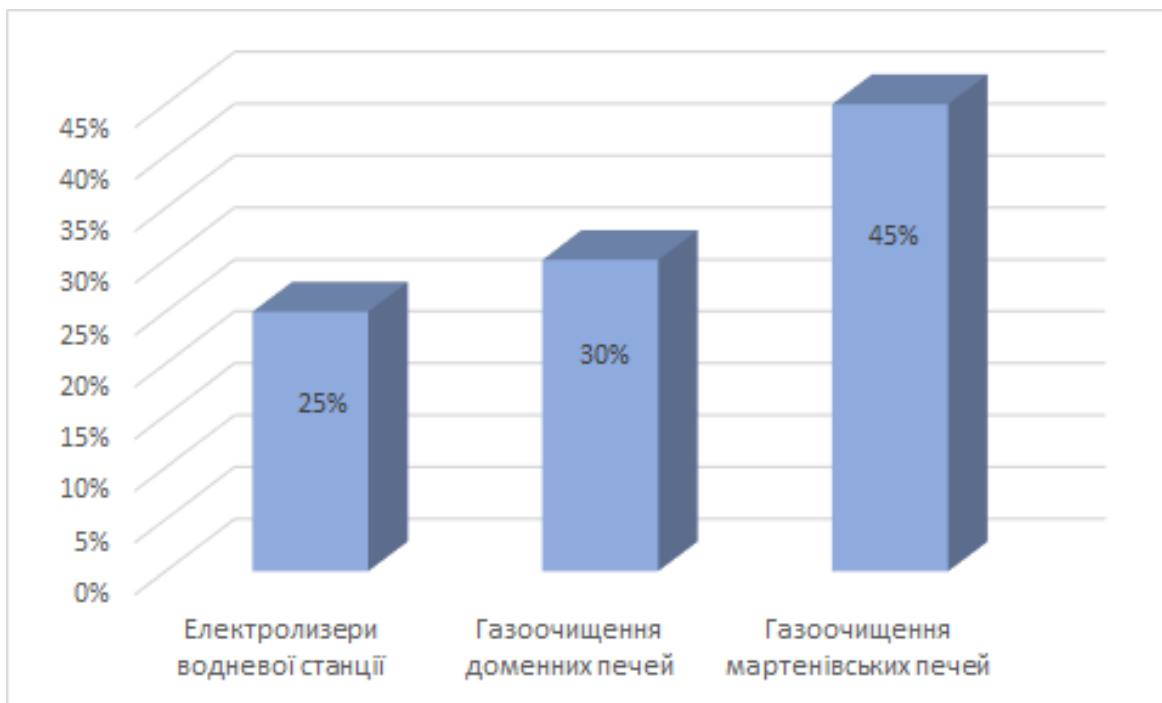


Рисунок 1.6 – Витрати електроенергії за переділами

Споживання електроенергії системою газоочищення. На даний час електродвигуни приводу вентиляторів постійно працюють, причому на підвищених обертах. Регулювання обертів вентиляторів не здійснюється.

Шихтові матеріали основного мартенівського процесу складаються, як і при інших сталеплавильних процесах, з металевої частини (чавун, металевий лом, розкислювачі, що легують) і неметалічної частини (залізна руда, мартенівський агломерат, вапняк, вапно, боксит). Чавун може застосовуватися в рідкому вигляді або в чушках. Залежно від агрегатного стану чавуну, що вводиться в піч, розрізняють скрап-процес і скрап-рудний процес. Скрап-рудний процес є одним з найпоширеніших варіантів мартенівського процесу. Особливість його полягає в тому, що основній складовій металевої частини шихти являється в основному рідкий чавун. Доля чавуна в шихті коливається в основному в межах 50-70%. Скрап-рудним процесом являється і переділ високовуглецевого напівпродукту, отриманого в конвертерах. Особливістю цього переділу є утворення меншої кількості шлаку в порівнянні з роботою на рідкому чавуні, оскільки в напівпродукті

відсутній кремній і міститься незначна кількість марганцю.

Скрап-процес зазвичай поширений на заводах, що не мають доменного виробництва. В цьому випадку основній складовій металевій шихти являється металевий лом. Доля чавуна твердого або рідкого, зазвичай складає 25-45%. Залізну руду, якщо і дають, то в незначних кількостях (зазвичай 1- 2%) тільки по ходу плавки (в період доведення), а не в період завалки. Таким чином, основним джерелом кисню є газова фаза [5, 6].

Процес виплавки сталі в мартенівській печі при будь-якому його різновиді включає наступні основні періоди [5]:

- заправка печі;
- завалка і прогрів твердих шихтових матеріалів;
- заливка рідкого чавуну (завалка твердого чавуна) і плавлення;
- доведення плавки;
- розкислювання і легування металу;
- випуск металу і шлаку.

Прогрів. Для забезпечення успішного плавлення і зменшення тривалості потрібний прогрів шихтових матеріалів, особливо при скрап-рудному процесі. Заправка печі виконується для відновлення зношених за час плавки ділянок, наварювання передньої і задньої стінок і укосів. Завалка твердих шихтових матеріалів значною мірою впливає на хід плавки. Якщо завалка тривала і неправильно проведена, то збільшується тривалість розплавлення шихти і плавки в цілому. Заливка рідкого чавуну зазвичай складає 15-30 хв. Чавун необхідно заливати повільно, інакше можливі бурхливе окислення вуглецю чавуна і викиди металу і шлаку з печі. Плавлення як самостійний період плавки починається після заливки рідкого або завалки твердого чавуна. Основним завданням цього періоду являються розплавлення металу і нагрів його вище температури плавлення. Доведення плавки для різних варіантів мартенівського процесу проводиться приблизно за однією схемою. Завдання цього періоду полягає в остаточному

рафінуванні металу і додатковому нагріві ванни. Доведення зазвичай складається з двох стадій: поліровки (рудного кипіння) і чистого (вільного) кипіння.

Період наведення шлаку для забезпечення необхідної міри дефосфорації і десульфурації металу називають полірковою. Період чистого кипіння потрібний для остаточної підготовки металу до випуску: нагріваючи його до заданої температури видалення газів і неметалічних включення.

Випуск плавки [5, 6]. Розкислювання і легування металу можуть бути проведені як у печі, так і в ковші (на жолобі) під час випуску плавки. По ходу випуску в ківш досаджують розкислювачі і легуючі добавки, в сучасній практиці цю операцію намагаються перенести повністю з печі в ківш. Загальна тривалість плавки в мартенівських печах коливається у межах від 7 до 8 годин. Аналіз технологічного процесу показує, що на деяких етапах плавки можливо суттєво економити електричну енергію, що споживається технологічним обладнанням системи газоочищення.

Середньодобове споживання електроенергії до застосування енергозберігаючих заходів в системі газоочищення мартенівських печей наведено на рисунку 1.7.

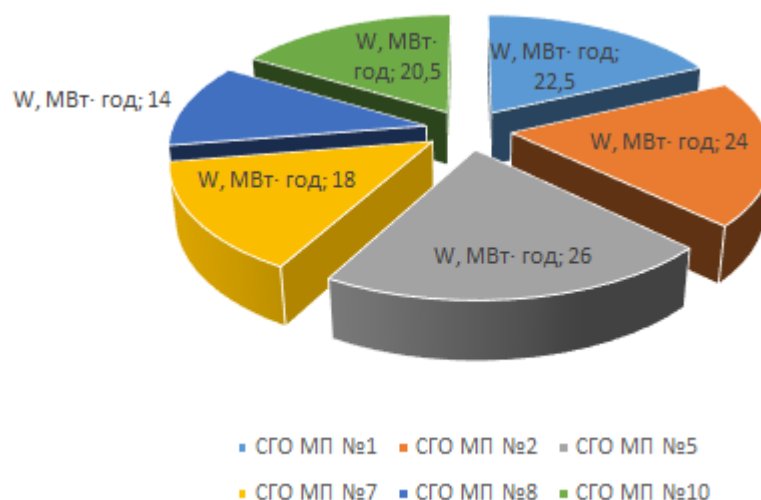


Рисунок 1.7 – Середньодобове споживання електроенергії системою газоочищення до застосування енергозберігаючих заходів

Найголовнішим показником був випуск заданого обсягу продукції, а

кількість споживаних енергоресурсів не бралася до уваги. Тому споживання електричної енергії системою газоочищення таке високе.

Після встановлення дросельної заслінки на млинові вентилятори, з'явилася можливість регулювання продуктивності вентиляторів у деякому діапазоні (рис. 1.8).

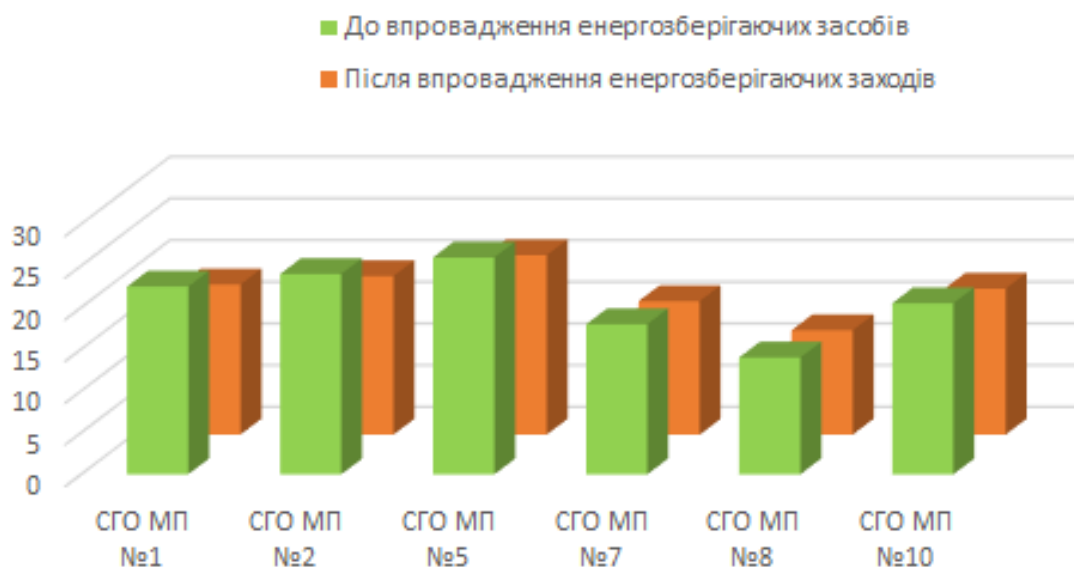


Рисунок 1.8 – Середньодобове споживання електроенергії до та після встановлення дросельної заслінки

З метою економії енергії відносно нещодавно було встановлено дросельні заслінки в системі газоочищення. Після встановлення дросельних заслінок (тип МЕУ) на млинові вентилятори системи газоочищення мартенівських печей, електроспоживання дещо скоротилося за рахунок регулювання потужності на деяких етапах плавки (наприклад, перевірка печі перед заправкою; твердий етап плавки), тобто такий захід має деякий ефект (рис. 1.8). Не дивлячись на те, що відбулося зменшення електроспоживання приводом млинових вентиляторів, таке регулювання потужності все ж таки є непродуктивним і застарілим. В процесі плавки оператор, стежачи за роботою системи газоочищення за приладами витрати повітря і розрядження у борові вручну регулює заслінку в залежності від етапу

плавки. Залежно від характеру навантаження і етапів плавки, відбувається і кількість регулювань. Це означає що приводні електродвигуни млинових вентиляторів потужністю 630...800 кВт працюють постійно практично на повну потужність. Необхідно розглянути можливість автоматичного регулювання потужності в залежності від етапів технологічного процесу плавки.

## 2 АНАЛІЗ СПОЖИВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В СИСТЕМІ ГАЗООЧИЩЕННЯ ПЕЧЕЙ

Для того щоб зменшити обсяги споживання електроенергії системою газоочищення мартенівських печей необхідно провести аналіз обсягів споживання електроенергії, його характер та виявити фактори від яких залежать ці обсяги.

Для досягнення поставленої мети запропоновано зібрати статистичний матеріал щодо обсягів споживання електроенергії обладнанням систем газоочищення мартенівських печей ПАТ «Запоріжсталь». Під час переддипломної практики року було отримано дані про обсяги споживання електроенергії системи газоочищення мартенівських печей.

На основі отриманих результатів статистичного збору інформації проведемо 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. СГО МП №1 споживає 55% від усього обсягу споживаної електроенергії агрегатом.

СГО МП №1 працює на ділянці сталеплавильного агрегату. Агрегат більший ніж мартенівська піч за об'ємом. Обсяг погодинного споживання електричної енергії СГОМП №1 визначаємо за виразом:

$$W_{\text{СГО МП}} = W_{\text{заг.1-2}} \cdot 0,55 \quad (2.1)$$

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 представлено 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.

$$W_{СГО МП1А} = W_{СГО МП1} \cdot 0,55 \quad (2.2)$$

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.

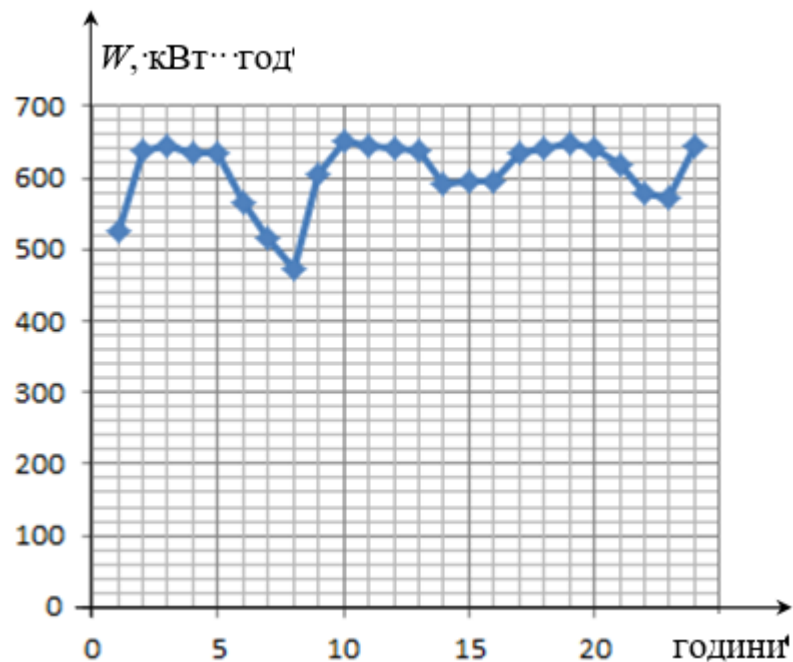


Рисунок 2.1 – Погодинне споживання електроенергії год приводним двигуном СГО МП №1А

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

$$W_{СГОМПБ} = W_{СГОМП} - W_{СГОМПА} \quad (2.3)$$

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

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.

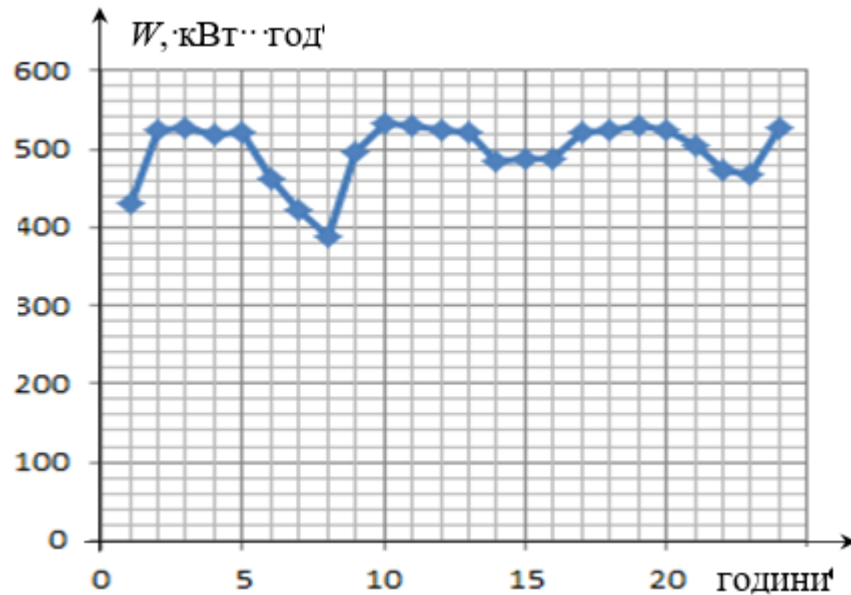


Рисунок 2.2 – Погодинне споживання електроенергії приводним двигуном СГО МП №1Б

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

$$W_{СГОМП2} = W_{заг.1-2} - W_{СГОМП1} \quad (2.4)$$

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

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.

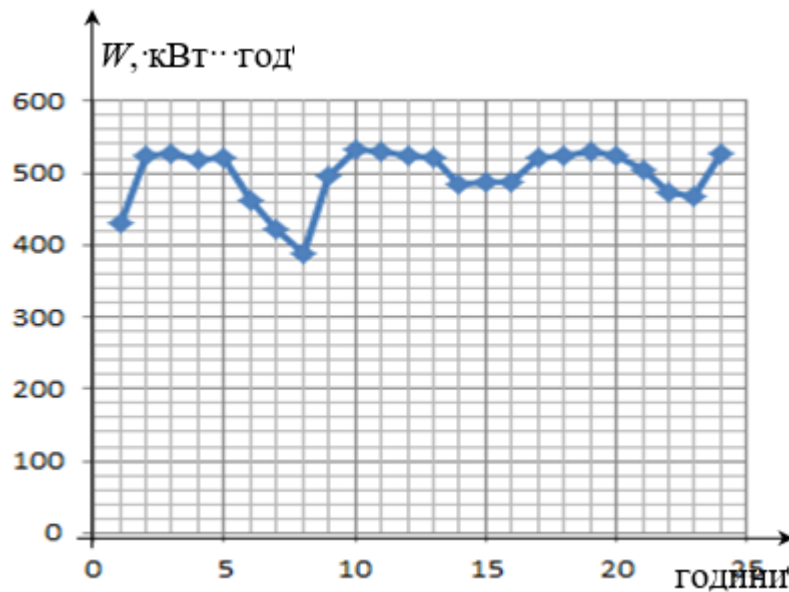


Рисунок 2.3 – Погодинне споживання електроенергії приводним двигуном СГО МП №2А

Визначаємо погодинне споживання електроенергії двигуном Б СГО МП

№2. Двигун Б споживає 45 %.

$$W_{СГОМП2Б} = W_{СГОМП2} - W_{СГОМП2А},$$

$$W_{СГОМП2Б} = 781,704 - 429,9372 = 351,7668 \text{ кВт}\cdot\text{год.}$$

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.

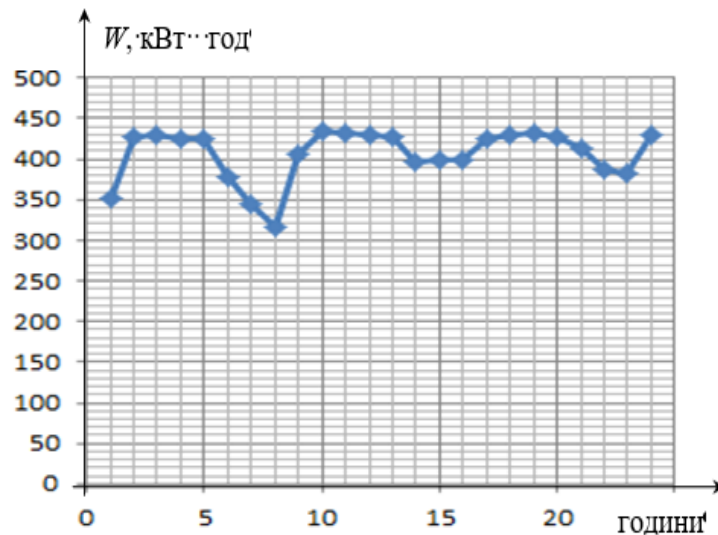


Рисунок 2.4 – Погодинне споживання електроенергії приводним двигуном СГО МП №2Б

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

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

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

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%.

$$W_{СГОМПБ} = 1085,24 - 596,88 = 408,36 \text{ кВт}\cdot\text{год.}$$

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

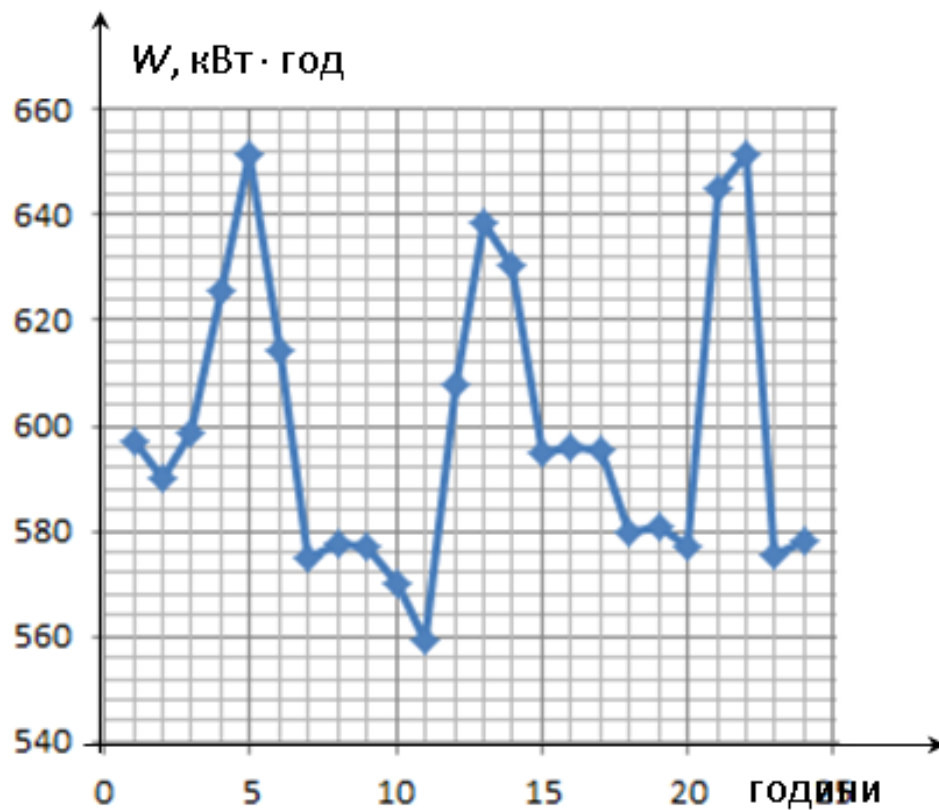


Рисунок 2.5 – Погодинне споживання електроенергії приводним двигуном СГО МП №5А

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.

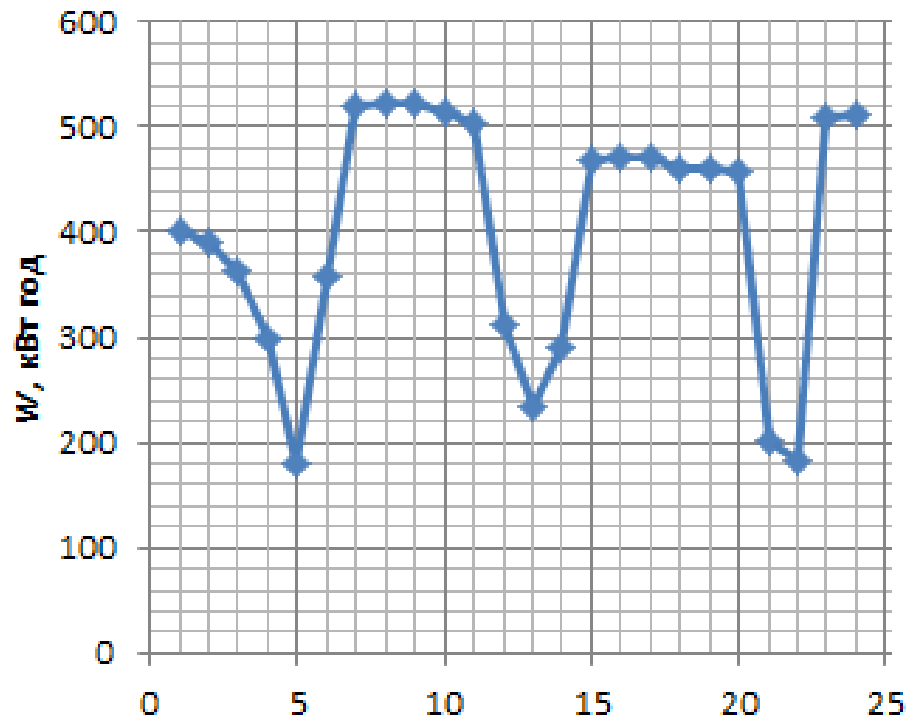


Рисунок 2.6 – Погодинне споживання електроенергії приводним двигуном СГО МП 5Б

Визначаємо погодинне споживання електроенергії СГО МП №7. СГО МП №7

споживає 55% від усього обсягу електроспоживання СГОМП 7 та 8.

$$W_{СГОМП7} = W_{заг.7-8} \cdot 0,55 \quad (2.5)$$

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

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.

$$W_{СГОМП7A} = W_{СГОМП7} \cdot 0,55 \quad (2.6)$$

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

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.

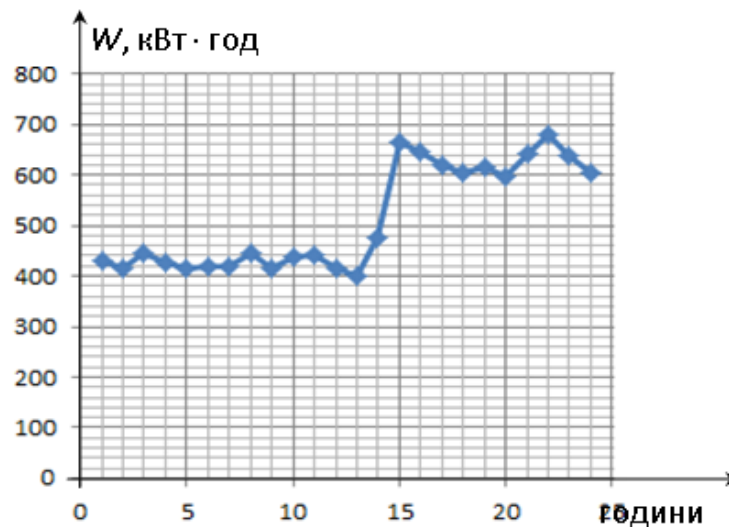


Рисунок 2.7 – Погодинне споживання електроенергії приводним двигуном СГО МП №7А

Визначаємо погодинне споживання електроенергії двигуном Б СГО МП №7.

$$W_{\text{СГОМПБ}} = W_{\text{СГОМП}} - W_{\text{СГОМПА}}, \quad (2.7)$$

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

У таблиці 2.11 представлено погодинне споживання електроенергії двигуном

Б СГО МП №7.

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.

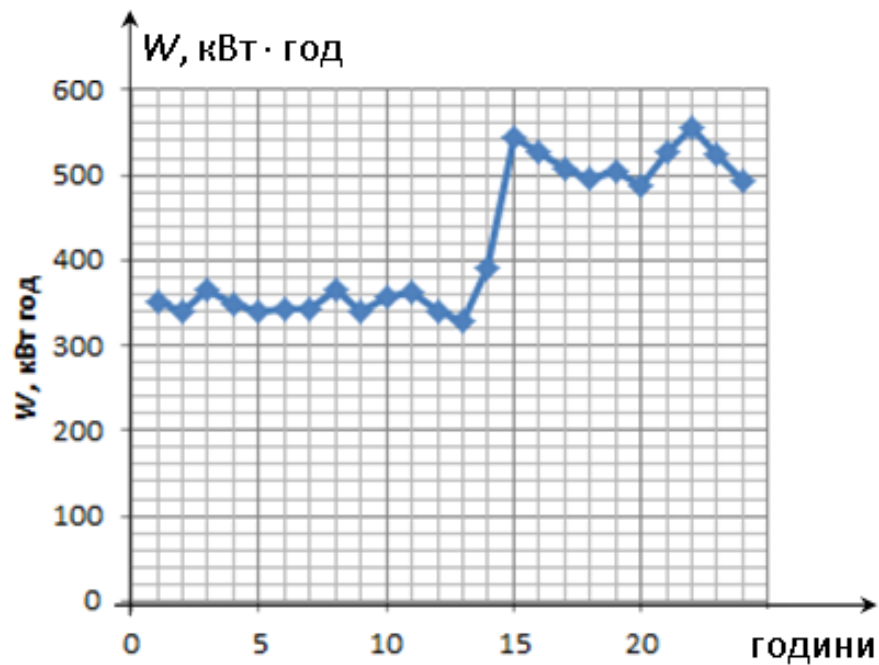


Рисунок 2.8 – Погодинне споживання електроенергії приводним двигуном СГО МП 7Б

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

$$W_{\text{СГОМП8}} = W_{\text{заг.7-8}} - W_{\text{СГОМП7}} \quad (2.8)$$

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

У таблиці 2.12 представлено погодинне електроспоживання СГО МП №8.

$$W_{\text{СГОМП8А}} = W_{\text{СГОМП8}} \cdot 0,55$$

$$W_{\text{СГОМП8А}} = 639,9 \cdot 0,55 = 351,95 \text{ кВт}\cdot\text{год.}$$

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

На рисунку 2.9 представлено споживання електроенергії двигуном А СГО МП №8.

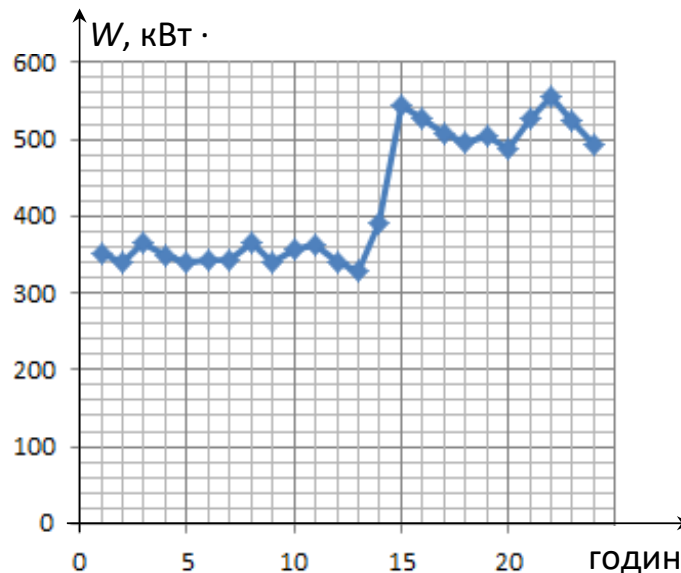


Рисунок 2.9 – Погодинне споживання електроенергії приводним двигуном СГО МП №8А

Визначаємо погодинне споживання електроенергії двигуном Б СГО МП №8.

$$W_{\text{СГОМПБ}} = W_{\text{СГОМП}} - W_{\text{СГОМПА}} \quad (2.9)$$

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

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.

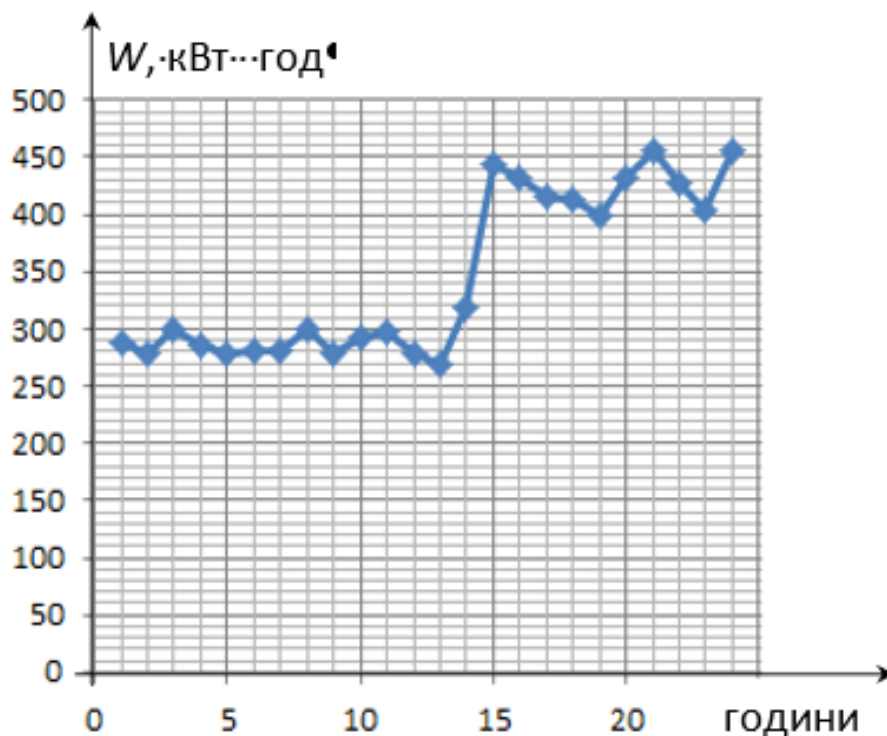


Рисунок 2.10 – Погодинне споживання електроенергії приводним двигуном СГО МП №8Б

Визначаємо погодинне споживання електроенергії двигуном А СГО МП №10.



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

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

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

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.

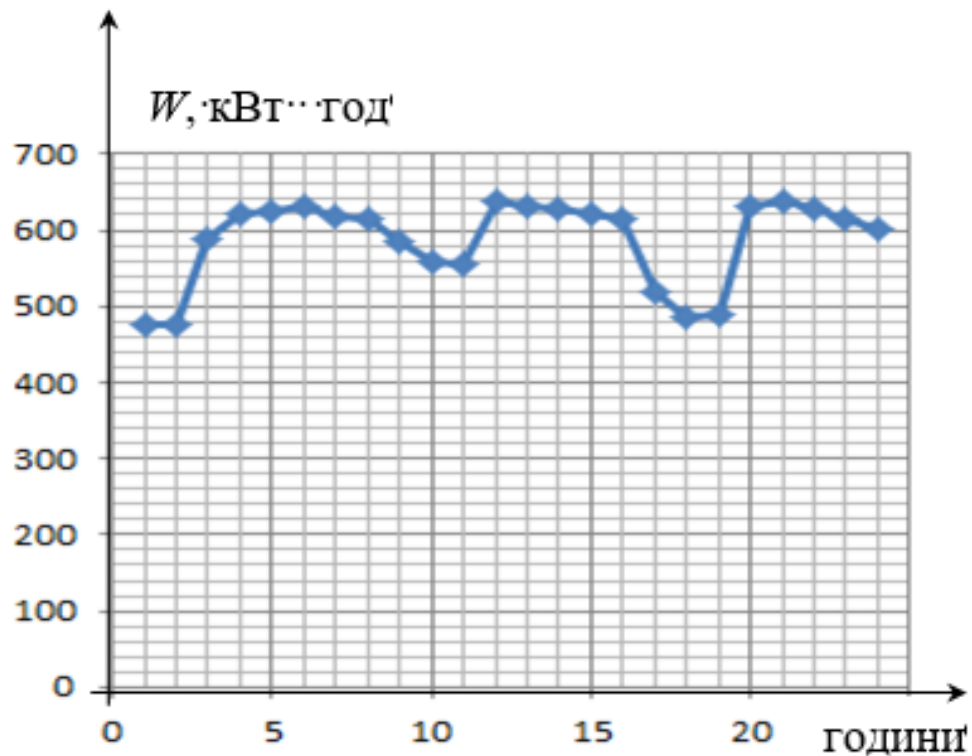


Рисунок 2.11 – Погодинне споживання електроенергії приводним двигуном СГО МП №10А

Погодинне споживання електроенергії двигуном Б СГО МП №10.

$$W_{\text{сгомп10Б}} = W_{\text{сгомп10}} - W_{\text{сгомп10А}} \quad (2.10)$$

$$W_{\text{сгомп10Б}} = 867,96 - 477,38 = 390,58 \text{ кВт}\cdot\text{год.}$$

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.

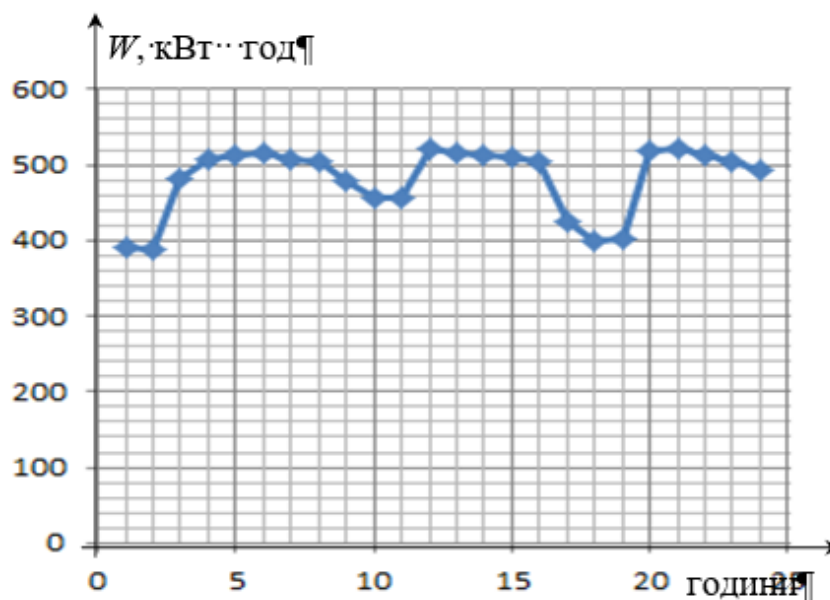


Рисунок 2.12 – Погодинне споживання електроенергії приводним двигуном СГО МП 10Б

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	Електроспоживання, 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

В результаті проведеного аналізу та розрахунків встановлено, що обсяги споживання електроенергії електроприводом млинових вентиляторів мартенівських систем газоочищення залежать від періоду плавки, від споживання під час технологічного процесу кисню, природного газу, повітря та від міри розрідження у борові.

Постає задача побудови моделі споживання електроенергії системою газоочищення мартенівських печей, що залежить від ряду факторів. Це дозволить запропонувати заходи, щодо зменшення електроспоживання у деякі моменти проведення плавки металу.

## 2.1 Моделювання споживання електроенергії системою газоочищення вихідних газів печей

Важливою складовою частиною наукових досліджень є експеримент, основою якого є науково поставлений дослід з керованими умовами, що точно враховуються. Основною метою експерименту є виявлення властивостей досліджуваних об'єктів, перевірка справедливості гіпотез і на цій основі широке і глибоке вивчення теми наукового дослідження [12, 13].

Експеримент в ході розвитку науки виступав потужним засобом дослідження явищ природи і технічних об'єктів. Але лише порівняно недавно він став предметом

дослідження. Увага вчених до того, як краще і ефективніше проводити експеримент, виникло не випадково, а є наслідком досягнутого рівня і масштабу експериментальних робіт на сучасному етапі розвитку науки і техніки. Цей етап характеризується зростанням загального числа проведених експериментальних робіт; збільшенням кількості фахівців, що займаються експериментальною діяльністю; суттєвим ускладненням об'єктів дослідження і використовуваного експериментального обладнання; тенденцією до подовження середнього часу експериментування і подорожчання досліджень; почався процес впровадження засобів і систем автоматизації експерименту [13].

Як і в будь-якому сформованому науковому напрямку, в теорії планування експерименту виробилася система понять і термінів.

Об'єкт дослідження – носій деяких невідомих, що підлягають вивченню.

Планування експерименту – процедура вибору числа та умов проведення дослідів, необхідних і достатніх для вирішення поставленого завдання з необхідною точністю.

Принципи покладені в основу теорії планування експерименту, спрямовані на підвищення ефективності експериментування, тобто;

- прагнення до мінімізації загального числа дослідів;
- одночасне варіювання усіма змінними, які визначають процес, за спеціальними правилами – алгоритмами;
- використання математичного апарату, що формалізує багато дій експериментатора;
- вибір чіткої стратегії, що дозволяє приймати обґрунтоване рішення після кожної серії експериментів.

Завдання, для вирішення яких може використовуватися планування експерименту, надзвичайно різноманітні. Пошук оптимальних умов, побудова інтерполяційних формул, вибір істотних факторів, оцінка та уточнення констант теоретичних моделей, вибір найбільш прийнятних з деякої безлічі

гіпотез про механізм явищ. Можна сказати, що там, де місце має експеримент, є і наука про його проведення – планування експерименту.

Основною метою експерименту є виявлення властивостей досліджуваних об'єктів, перевірка справедливості гіпотез і на цій основі широкі і глибоке вивчення теми наукового дослідження. Постановка і організація експерименту визначають його призначення [13, 14].

Для планування експерименту потрібно знати фактори які впливають на питому величину. В нашому випадку цією величиною є споживання електроенергії системи газоочищення на яке впливають такі фактори як [13]:

- споживання кисню;
- розрідження у борові;
- споживання повітря;
- споживання природного газу.

На рисунку 2.13 представлено фактори які впливають на обсяги споживання електроенергії обладнанням системи газоочищення мартенівських печей.

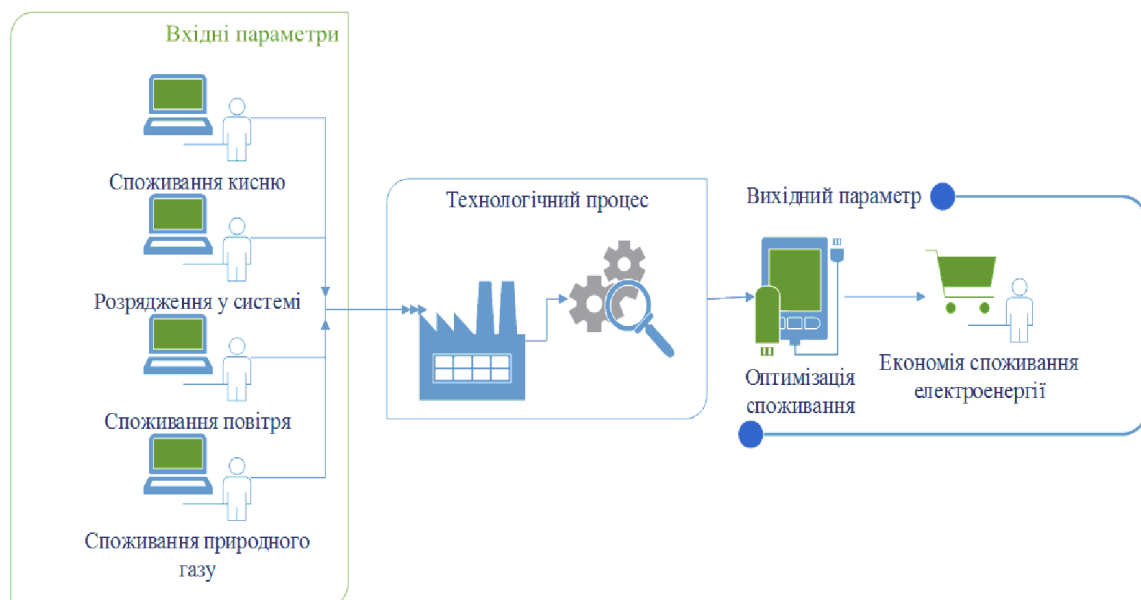


Рисунок 2.13 – Фактори які впливають на споживання електроенергії обладнанням системи газоочищення

У таблиці 2.18 представлено умови проведення факторного експерименту.

Таблиця 2.18 – Умови проведення факторного експерименту

Характери стика плану	Споживання кисню, м <sup>3</sup> $x_1$	Споживання природного газу, м <sup>3</sup> $x_2$	Споживання повітря, м <sup>3</sup> $x_3$	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

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

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	+	-	+	-	+	-	+	-	-	+	-	$y_{12}$

Розрідження в борові, споживання кисню, споживання повітря та споживання природного газу залежать від етапу плавки мартенівської печі. В залежності від технологічного процесу у різні моменти плавки додається різна кількість газу, кисню та повітря а також змінюється значення розрідження у борові з відповідною зміною споживання електричної енергії приводними двигунами млинових вентиляторів системи газоочищення. За 100% приймаємо проміжок часу

тривалістю 60 хвилин. У таблиці 2.20 представлено тривалість етапів мартенівської плавки.

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 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:

$$W = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + \dots + b_n \cdot x_n, \quad (2.11)$$

де  $x_1 \dots x_n$  – незалежні змінні величини (фактори, що впливають на споживання електроенергії);

$b \dots b_0$  – коефіцієнти множинної лінійної регресії.

Експеримент запропоновано виконати для електродвигуна Б СГО МП №1. Середній час плавки становить 8 годин.

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

Таблица 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 показують залежність розрідження у борові від споживання повітря, кисню та природного газу. В свою чергу розрідження у борові впливає на споживання електроенергії вентиляційним обладнанням системи газоочищення. Визначивши залежність від факторів, можна визначити етапи в які можливо знизити потужність на двигунах, що дозволить зменшити споживання електроенергії. Найменше споживання електроенергії спостерігається при експерименті №4, 5, 6 та 11. Таке поєднання факторів відповідає наступним технологічним етапам плавки: етап підігріву твердих слоїв (прогрівання), етап огляду та завалки. Саме на цих етапах, що не потребують суттєвого розрідження у борові, можна суттєво зменшити споживання електричної енергії електроприводом млинових вентиляторів системи газоочищення мартенівських печей.

### **3 РОЗРОБКА ЗАХОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ СИСТЕМИ ГАЗООЧИЩЕННЯ ПЕЧЕЙ**

Як вже зазначалось вище, після удосконалення розглядуваної системи оператор виконує запуск електродвигуна на закритий шибер. Після того як двигун набере обертів оператор відкриває в ручну шиберну заслінку. В процесі плавки оператор, стежачи за роботою системи газоочищення за приладами витрати повітря і розрядження у борові вручну регулює заслінку в залежності від етапу плавки. Залежно від характеру навантаження, відбувається і кількість регулювань. Це означає що електродвигун постійно працює на повну потужність.

Для розробки таких систем необхідною умовою є аналіз методів керування електроприводом і на їх основі формування структурно-логічних схем оптимального керування виконавчими механізмами (ВМ) і технологічним процесом в цілому. При цьому необхідно враховувати специфіку режимів ВМ і систем керування. Вентиляційне обладнання, являє собою складний електромеханічний об'єкт, керування яким здійснюється з урахуванням взаємозв'язків безлічі параметрів різної фізичної природи. Це призводить до суттєвого впливу на використання відомих методів і способів. В якості основних виконавчих механізмів систем вентиляції використовуються асинхронні електроприводи, технологічні засувки та системи керування. Необхідність забезпечення узгодженості між інформаційними каналами керування і стану виконавчих механізмів призводить до ускладнення вирішення питань підвищення ефективності системи [15-17]. Для розробки енергозберігаючих технічних рішень в електроприводі вентиляційних систем необхідно виконати відповідні наукові дослідження. У вентиляційних системах в якості електропривода широко використовують асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором. АД мають просту конструкцію, відносно невисоку вартість, високу надійність. Більшість електроприводів із АД нерегульовані, що пояснюється складністю керування

електромагнітними процесами, що протікають в АД [18]. При зміні продуктивності вентиляційної системи, шляхом частотного регулювання швидкості АД, можна досягти економії електроенергії до 60% в порівнянні з використанням нерегульованих АД [15, 19, 20]. З огляду на те, що зростання вартості електроенергії носить випереджаючий характер щодо вартості інших витрат, проблема енергозбереження при роботі вентиляційного обладнання набуває першорядного характеру. Економія електроенергії при застосуванні частотного регулювання електроприводу пояснюється кубічною залежністю між потужністю АД і витратою газо-повітряної суміші, яка пропорційна кутовій швидкості ротора АД (ККД вентилятора при цьому вважається постійним). Ці співвідношення іноді називають законами подібності [21]. Впровадження регульованих електроприводів вентиляторів демонструє можливості істотного зниження енергоспоживання (рис. 3.1) [21]. Відомо, що при підключенні асинхронних двигунів приводу вентилятора «безпосередньо» в мережу відбувається 5-7 кратний кидок номінального струму [22], що викликає падіння напруги в мережі. Ці падіння напруги призводять до суттєвого зменшення електромагнітного моменту електродвигунів, що працюють.

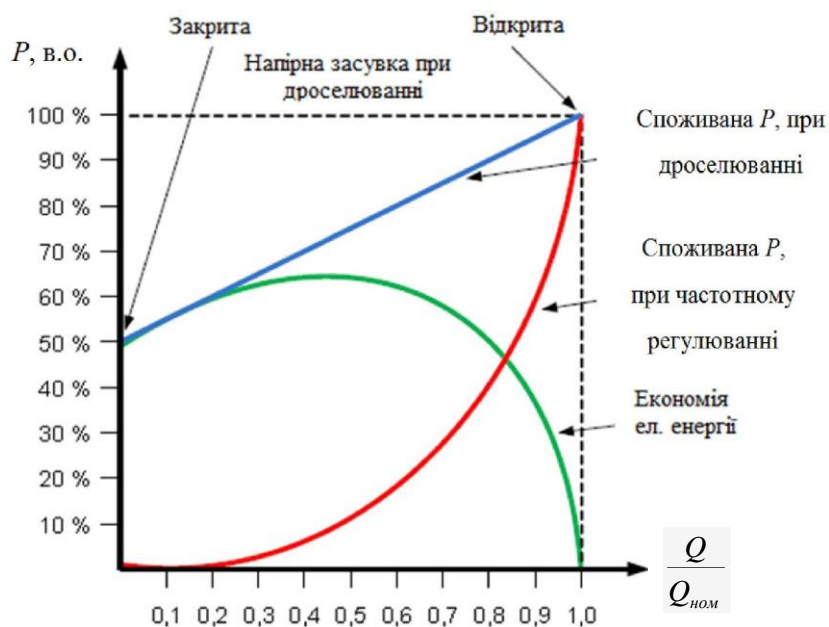


Рисунок 3.1 – Споживання потужності при різних способах регулювання продуктивності вентилятора

Частотне регулювання приводних електродвигунів вентиляторів обмежує пусковий струм на рівні не вище номінального, зменшує падіння напруги в електричній мережі, зменшує тиск повітря в системі вентиляції і мінімізує ймовірність виникнення хвиль тиску, а також веде до скорочення собівартості передачі електроенергії. Необхідно звернути особливу увагу на те, що при дросельному регулюванні витрати газо-повітряної суміші зростає тиск в системі і практично не вдається знизити енергоспоживання. Наявність регулятора технологічного параметра в перетворювачах частоти (ПЧ), що реалізують частотне регулювання, дозволяє організувати автоматичне керування з використанням датчиків тиску, газу, температури, вологості і інших датчиків зворотного зв'язку.

Практика використання перетворювачів частоти для частотного керування вентиляторами доводить підвищити доцільність не тільки їх застосування для управління вентиляційними агрегатами, але і створення спеціалізованих систем керування технологічним процесом. це досягається за рахунок можливості використання вбудованого в ПЧ регулятора технологічного параметра, що дозволяє організувати автоматичне керування по аналоговому або цифровому сигналам, які приходять з відомих датчиків зворотного зв'язку. Цей підхід дозволяє отримати суттєвий економічний ефект від зниження спожитої електричної потужності.

### 3.1 Управління асинхронними приводами

Серед іноземних виробників вентиляційного обладнання для систем видалення газо-повітряних сумішей, зокрема фірми видалення газо-повітряних сумішей, можна виділити такі фірми, як “Grundfos”, “ABB”, “Siemens” та інші. Ці фірми пропонують його тільки з вбудованим ПЧ. Однак нинішня висока вартість як вентиляційного обладнання, так і ПЧ окремо, створює передумови до розвитку вітчизняних ПЧ. Асинхронні двигуни мають складну нелінійну механічну характеристику [22]. Для регулювання швидкості і моменту АД в сучасному електроприводі застосовують два основні методи частотного керування: скалярне

керування та векторне керування. Переважна більшість імпортованих ПЧ мають обидва методи керування і надають користувачеві можливість вибору одного з них.

Асинхронний електропривод зі скалярним керуванням.

Скалярне керування дає можливість забезпечити сталість перевантажувальної здатності електроприводу незалежно від частоти і напруги. При цьому спостерігається зниження моменту АД при низьких частотах (при  $f < 0,1 f_{ном}$ ). Максимальний діапазон регулювання кутової швидкості ротора при незмінному моменті опору для електроприводів з скалярним керуванням досягає 10 : 1 [23].

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.

Асинхронний електропривод з векторним керуванням [23, 24].

Іншим напрямком розвитку керування асинхронним двигуном став електропривод з векторним керуванням, коли робота АД розглядається не в статорній системі координат, де всі змінні описуються гармонійними функціями, а в системі координат, що пов'язана з вектором потокозчеплення ротора. Тому даний метод керування отримав назву векторного керування (ВК).

У цій системі координат всі змінні змінюються аналогічно відповідним змінним двигунів постійного струму з незалежним збудженням (ДПС НЗ). Це дозволило будувати систему керування аналогічно системам двигунів постійного струму з незалежним збудженням. Механічні характеристики АД, вентилятора і ВК наведені на рисунку 3.1.



Рисунок 3.1 – Механічні характеристики вентилятора і АД

На сьогоднішній день існує два основних типи систем векторного керування – бездатчикової системи (без датчика кутової швидкості на валу двигуна) і системи зі зворотним зв'язком за швидкістю.

Застосування того чи іншого типу векторного керування визначається, в першу чергу, характеристикою виконавчого механізму. За необхідності в невеликих діапазонах зміни швидкості (не більше 100 : 1) і вимоги до точності її підтримки не більше  $\pm 0,5\%$  застосовують бездатчикове векторне керування, а при необхідності зміни швидкості валу в широких межах (більше 10000 : 1), виникають вимоги до точності підтримки кутової швидкості (до  $\pm 0,02\%$  при частотах менше 1 Гц). При необхідності позиціонування валу при регулювання моменту на валу двигуна на дуже низьких частотах, застосовують методи векторного керування зі зворотним зв'язком за швидкістю.

Відомо, що при використанні ВК досягаються наступні переваги:

- висока точність регулювання швидкості навіть при відсутності датчика швидкості;
- плавне, без ривків, обертання електродвигуна в області малих частот;
- можливість забезпечення номінального моменту на валу при нульовій швидкості (при наявності датчика швидкості);
- швидка реакція на зміну навантаження – при різких скачках навантаження практично не відбувається стрибків швидкості. При забезпечення такого режиму роботи АД, знижуються втрати на нагрів і намагнічування, а, отже, підвищується ККД двигуна.

До недоліків можна віднести:

- необхідність знання значного об'єму параметрів двигуна;
- велика обчислювальна складність.

### 3.2 Застосування векторного керування електроприводом вентиляторів системи газоочищення

Застосування ВК в цих системах газоочищення дає наступні переваги:

- можливість забезпечення номінального моменту на валу починаючи з нульової швидкості;
- висока точність регулювання швидкості при відсутності датчика швидкості, дозволяє підтримувати оптимальну витрату і більш високий ККД;
- підтримка високого ККД двигуна, за рахунок роздільного керування намагнічуючою і моментною складовими струму статора, і як наслідок, зниження втрат на намагнічування і нагрів, оскільки векторний метод дозволяє мінімізувати реактивну складову струму статора при зменшенні навантаження шляхом адекватного зниження напруги на двигуні, а при збільшенні навантаження адекватно збільшується напруга живлення



двигуна;

- досить швидке керування при виникненні непередбачуваних різких стрибків тиску в системі;
- швидка реакція на зміну навантаження (при різких скачках навантаження практично не відбувається стрибків швидкості), що забезпечує задану витрату при змінах тиску у витяжній магістралі;
- формування траєкторії швидкості при гальмуванні аж до нульової з підтриманням відповідного моменту, що виключає різку зміну витрати газо- повітряної суміші;
- можливість незалежного і практично безінерційного регулювання двох координат одночасно – моменту і швидкості
- плавне, практично без ривків, обертання валу двигуна в області малих частот (при пуску і гальмуванні) по заданій траєкторії виключає резонанси в системі;
- поряд з економією електроенергії, забезпечує можливість регулювання тиску в системі при відсутності регулятора тиску.

Векторне керування дозволяє розглядати модель АД як модель двигуна постійного струму. Це досягається шляхом перетворення змінних асинхронної машини з стаціонарної системи координат у обертову, пов'язану з вектором потокозчеплення. Тому оцінка вектора потокозчеплення – це одна з основних задач в проектуванні високодинамічного електроприводу. Для якісного векторного управління необхідна точна інформація про кутову швидкість цієї системи координат, то є кутової швидкості вектора потокозчеплення. Крім того, остання враховується при обчисленні кутової швидкості ротора при бездатчиковому керуванні. Також, для векторного керування АД, необхідне знання його параметрів. Основними параметрами АД є індуктивності статора і ротора, взаємна індуктивність, активні опори статора і ротора і приведений момент інерції ротора. Названі вище опори в залежності від температур статора і ротора можуть

змінюватися в два рази вгору і вниз по відношенню до номінальних значень, що істотно впливає не тільки на характеристики системи керування, а й, взагалі, на її працездатність. В зв'язку з цим необхідна ідентифікація зазначених параметрів і компенсація впливу їх невизначеності.

### 3.3 Схема векторного керування асинхронним двигуном

Оскільки активний опір ротора визначається виразом:

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

то для його оцінки в реальному часі необхідна зміна модуля вектора потокозчеплення ротора  $\psi$ . 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.

Функціональна схема ПВК асинхронним двигуном з використанням інжекції для ідентифікації параметрів показана на рисунку (Додаток А) [26].

На схемі прийняті наступні позначення блоків:

- 1 – аналогові RC-фільтри;
- 2 – блок оцінювання постійних складових;
- 3 – компенсатори викривлень, що вносяться аналоговими RC-фільтрами;
- 4 – блок оцінювання кутової швидкості вектора потокозчеплення ротора;
- 5 – спостерігач потокозчеплення ротора;
- 6 – блок оцінювання активного опору статора,;
- 7 – блок оцінювання кутової швидкості  $\omega$  та постійної часу ротора;
- 8 – блок обчислення величини абсолютного ковзання;
- 9 – блок обчислення кутової швидкості ротора;
- 10 – формувач електромагнітного моменту та програмних струмів;
- 11 – регулятори струмів,
- 12 – компенсатор пасивного силового фільтра.

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 з порівнюваних блоків. Виходячи з результатів моделювання,

можна провести аналіз і вибір блоків, які точно відтворюють інжектовану складову у всьому діапазоні швидкостей, включаючи нульову. Блоки 2, 5 в період намагнічування дають неправильну оцінку потокозчеплення, що затягує час підготовки системи до роботи. Блоки 1 та 3 дають практично однаковий результат, проте блок 1 відрізняється обчислювальною складністю (система 5-го порядку). Таким чином, можна виділити два блоки, приблизно однаковою обчислювальною складністю, це блоки 3 (модифікований блок Ohtani) і блок 4 спостерігача. Слід ще раз відзначити, що блок 4 відрізняється дуже гарним відтворенням фактичного значення потокозчеплення в період намагнічування [26, 32]

Для живлення АД в даний час використовуються інвертори напруги з ШІМ. Вихідні напруги ПЧ з ШІМ є послідовністю прямокутних імпульсів малої тривалості. Для виділення головних гармонік вихідної напруги, що використовуються в управлінні, необхідно застосування блоків фільтрації. Розглянемо блоки, що спрямовані на усунення постійної складової з вимірюваних сигналів, і програмну корекцію для компенсації спотворень, що вносяться фільтрами силової частини АЕП. Розробка попереджувального компенсатора спотворень статорної напруги. Попереджувальний компенсатор спотворень статорної напруги АД застосовують для усунення спотворень, що вносяться силовими фільтрами. На виході ПЧ з ШІМ в деяких випадках встановлюють ПСФ, при цьому поліпшується гармонійний склад струму і напруги, зменшується акустичний шум, попереджається ефект старіння ізоляції. Але, поряд з перерахованими позитивними ефектами, пасивні фільтри спотворюють головні гармоніки вихідної напруги і струмів, що призводить до погіршення динаміки електроприводу. Для відновлення динаміки приводу можна побудувати алгоритмічно простий упереджуючий компенсатор (УК) введенням перехресних зв'язків.

Функціональна схема автономного інвертора з силовим фільтром, де СК – система керування автономним інвертором з ШІМ (АІН з ШІМ); ПСФ – пасивний

силовий LC-фільтр; АД – двигун змінного струму;  $u_{ap}, u_{\beta p}$  – керуючі (програмні) сигнали системи керування АІН;  $u_{ak}, u_{\beta k}$  – програмні сигнали з урахуванням компенсації;  $u_{Ak}, u_{Bk}, u_{Ck}$  – фазні керуючі сигнали представлено на рисунку 3.2.

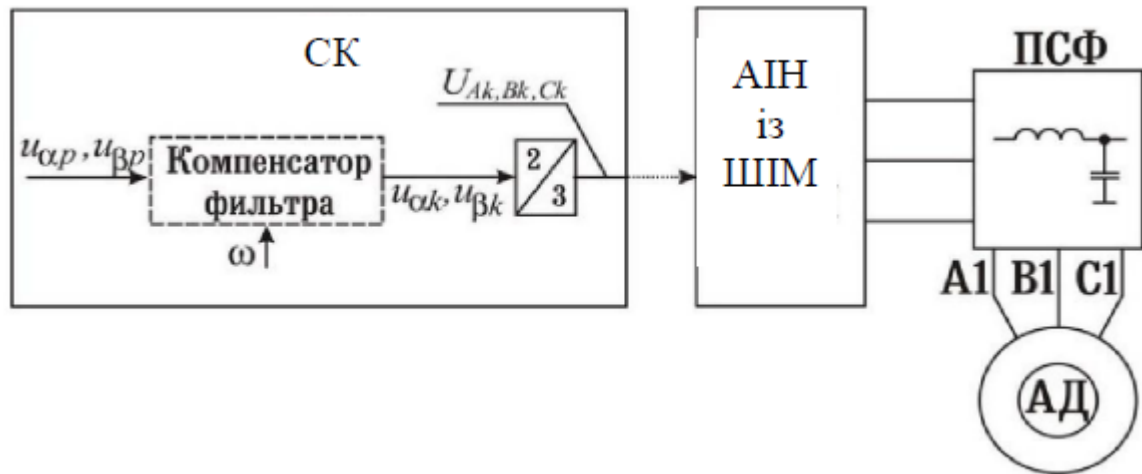


Рисунок 3.2 – Функціональна схема кола компенсації викривлень, що вносяться пасивним силовим фільтром

А функціональна схема підключення пасивного силового фільтра показана на рисунку 3.3.

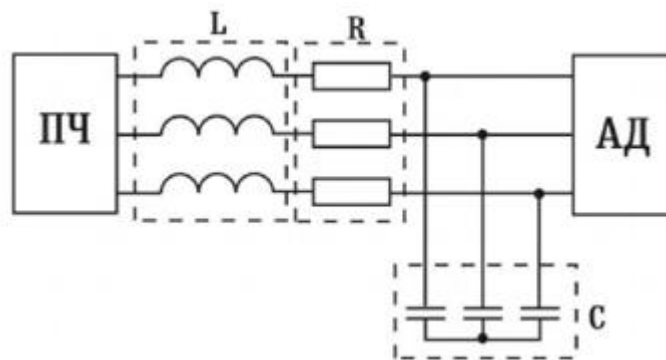


Рисунок 3.3 – Функціональна схема підключення пасивного силового фільтра

Параметри ПСФ вибираються з умови усунення на їх виходах високочастотних перешкод, обумовлених ШІМ. Тому вони являються відомими, і,

з урахуванням параметрів навантаження, можна вважати відомими спотворення напруги на виходах ПСФ. Завдання полягає в упереджувальній зміні програмних сигналів по амплітуді і фазі таким чином, щоб вони компенсували спотворення, що вносяться ПСФ. Отже, коефіцієнт передачі системи УК - ПСФ буде дорівнювати одиниці. Така можливість є за рахунок введення перехресних зв'язків між фазами багатофазних сигналів, що зручніше робити з двофазним сигналами.

Таким чином при дослідженні блоків системи ПВК асинхронним приводом з використанням інжекції для ідентифікації постійної часу ротора встановлено, що помилка оцінки кутової швидкості ротора у всіх режимах роботи без навантаження не більше 0,02 рад/с, а на низьких швидкостях при номінальному навантаженні практично відсутня. Подвійна амплітуда пульсацій кутової швидкості ротора, викликана інжекцією на холостому ході складає 0,014 рад/с, а при номінальному навантаженні – 0,05 рад/с. Зі сказаного вище випливає, що нижня межа швидкості для даного двигуна – 0,02 рад/с, а значить теоретичний діапазон регулювання  $150/0,02 - 1$  (7500 - 1). При цьому величина пульсацій на нижчій межі кутової швидкості 35% по відношенню до нижчої кутової швидкості ротора, на вищій межі – не більше 0,5 %. Помилки визначення вектора потокозчеплення, синхронної швидкості, постійної часу ротора, постійних складових у вимірюваних сигналах 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.

За рахунок підвищення точності і збільшення діапазону працездатності розроблених блоків оцінки вектора потокозчеплення, синхронної швидкості, кутової швидкості ротора, обчислюють з урахуванням зміни постійної часу ротора, і застосування цих блоків певною схемою ВК, було досягнуто підвищення точності керування і розширення діапазону регулювання швидкості. Прийнято вважати, що при необхідності регулювання в діапазоні більш, ніж 150:1 рекомендується застосовувати датчик швидкості ротора. Однак, за рахунок застосування

розробленої системи ВК можна буде відмовитися від установки зазначеного датчика аж до діапазону 7500:1, що розширить сферу застосування асинхронного приводу (оскільки конструктивно не завжди передбачена можливість для установки датчика швидкості), і не призведе до додаткових витрат на придбання і експлуатацію датчика швидкості, який в ряді випадків може бути дорожче самого АД.

У впровадженні частотного регулювання є такі важливі позитивні моменти:

- можливість зменшення часу простою двигунів СГОМП під час проведення балансування за рахунок зменшення часу, що відводиться на пробний пуск двигуна та розгін. Інвертор забезпечує плавний пуск двигуна;
- можливість регулювання потужності двигуна, у деякі моменти плавки коли не потрібно високого розрідження в системі газоочищення.

### 3.4 Техніко-економічне обґрунтування запропонованих заходів

Питання економічної ефективності при плануванні проектів розглядаються в різних масштабах та на різних стадіях планування. Розрізняють і методи, що застосовуються на окремих етапах планування та оцінки [35]:

- на етапі проведення технічного аналізу та при плануванні фінансування проекту, коли відомі не всі умови підприємницької діяльності, вибір здійснюється на практиці за допомогою спрощеного часткового аналізу;
- на вирішальній стадії оцінки необхідно розглянути проект у цілому, беручи до уваги результати часткового аналізу, а потім прийняти позитивне або те, що відхиляється від проектного рішення.

Вказані етапи реалізують за допомогою глобальних моделей. Глобальними вони називаються тому, що дозволяють враховувати всі умови фінансової сфери. Ефективність проекту характеризується системою показників, які виражають

співвідношення вигід та витрат на проект.

Для оцінки ефективності проектів доцільно використовувати показники, які дають змогу розраховувати значення критеріїв ефективності проектів, беручи до уваги комплексну оцінку вигід і витрат, зміну вартості коштів у часі та інші чинники [35].

Правильне визначення обсягу початкових витрат (капітальних вкладень) на проект є запорукою якості розрахунків ефективності та окупності проекту.

При аналізі ефективності проекту використовують такі показники [35]:

- сума інвестицій (капітальні вкладення);
- річний економічний ефект;
- річний економічний ефект у грошовому вираженні.

Капітальні вкладення – це вартість початкових грошових вкладень у проект, без яких він не може здійснюватися. Ці втрати мають довгостроковий характер. За період функціонування проекту протягом усього терміну капітал, вкладений у такі активи повертається у вигляді амортизаційних відрахувань як частина грошового потоку, а капітал, вкладений в оборотні активи, в тому числі в грошові активи, по закінченню «життєвого циклу» проекту має залишатися у інвестора у незмінному вигляді й розмірі.

Визначимо економічну доцільність впровадження запропонованих заходів з підвищення енергоефективності.

Розрахунок обсягів споживання електроенергії після застосування частотного регулювання.

Плавка сталі у мартенівській печі № 1, 2, 5,7,8 та 10 виконується на протязі 8 години. Тому на усіх мартенівських печах кількість плавок на добу

– 3, при умові відсутності зупинок з технічних та технологічних причин.

На момент обстеження мартенівські печі №3, 4, 6, 11 та 12 знаходилися на технологічному обслуговуванні або плановому ремонті, тому вони не беруться до уваги в подальших розрахунках.



Визначаємо середнє споживання електроенергії за 1 плавку електроприводом системи газоочищення мартенівських печей:

$$W_{i \text{ пл.}} = W_{\text{ГОМПи}} / N_n \quad (3.1)$$

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

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

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

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 у розділі 2 у технології мартенівського процесу плавки є два процеси у які не потребується 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. В ці технологічні періоди можна знизити продуктивність, а відповідно і обсяги споживання електричної енергії

електроприводом млинових вентиляторів до 70 %.

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

$$W_{\text{проц}} = W_i \cdot 0.375 \cdot 0,7 \quad (3.2)$$

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

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

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 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:

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

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

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:

$$E_{\Delta W_{\text{рік}}} = E_{\Delta W} \cdot 300,$$

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

На даний час орієтовна 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:

$$K = B_{\text{чп}} \cdot n + B_{\text{м}}.$$

де  $B_{\text{чп}}$  – орієтовна вартість частотного перетворювача;

$B_{\text{м}}$  – орієтовна вартість вартість монтажу та налаштування частотного електропривода

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

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

## ВИСНОВКИ

У представленій роботі проведено аналіз електроенергетичного обладнання газового господарства підприємства «Мотор Січ» та оцінку ефективності споживання електричної енергії даним господарством. Встановлено, що найбільшим споживачем електричної енергії є електропривод вентиляторів системи газоочищення мартенівських печей.

Встановлено, що експлуатація електроприводів вентиляторів не є ефективною з енергетичної точки зору, оскільки електричні двигуни працюють на повній швидкості і постійно. Встановлення дроселювання для регулювання подачі газо-повітряної суміші не вирішує проблеми підвищення енергоефективності електроприводу.

Запропоновано впровадити частотне регулювання швидкості обертання вентиляторів, що дозволить більш ефективно впливати на продуктивність системи газоочищення. При цьому, таке рішення також дозволить знизити енергоспоживання цих електроприводів. Одночасно з цим можна очікувати збільшення терміну служби цих агрегатів.

У роботі доведено доцільність використання частотно-регульованого електроприводу вентиляторів системи газоочищення із векторним керуванням. Таке рішення дозволяє керувати обертовим моментом асинхронних двигунів, регулювати швидкість обертання двигунів у широкому діапазоні. У свою чергу, це дозволяє проводити регулювання подачі газоповітряної суміші.

На виході перетворювача частоти рекомендується встановити LC-фільтр з компенсатором, що матиме інжектовану складову в намагнічуючій складовій струму статора, що дозволить зменшити втрати в системі «асинхронний двигун – перетворювач частоти». Можна очікувати, що така вдосконалена система векторного керування електроприводом вентилятора дозволить забезпечити вихідні напруги ПЧ близькі до синусоїдальної форми з коефіцієнтом нелінійних

спотворень до 5 %, а також більш точно керувати кутовою швидкістю.

В результаті, розроблені заходи дозволять скоротити споживання електроенергії в системі газоочищення печей до 25 %.

Очікуваний термін окупності запропонованих заходів складає 1,5 роки.

## 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. Богушевський, 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. Богушевський, 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/energoberezhenie/> – 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. Ящура, А. И. Система технического обслуживания и ремонта энергетического оборудования. Справочник. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2006. – 504 с.

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

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

18. Никитин, В. М. Энергосберегающие электроприводы [Текст] / В. М. Никитин, А.Д. Поздеев, Ф.И. Ковалёв, Г.Н. Шестопёров // Электротехника. – 1996. – №4. – С. 52–55.

19. 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.

20. 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.

21. Бондаренко, В. І. Основы электричного привода [Текст] / В. І. Бондаренко. Навчальний посібник. - Запоріжжя: ЗНТУ, 2003. – 314 с.

22. Правила улаштування електроустановок. Четверте видання, перероблене й доповнене — Х.: Вид-во «Форт», 2011.— 736 с.

23. Blaschke, F. Das Prinzip der Feldorientierung die Grundlage fur die TRANSVECTOR – Regelung von Asynchronmaschinen [Текст] / F. Blaschke // SiemensZeitschrift.–1971.– 45.– P.757.

24. 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.

25. 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.

26. Соломаха, А.В. Формирование системы векторного управления асинхронным приводом с компенсацией неопределенностей [Текст] / А. В. Соломаха // Радіоелектроніка. Інформатика. Управління. – 2008. – №1. – С. 148–153.

27. 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 – ХПШ. Збірник наукових праць – Проблеми автоматизованого електропривода.

Теорія і практика. – Харків: НТУ – ХПШ. – 2005. – №45. – с.134-136.

28. Потапенко, Е. М. Оценка двухфазных неопределенных сигналов при наличии погрешностей датчиков [Текст] / Е. М. Потапенко, Е. Е. Потапенко // Электротехника (Россия). – 2004. – № 6. – С. 29–31.

29. Воротницкий В.Э., Калинкина М.А. Расчет, нормирование и снижение потерь электроэнергии в электрических сетях. Учебно-методическое пособие. 2-е изд. - М.: ИПК госслужбы, 2002. - 57 с.

30. 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.

31. Потапенко, Е. Е. Синтез и анализ компенсационных фильтров многофазных неопределенных сигналов [Текст] / Е. Е. Потапенко, Е. М. Потапенко // Вісник Національного технічного університету ХПШ Тематичний випуск “Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика”. – Харків: НТУ ХПШ, 2003. – Т.2, №10. – С. 342–344.

32. Харечко, Ю.В. Основы заземления электрических сетей и электроустановок зданий. 6-е изд., перераб. и доп. – М.: ПТФ МИЭЭ, 2012. – 304 с.

33. 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.

34. «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.

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

Додаток А

Демонстраційні матеріали до бакалаврської роботи

**Аналіз можливості зменшення споживання електроенергії  
в умовах ПАТ «Запоріжсталь»**