Міністерство освіти і науки України
Криворізький національний університет
Електротехнічний факультет

Пояснювальна записка
до кваліфікаційної роботи бакалавра
за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

«Дослідження та модернізація електропривода вентиляційної установки з використанням частотного перетворювача»

Виконала: здобувачка вищої освіти групи ЕЕМ-22-2 **Марія КОМАРЕНКО**

Керівник випускної роботи _____ к.т.н., доц. Ігор ПЕРЕСУНЬКО

Нормоконтролер _____ к.т.н., доц. Ігор ПЕРЕСУНЬКО

Декан ЕТФ _____ к.т.н., доц. Владислав ФЕДОТОВ

Гарант освітньої програми _____ к.т.н., доц. Ігор ПЕРЕСУНЬКО

Кривий Ріг

2026 р.

Криворізький національний університет

Факультет: електротехнічний

Освітній рівень: бакалавр

Спеціальність: 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

КОМАРЕНКО Марія Олександрівна

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: «Дослідження та модернізація електропривода вентиляційної установки з використанням частотного перетворювача Schneider Electric Altivar Process ATV630»

2. Строк подання студентом роботи: червня 2026 р.

3. Мета та завдання кваліфікаційної роботи: метою роботи є дослідження режимів роботи вентиляційної установки середньої потужності та розробка технічного рішення модернізації електропривода шляхом впровадження частотного перетворювача ATV630D55N4 для підвищення енергоефективності та надійності у гірничо-металургійному виробництві.

4. Зміст пояснювальної записки: аналіз об'єкта як електромеханічної системи; інженерні розрахунки параметрів вентилятора, двигуна та ПЧ; розробка схеми керування та алгоритму адаптивного регулювання; техніко-економічне обґрунтування.

5. Перелік графічного матеріалу: структурна схема модернізованого електропривода; однолінійна схема силового кола; блок-схема алгоритму адаптивного керування; графік залежності потужності від швидкості; порівняльна діаграма електроспоживання.

6. Консультанти розділів роботи:

Розділ	Прізвище, ініціали консультанта	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв
I	Ігор ПЕРЕСУНЬКО		
II	Ігор ПЕРЕСУНЬКО		
III	Ігор ПЕРЕСУНЬКО		

7. Календарний план:

№	Етапи роботи	Термін виконання
1	Видача завдання	Лютий 2026
2	Аналіз літератури та шаблонного об'єкта	Лютий–Березень 2026
3	Розрахунок параметрів вентилятора та двигуна	Березень 2026
4	Вибір та перевірка ПЧ ATV630D55N4	Квітень 2026
5	Розробка схем керування та алгоритму	Квітень 2026
6	Техніко-економічне обґрунтування	Травень 2026
7	Оформлення пояснювальної записки	Травень 2026
8	Перевірка на антиплагіат та здача	Травень–Червень 2026
9	Захист кваліфікаційної роботи	Червень 2026

Дата видачі завдання: лютого 2026 р.

Здобувачка вищої освіти _____ Марія КОМАРЕНКО

(підпис) *(Ім'я Прізвище)*

Керівник роботи _____ Ігор ПЕРЕСУНЬКО

(підпис) *(Ім'я Прізвище)*

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи на тему «Дослідження та модернізація електропривода вентиляційної установки з використанням частотного перетворювача»: 55 с., 14 рис., 16 таблиць, 25 літературних джерел.

Шифр роботи: ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.001-22.

Об'єкт дослідження — електропривод вентиляційної установки середньої потужності цеху дроблення та рудопідготовки гірничо-металургійного підприємства на базі асинхронного двигуна АИР 250М6 потужністю 55 кВт із прямим пуском від мережі та дросельним регулюванням продуктивності.

У першому розділі виконано аналіз вентиляційної установки як електромеханічного об'єкта, описано умови роботи в цеху дроблення, досліджено недоліки існуючого електропривода та обґрунтовано необхідність переходу на частотне регулювання.

У другому розділі виконано розрахунок аеродинамічної потужності вентилятора, перевірено відповідність встановленого двигуна умовам роботи, розраховано режими за законами подібності турбомашин, обґрунтовано вибір частотного перетворювача Schneider Electric ATV630D55N4, розраховано річну економію електроенергії 33,2 МВт·год (27,6%), виконано перевірку кабельної лінії та апаратів захисту.

У третьому розділі розроблено структурну та однолінійну схеми модернізованого електропривода, схему підключення датчиків і сигналів керування. Запропоновано алгоритм адаптивного керування продуктивністю вентилятора на основі інтегрального коефіцієнта промислового навантаження K_пром, що враховує запиленість, температуру, тиск та технологічний режим ділянки. Описано систему захистів (11 видів) та інтеграцію через Modbus TCP.

У четвертому розділі проведено порівняння режимів роботи до та після модернізації, виконано техніко-економічне обґрунтування: капітальні витрати 256 600 грн, річна економія 161 400 грн, простий строк окупності 19 місяців, NPV за 5 років +284 504 грн. Оцінено вплив на надійність та екологічний ефект: скорочення викидів CO_2 на 13,28 т/рік.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ВЕНТИЛЯЦІЙНА УСТАНОВКА, АСИНХРОННИЙ ДВИГУН, ЧАСТОТНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ, SCHNEIDER ELECTRIC ATV630, АДАПТИВНЕ КЕРУВАННЯ.

ЗМІСТ

ВСТУП……..7
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ВЕНТИЛЯЦІЙНОЇ УСТАНОВКИ ЯК ОБ'ЄКТА ЕЛЕКТРОПРИВОДА…… 9
1.1. Характеристика гірничо-металургійного виробництва та місця встановлення вентилятора……... 11
1.2. Технічна характеристика існуючої вентиляційної установки……13
1.3. Аналіз існуючого електропривода……15
1.4. Обґрунтування необхідності модернізації……17
1.5. Огляд сучасних рішень частотного регулювання промислових вентиляторів……17
РОЗДІЛ 2. РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ВЕНТИЛЯТОРА, ДВИГУНА ТА ЧАСТОТНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА……22
2.1. Розрахунок аеродинамічної потужності вентилятора…… 22
2.1.1. Вихідні дані…… 22
2.1.2. Аеродинамічна потужність вентилятора…… 23
2.1.3. Потужність на валу вентилятора ……23
2.1.4. Потужність на валу двигуна ……23
2.1.5. Необхідна встановлена потужність двигуна ……..23
2.1.6. Розрахунок числа Рейнольдса для перевірки режиму течії…….... 24
2.1.7. Аеродинамічний опір мережі……24
2.2. Розрахунок і перевірка параметрів двигуна АИР250М2 ……24
2.2.1. Перевірка номінального струму ……..... 24
2.2.2. Номінальний і максимальний моменти ……24
2.2.3. Пусковий струм — порівняння прямого пуску і пуску від ПЧ …...25
2.2.4. Номінальне ковзання і критичне ковзання ……25

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розробив		Комаренко М.О.			Зміст	Літ.	Арк. 7 / Акрушів 8
Перевірив		Пересунько І.І.					
Н. Контр.		Пересунько І.І.				КНУ гр. ЕЕМ-22-2	
Затвердж.		Пересунько І.І.					

2.3. Закони подібності та енергетичні характеристики вентилятора….26
2.4. Вибір і перевірка частотного перетворювача ATV630D55N4…….28
2.5. Розрахунок добового та річного електроспоживання……31
2.6. Розрахунок кабелів і апаратів захисту
2.7. Оцінка гармонічного складу струму та електромагнітної сумісності...36
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА СХЕМИ МОДЕРНІЗОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА ТА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ……37
3.1. Структурна схема модернізованої системи……..37
3.2. Однолінійна схема силового кола…….39
3.3. Схема керування та сигнали автоматизації……..41
3.4. Розробка алгоритму адаптивного керування продуктивністю…...43
РОЗДІЛ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ МОДЕРНІЗАЦІЇ ТА ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ…….46
4.1. Порівняння методів регулювання продуктивності…….....46
4.2. Розрахунок річного електроспоживання……..47
4.3. Повний економічний розрахунок……..47
4.4. Екологічний ефект……..50
4.5. Оцінка екологічного ефекту……..50
4.6. Практичні рекомендації для впровадження…….51

ВИСНОВКИ…… 52
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ…….54

ВСТУП

Вентиляційні установки промислових підприємств займають особливе місце серед електроприймачів неперервного режиму роботи. В умовах гірничо-металургійного виробництва вентиляційне обладнання функціонує цілодобово, виконуючи одночасно функції загальнообмінного провітрювання виробничих приміщень та аспіраційного відведення технологічного пилу від місць його утворення. Частка вентиляторів у структурі промислового електроспоживання становить від 20 до 30% залежно від типу виробництва.

Традиційні схеми керування, побудовані на прямому пуску асинхронного двигуна від мережі з регулюванням продуктивності дросельною заслінкою, мають принципові недоліки: значні пускові струми (6–7 кратні від номінального), ударні навантаження при кожному пуску, відсутність можливості автоматичного керування. Найголовніша проблема — нераціональне споживання електроенергії при неповній продуктивності. При зниженні подачі до 70% від номінальної дросельне регулювання зменшує споживання лише до 85% від номінального, тоді як частотне регулювання за кубічним законом подібності — до 34%.

Частотні перетворювачі серії Schneider Electric Altivar Process ATV630 спеціально розроблені для технологічних застосувань у важкій промисловості. Вони забезпечують плавний пуск і зупинку двигуна, автоматичне регулювання швидкості за заданим алгоритмом та передачу даних до систем диспетчерського керування через вбудовані інтерфейси Modbus TCP та Ethernet.

Актуальність теми підкреслюється вимогами чинного законодавства України, зокрема Закону «Про енергетичну ефективність», що зобов'язує промислові підприємства впроваджувати заходи раціонального використання енергетичних ресурсів.

Метою бакалаврської кваліфікаційної роботи є дослідження режимів роботи промислової вентиляційної установки та розробка технічного рішення з модернізації її електропривода шляхом впровадження частотного перетворювача Schneider Electric Altivar Process ATV630D55N4 для підвищення енергоефективності, керованості та надійності роботи в умовах гірничо-металургійного виробництва.

Об'єктом дослідження є електропривод вентиляційної установки середньої потужності цеху дроблення на базі асинхронного двигуна АИР 250М6, 55 кВт.

Предметом дослідження є режими роботи, енергетичні характеристики та схемні рішення модернізованого електропривода з частотним перетворювачем ATV630D55N4.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ВЕНТИЛЯЦІЙНОЇ УСТАНОВКИ ЯК ОБ'ЄКТА ЕЛЕКТРОПРИВОДА

1.1. Характеристика гірничо-металургійного виробництва та місця встановлення вентилятора

Гірничо-металургійні підприємства входять до числа найбільш енергоємних промислових об'єктів, де виробничий цикл охоплює видобуток і подрібнення руди, збагачення, агломерацію, виплавку та рафінування металу. На кожному переділі утворюються значні обсяги пилу, аерозолів та газоподібних забруднювачів, відведення яких забезпечується розвиненою вентиляційно-аспіраційною системою.

Цех дроблення та рудопідготовки є першою ланкою технологічного ланцюга переробки залізної руди. Основними агрегатами цеху є щокові та конусні дробарки, грохоти для класифікації подрібненого матеріалу та системи стрічкових конвеєрів. У процесі їх роботи концентрація рудного пилу в повітрі може досягати 50–100 мг/м³ при нормативному значенні 4 мг/м³. Перевищення цієї норми становить пряму загрозу для здоров'я персоналу: тривалий вплив залізорудного пилу спричиняє розвиток пневмоконіозу та інших хронічних захворювань органів дихання.

Для підтримання нормативних санітарно-гігієнічних умов у цеху функціонує дворівнева система вентиляції. Загальнообмінна вентиляція забезпечує регульований повітрообмін в усьому обсязі виробничого приміщення та підтримує загальний температурно-вологісний режим. Місцева аспіраційна вентиляція призначена для відбору пилу безпосередньо від місць його утворення: укриттів дробарок, пересипних вузлів конвеєрів та сит грохотів.

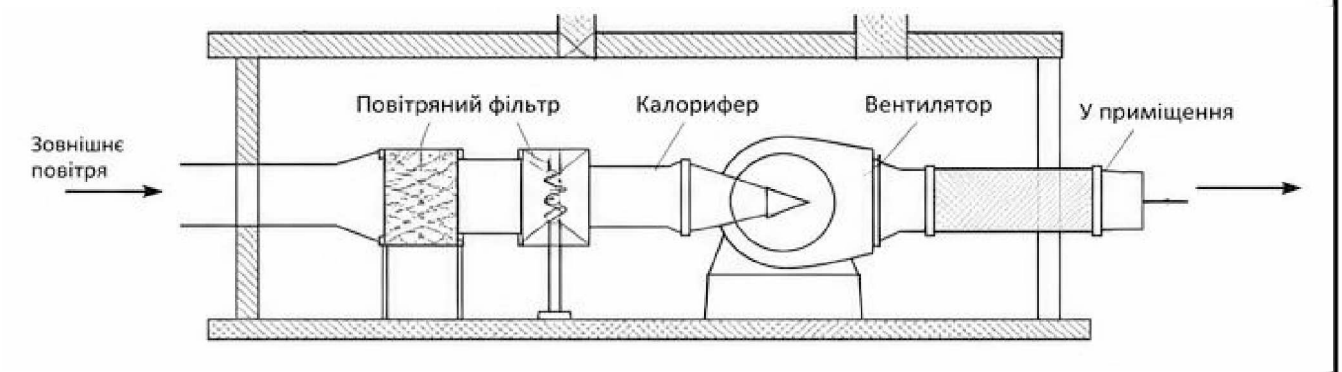


Рисунок 1.1 – Схема вентиляційної установки

Розглянута у даній роботі вентиляційна установка входить до складу системи загальнообмінної вентиляції цеху.

Умови роботи вентиляційної установки в цеху дроблення принципово відрізняються від умов у цивільних або комерційних будівлях. Безперервний режим металургійного виробництва вимагає цілодобової роботи вентиляційної системи — плановий простій допускається лише під час зупинок на капітальний ремонт. Абразивне запилене середовище прискорює знос рухомих частин вентилятора та підшипникових вузлів, що висуває підвищені вимоги до ресурсу конструктивних елементів.

Особливістю режиму роботи є нерівномірність технологічного навантаження протягом доби та тижня. У денні зміни, коли всі дробарки завантажені на повну потужність, витрата повітря повинна відповідати проєктному значенню. У нічні години та під час планових зупинок обладнання достатньо 60–70% від номінальної продуктивності. Саме ця нерівномірність є головним аргументом на користь застосування регульованого електропривода, адже при постійній швидкості двигуна значна частина електроенергії витрачається на подолання штучного опору дросельної заслінки.

На вибір типу і параметрів електропривода впливають три групи факторів. Технологічні: нерівномірний добовий графік навантаження, потреба в автоматичному регулюванні тиску у повітропроводі, необхідність дистанційного моніторингу.

Технічні: підвищена запиленість середовища, вимоги до надійності при безперервній роботі. Економічні: значні витрати на електроенергію при цілодобовій роботі двигуна 55 кВт, необхідність мінімізації витрат на технічне обслуговування.

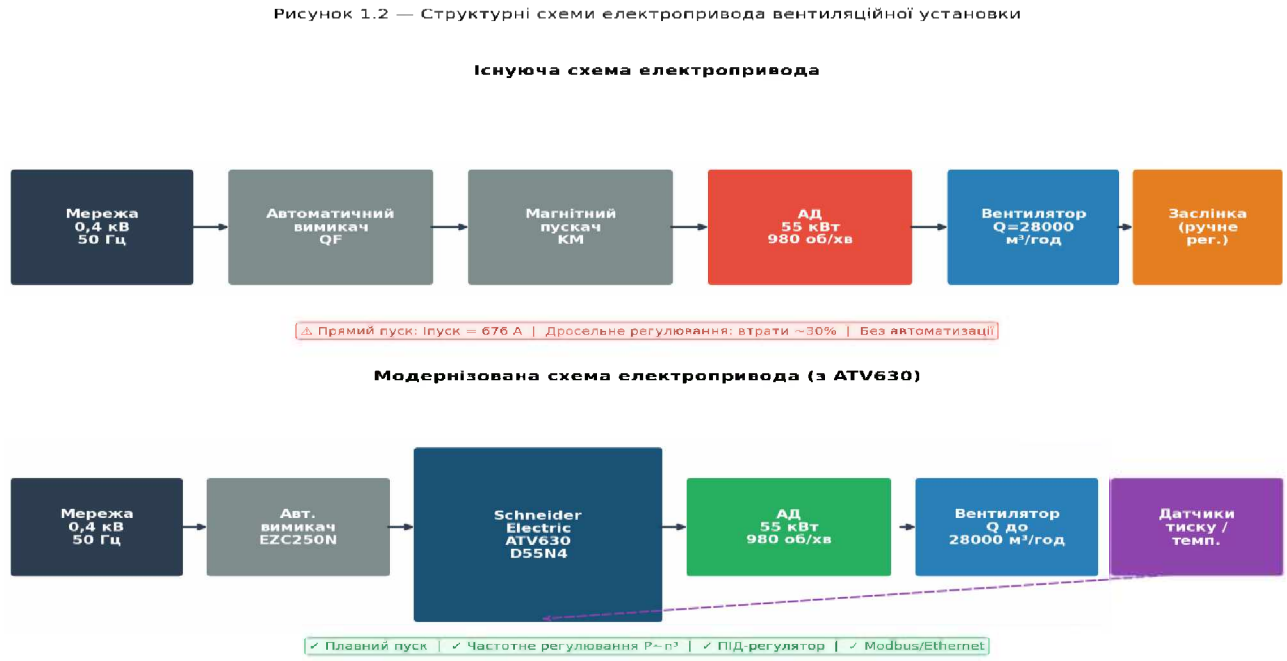


Рисунок 1.2 — Структурні схеми електропривода вентиляційної установки: існуюча (зверху) та модернізована (знизу)

1.2. Технічна характеристика існуючої вентиляційної установки

Існуюча вентиляційна установка являє собою відцентровий вентилятор середнього тиску, конструктивно з'єднаний з асинхронним електродвигуном через пружну муфту з гумовими зірочками. Вентилятор виконано в конструктивному виконанні для роботи в умовах запиленого середовища: робоче колесо виготовлене зі зносостійкої сталі, а лопаті мають профіль, оптимальний для транспортування запиленого повітряного потоку.

Вентилятор і двигун розміщені на спільній зварній рамі з армованими опорами та вібропоглинаючими підкладками. Вхідний патрубок з'єднаний з повітропровідною мережею через гнучку вставку, яка компенсує температурне розширення та вібрації.

На вхідному патрубку встановлено регулювальну дросельну заслінку з ручним приводом — єдиний засіб регулювання продуктивності в існуючій схемі.

Схема живлення і керування двигуном включає: кабельну лінію від розподільного пункту цеху, автоматичний вимикач, магнітний пускач і теплове реле. Пуск двигуна здійснюється прямим підключенням до трифазної мережі 380 В, 50 Гц натисканням кнопки «Пуск» на місцевому посту або з операторської кімнати.

Основні технічні параметри вентиляційної установки зведено в таблицю 1.1.

Таблиця 1.1 — Технічні характеристики існуючої вентиляційної установки

Параметр	Значення
Тип вентилятора	Відцентровий, середнього тиску
Призначення	Загальнообмінна вентиляція цеху дроблення
Подача повітря Q, м³/год	28 000
Повний тиск Δp, Па	1 450
ККД вентилятора η_вент	0,78
Частота обертання робочого колеса n, об/хв	980
Спосіб регулювання продуктивності	Дросельна заслінка (ручна)
Тип електродвигуна	Асинхронний трифазний з КЗР
Марка електродвигуна	АИР 250М6
Номінальна потужність P_ном, кВт	55
Номінальна напруга U_ном, В	380
Номінальний струм I_ном, А	104
Коефіцієнт потужності cos φ	0,87
ККД двигуна η_дв	0,92
Спосіб пуску	Прямий від мережі
Режим роботи	Тривалий (S1)
Ступінь захисту двигуна	IP55
Кліматичне виконання	У3

Вентилятор функціонує у тривалому режимі S1 без автоматичного регулювання. Черговий персонал змінює положення заслінки вручну залежно від поточного завантаження технологічної ділянки, що вносить суб'єктивний чинник і не гарантує оптимального режиму роботи з точки зору енергоефективності.

1.3. Аналіз існуючого електропривода

Існуючий електропривод вентиляційної установки побудований за нерегульованою схемою прямого пуску. Асинхронний двигун з короткозамкненим ротором живиться безпосередньо від трифазної мережі через магнітний пускач і автоматичний вимикач. Схема керування реалізована на релейно-контакторній елементній базі і передбачає лише два стани: «увімкнено» і «вимкнено».

Великі пускові струми. При прямому підключенні до мережі кидок струму асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором перевищує номінальне значення в 6,5 рази. Для двигуна АИР 250М6 з I_ном = 104 А пусковий струм становить 676 А. Такий кидок тривалістю 0,27 с при кожному пуску спричиняє прискорену деградацію ізоляції обмоток, знос контактів пускача та просідання напруги в мережі цеху.

Ударні механічні навантаження. Розгін двигуна за 0,27 с супроводжується ударним кидком електромагнітного моменту 750 Н·м — у 1,4 рази вище номінального. Цей удар передається через пружну муфту на вал вентилятора та підшипникові вузли. При 500 пусках на рік накопичена втома металу призводить до передчасного зносу підшипників і деформації пружних елементів муфти.

Неможливість регулювання швидкості. Частота обертання двигуна визначається частотою мережі та залишається постійною незалежно від реальної потреби у вентиляції. Дросельна заслінка лише збільшує аеродинамічний опір на вході, тоді як двигун продовжує споживати потужність, близьку до номінальної.

Нераціональне споживання при дросельному регулюванні. При зниженні подачі до 70% від номінальної двигун споживає близько 85% номінальної потужності — проти 34% при частотному регулюванні. Різниця у 51 відсотковий пункт є прямою перевитратою електроенергії.

Обмежена захищеність обладнання. Схема передбачає лише два види захисту: тепловий від перевантаження та електромагнітний від КЗ. Захист від обриву фази, асиметрії напруг, перегріву підшипників та вібрації відсутній.

Відсутність моніторингу та автоматизації. Схема не передбачає передачі жодних даних до верхнього рівня автоматизації. Облік електроенергії, реєстрація аварій, дистанційний моніторинг та архівування — все це потребує окремого обладнання.

Таблиця 1.2 — Зведена оцінка недоліків існуючого електропривода

Недолік	Технічний наслідок	Економічний наслідок
Прямий пуск (I_пуск = 676 А)	Знос ізоляції, контактів, муфти	Позапланові ремонти
Ударний момент (750 Н·м)	Знос підшипників, рами	Скорочення ресурсу
Дросельне регулювання	Нераціональне споживання	Перевитрата ел/ен 15–60%
Постійна швидкість	Надлишкова продуктивність	Зайве споживання
Відсутність автоматизації	Ручне керування	Залежність від персоналу
Обмежений захист (2 види)	Ризик аварійних відмов	Незаплановані зупинки
Відсутність моніторингу	Немає обліку та аналізу	Неможливість оптимізації

1.4. Обґрунтування необхідності модернізації

Системний характер виявлених недоліків унеможливлює їх усунення частковими заходами — необхідний перехід на принципово інший тип електропривода. Цей висновок підкреслює дія кількох незалежних чинників одночасно.

З енергетичного погляду дросельне регулювання фізично не здатне забезпечити той самий рівень споживання, що і частотне, при неповній продуктивності. При подачі 70% різниця становить 51 відсотковий пункт. Річна перевитрата за типовим добовим графіком — понад 33 МВт·год.

З погляду надійності ударні навантаження при прямому пуску суттєво скорочують ресурс підшипників (у 1,5–2 рази) та пружної муфти (вдвічі). При 500 пусках на рік це призводить до більш частих планових замін та підвищеної ймовірності аварій.

З погляду автоматизації сучасні вимоги до промислових підприємств передбачають інтеграцію всіх систем у єдину SCADA-платформу. Частотний перетворювач ATV630D55N4 з вбудованими інтерфейсами Modbus TCP та Ethernet дозволяє реалізувати повноцінний моніторинг без додаткового обладнання.

З правового погляду Закон України «Про енергетичну ефективність» зобов'язує великі промислові підприємства розробляти програми підвищення енергоефективності. Впровадження ПЧ на вентиляційну установку є першочерговим заходом з терміном окупності до двох років.

1.5. Огляд сучасних рішень частотного регулювання промислових вентиляторів

Частотне регулювання швидкості асинхронних двигунів набуло масового поширення у промисловості з 1990-х років. Ринок ПЧ для вентиляторних застосувань є одним з найбільших сегментів промислового електропривода.

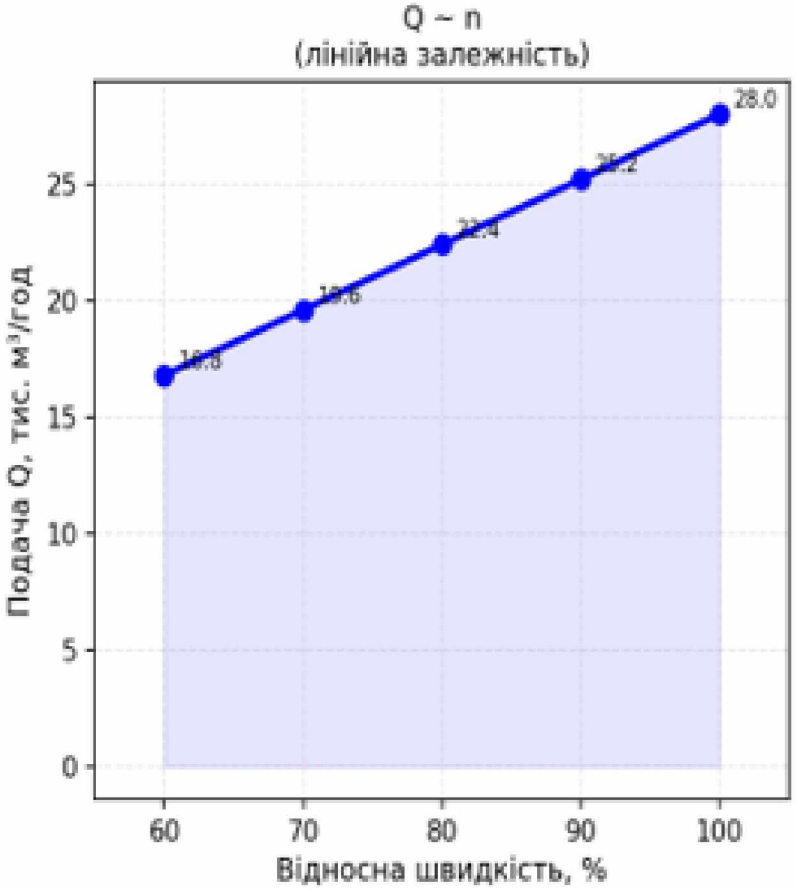
Сучасні ПЧ поділяються на дві категорії: загального призначення та спеціалізовані для насосно-вентиляторних застосувань з вбудованим ПІД-регулятором, функцією «сон» та розширеною діагностикою.

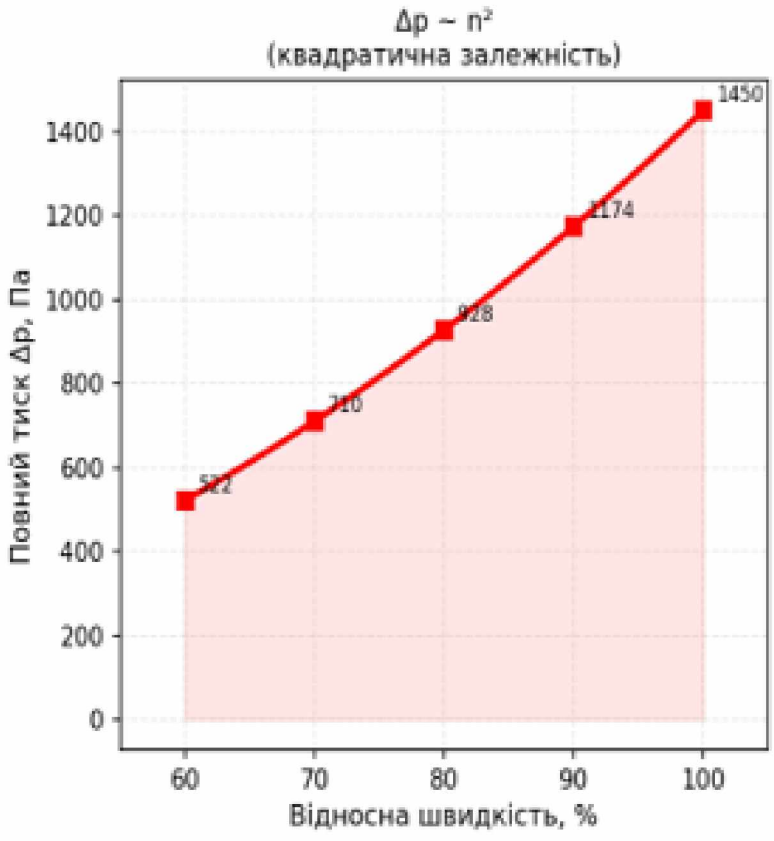
Schneider Electric Altivar Process ATV630. Флагманська серія для технологічних застосувань у важкій промисловості. Розроблено для роботи в умовах підвищеної запиленості та вологості, тривалого безперервного режиму та потреби в інтеграції з промисловими мережами. Серія охоплює потужності від 0,75 до 800 кВт, підтримує скалярний режим U/f та векторне керування SVC.

Конкуруючі рішення. ABB ACS880 та ACS580 — широкий діапазон потужностей, розвинена діагностика; Siemens SINAMICS G150 — підвищений ресурс для безперервних виробництв; Danfoss FC102 — оптимізований для насосно-вентиляторних застосувань. Для умов гірничо-металургійного виробництва серія ATV630 є оптимальним вибором завдяки технічним характеристикам та сервісному супроводу.

Практичний досвід впровадження підтверджує зниження споживання на 20–50% залежно від профілю навантаження. Для металургійних підприємств найбільш репрезентативне значення — 25–35% при типовому нерівномірному завантаженні. Термін простої окупності для вентиляторів 45–75 кВт становить 1,5–2,5 роки.

Обґрунтування вибору Schneider Electric ATV630D55N4: на підприємстві вже встановлено кілька одиниць обладнання Schneider Electric (апарати захисту, ПЛК Modicon), тому вибір ATV630 дозволить уніфікувати сервісне обслуговування і запасні частини. Крім того, функція Simple Start автоматично визначає оптимальний алгоритм пуску для конкретного навантаження без ручного налаштування — що є суттєвим плюсом для умов аглодільниці зі складним технологічним режимом.


Q ~ n
(лінійна залежність)
Подача Q, тис. м³/год
Відносна швидкість, %
0
5
10
15
20
25
60
70
80
90
100
16.8
19.6
22.4
25.2
28.0


Δp ~ n²
(квадратична залежність)
Повний тиск Δp, Па
Відносна швидкість, %
0
200
400
600
800
1000
1200
1400
60
70
80
90
100
522
710
928
1174
1450

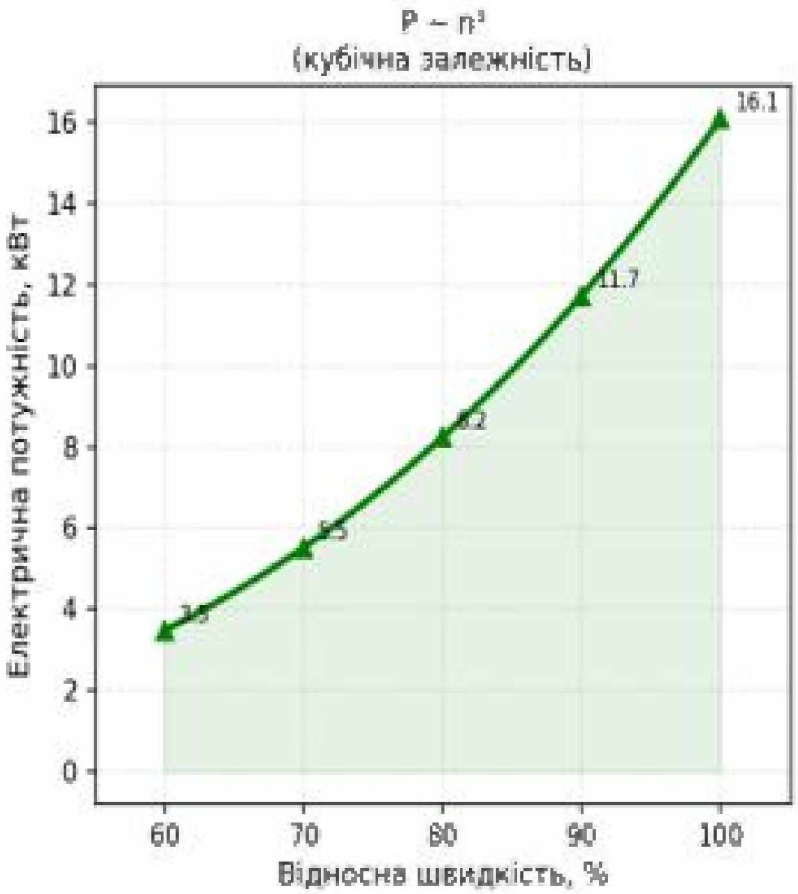


Рисунок 1.3 — Залежності Q~n, Δp~n², P~n³ (закони подібності вентилятора)

Таблиця 1.3 – Порівняльний аналіз частотних перетворювачів для вентиляторного навантаження 55 кВт

Виробник / серія	P, кВт	Вбудований PID	Протоколи зв'язку	Ціна (орієнт.), грн	Переваги для даного застосування
Schneider Electric ATV630D55N4	55	Так	Modbus, EtherNet/IP	95 000	Спеціалізована насосно-вент. серія; Simple Start; вбуд. лічильник енергії
ABB ACQ580-01-106A-4	55	Так	Modbus, EtherNet/IP, Profibus	102 000	Energy Optimizer; вбуд. EMC-фільтр; Bluetooth для налагодження
Siemens SINAMICS G120 PM250	55	Через CU240E-2	Profibus, Profinet	98 000	Safety Integrated; модульна конструкція; найкраща інтеграція з Siemens PLC
Danfoss FC102-P55KT4E20H1	55	Так	Modbus, Profibus, EtherNet	89 000	Auto Energy Optimization; добрий сервіс в Україні

РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ВЕНТИЛЯТОРА, ДВИГУНА ТА ЧАСТОТНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА

2.1. Розрахунок аеродинамічної потужності вентилятора

Аеродинамічний розрахунок виконується для визначення фактичних параметрів вентилятора в реальних умовах роботи і є вихідною точкою для перевірки двигуна і вибору ПЧ.

Основним завданням вентиляційної установки є забезпечення необхідної

витрати повітря та створення потрібного тиску в системі повітропроводів. Для вибору параметрів електропривода необхідно визначити потужність, яку повинен розвивати вентилятор у номінальному режимі роботи.

2.1.1. Вихідні дані

Таблиця 2.1 – Вихідні параметри для аеродинамічного розрахунку

Параметр	Позначення	Значення	Одиниця
Об'ємна витрата (подача)	Q	15 000 / 4,167	м³/год / м³/с
Повний тиск аеродинамічної мережі	Δp_сист	3 800	Па
ККД вентилятора в робочій точці	η_вент	0,82	—
ККД муфти МУВП 250	η_пер	0,98	—
ККД двигуна АИР250М2	η_дв	0,93	—
Щільність повітря при T = 20°C	P	1,205	кг/м³
Кінематична в'язкість повітря	N	$1{,}51 \times 10^{-5}$	м²/с
Коефіцієнт запасу потужності	k_з	1,15	—

2.1.2. Аеродинамічна потужність вентилятора

Аеродинамічна потужність — це потужність, яку вентилятор фактично передає повітряному потоку. Вона визначається як:

$$P_{аер} = Q \cdot \Delta p_{сист} \quad (2.1)$$

$$P_{аер} = 4{,}167 \cdot 3\,800 = 15\,835\ Вт$$

$P_{аер}$ = 15,84 кВт

2.1.3. Потужність на валу вентилятора

З урахуванням механічних і аеродинамічних втрат у самому вентиляторі (ρ і $\eta_{вент}$):

$$P_{вал} = P_{аер} / \eta_{вент} \quad (2.2)$$

$$P_{вал} = 15\,835 / 0{,}82 = 19\,311\ Вт$$

$P_{вал}$ = 19,31 кВт

2.1.4. Потужність на валу двигуна

З урахуванням втрат у муфті ($\eta_{пер}$ = 0,98):

$$P_{дв_розр} = P_{вал} / \eta_{пер} \quad (2.3)$$

$$P_{дв_розр} = 19\,311 / 0{,}98 = 19\,705\ Вт$$

$P_{дв_розр}$ = 19,71 кВт

2.1.5. Необхідна встановлена потужність двигуна

Вибір двигуна виконується з коефіцієнтом запасу $k_з$, який враховує можливе збільшення опору мережі при забрудненні фільтрів і нерівномірність режимів:

$$P_{дв_вибір} = k_з \cdot P_{дв_розр} / \eta_{дв} = 1{,}15 \cdot 19\,705 / 0{,}93 \quad (2.4)$$

$$P_{дв_вибір} = 1{,}15 \cdot 21\,188 = 24\,366\ Вт$$

$P_{дв_вибір}$ = 24,37 кВт

Встановлений двигун АИР250М2 має $P_{ном}$ = 55 кВт. Запас потужності:

$$k_{запас} = P_{ном} / P_{дв_вибір} = 55\,000 / 24\,366 = 2{,}26 \quad (2.5)$$

2.1.6. Розрахунок числа Рейнольдса для перевірки режиму течії

Перевіримо режим течії у повітропроводі діаметром D_пр = 0,8 м. Спочатку визначимо швидкість потоку:

$$v_{пр} = Q / (\pi \cdot D_{пр}^2 / 4) = 4{,}167 / (3{,}1416 \cdot 0{,}64 / 4) = 4{,}167 / 0{,}5027 = 8{,}29 \text{ м/с} \quad (2.6)$$

Число Рейнольдса:

$$Re = v_{пр} \cdot D_{пр} / \nu = 8{,}29 \cdot 0{,}8 / 1{,}51 \times 10^{-5} = 439\,470 \quad (2.7)$$

Re = 439 470 ≫ 4 000 → течія турбулентна

Турбулентний режим підтверджує правомірність використання стандартних таблиць аеродинамічного опору ПУЕ для розрахунку мережі.

2.1.7. Аеродинамічний опір мережі

Характеристика мережі повітропроводів описується квадратичною залежністю тиску від витрати. Визначимо питомий опір мережі R:

$$R = \Delta p_{сист} / Q^2 = 3\,800 / (4{,}167)^2 = 3\,800 / 17{,}36 = 218{,}9 \ \text{Па·с}^2/\text{м}^6 \quad (2.8)$$

Ця величина знадобиться при перевірці робочих точок при різних частотах ПЧ.

2.2. Розрахунок і перевірка параметрів двигуна АИР250М2

2.2.1. Перевірка номінального струму

$$I_{ном} = P_{ном} / (\sqrt{3} \cdot U_{ном} \cdot \eta_{дв} \cdot \cos\varphi_{ном}) \quad (2.9)$$

$$I_{ном} = 55\,000 / (1{,}7321 \cdot 380 \cdot 0{,}93 \cdot 0{,}89) = 55\,000 / 544{,}8 = 101{,}0 \text{ А}$$

Розрахунок: 101,0 А; паспорт: 103 А; похибка 1,9%

2.2.2. Номінальний і максимальний моменти

$$M_{ном} = 9\,550 \cdot P_{ном} / n_{ном} = 9\,550 \cdot 55 / 2\,960 = 177{,}4 \text{ Н·м} \quad (2.10)$$

$$M_{max} = k_{Mmax} \cdot M_{ном} = 2{,}8 \cdot 177{,}4 = 496{,}7 \text{ Н·м} \quad (2.11)$$

$$M_{п} = k_{п_M} \cdot M_{ном} = 1{,}4 \cdot 177{,}4 = 248{,}4 \text{ Н·м} \quad (2.12)$$

2.2.3. Пусковий струм — порівняння прямого пуску і пуску від ПЧ

При прямому пуску від мережі:

$$I_п_прямий = k_п \cdot I_ном = 7{,}0 \cdot 103 = 721\ А \quad (2.13)$$

При пуску від ATV630 (внутрішній обмежувач струму):

$$I_п_ПЧ \leq 1{,}1 \cdot I_ном = 1{,}1 \cdot 103 = 113{,}3\ А \quad (2.14)$$

Зниження пускового струму: 721 / 113,3 = 6,4 рази.

2.2.4. Номінальне ковзання і критичне ковзання

$$s_ном = (n_sync - n_ном) / n_sync = (3\,000 - 2\,960) / 3\,000 = 0{,}0133 \ (1{,}33\% \quad (2.15)$$

$$s_кр = s_ном \cdot (k_Mmax + \sqrt{(k^2_Mmax - 1)}) = 0{,}0133 \cdot (2{,}8 + \sqrt{(7{,}84 - 1)}) \quad (2.16)$$

$$s_кр = 0{,}0133 \cdot (2{,}8 + 2{,}615) = 0{,}0133 \cdot 5{,}415 = 0{,}072 \ (7{,}2\%)$$

$$n_кр = n_sync \cdot (1 - s_кр) = 3\,000 \cdot 0{,}928 = 2\,784\ об/хв \quad (2.17)$$

2.2.5. Розрахунок cosφ при частковому навантаженні (без ПЧ)

При роботі двигуна з механічним навантаженням 70% від номінального без ПЧ:

$$I_a_70 = (P_вал \cdot 0{,}70) / (\sqrt{3} \cdot U_ном \cdot \eta_дв) = 13\,518 / (1{,}732 \cdot 380 \cdot 0{,}93) = 22{,}1\ А \quad (2.18)$$

$$I_\mu = I_ном \cdot \sin \varphi_ном = 103 \cdot \sin(\arccos 0{,}89) = 103 \cdot 0{,}456 = 47{,}0\ А \quad (2.19)$$

$$I_70 = \sqrt{(I_a^2 + I_\mu^2)} = \sqrt{(22{,}1^2 + 47{,}0^2)} = \sqrt{(488{,}4 + 2\,209)} = 51{,}9\ А \quad (2.20)$$

$$\cos \varphi_70 = I_a_70 / I_70 = 22{,}1 / 51{,}9 = 0{,}426 \quad (2.21)$$

cosφ знижується з 0,89 до 0,43 при частковому навантаженні має значне погіршення.

2.2.6. Теплова перевірка двигуна при роботі на знижених частотах

При роботі двигуна нижче 50 Гц самовентиляція крильчатки на валу знижується, і допустимий струм зменшується:

$$I_доп_f = I_ном \cdot (f / f_ном)^{0,3} \quad (2.22)$$

При f = 25 Гц (мінімальна робоча частота):

$$I_доп_25 = 103 \cdot (25/50)^{0,3} = 103 \cdot 0,5^{0,3} = 103 \cdot 0,812 = 83,6\ А \quad (2.23)$$

Фактичний струм при 25 Гц (50% навантаження за кубічним законом):

$$I_факт_25 \approx I_ном \cdot (n_2/n_1)^3 \times (1/\eta_відн) \approx 103 \cdot 0,5^3 \cdot 1,05 = 103 \cdot 0,131 = 13,5 \quad (2.24)$$

13,5 А ≪ 83,6 А

двигун не перегрівається при роботі на 25 Гц .

2.3. Закони подібності та енергетичні характеристики вентилятора

Закони подібності для лопаткових машин (пропорційні закони) виводяться з теорії гідродинамічної подібності при постійному діаметрі робочого колеса і постійній щільності середовища:

$$Q_2/Q_1 = n_2/n_1 \quad (подача — лінійна залежність) \quad (2.25)$$

$$H_2/H_1 = (n_2/n_1)^2 \quad (тиск — квадратична залежність) \quad (2.26)$$

$$P_2/P_1 = (n_2/n_1)^3 \quad (потужність — кубічна залежність) \quad (2.27)$$

Фізичний сенс: витрата визначається швидкістю частинок у каналах колеса (~n); тиск залежить від кінетичної енергії (~v^2 ~ n^2); потужність є добутком тиску і витрати (~n^3). Кубічна залежність — ключова перевага для вентиляторного навантаження: зменшення швидкості на 30% дає зниження потужності у $(0,7)^3$ = 0,343 рази, тобто до 34% від початкової.

Розрахунок для f = 35 Гц:

$n_2/n_1 = 35/50 = 0{,}700$ (2.28)

$Q_2 = 15\,000 \cdot 0{,}700 = 10\,500\ м^3/год$ (2.29)

$H_2 = 3\,800 \cdot 0{,}700^2 = 3\,800 \cdot 0{,}490 = 1\,862\ Па$ (2.30)

$P_вал_2 = 19{,}31 \cdot 0{,}700^3 = 19{,}31 \cdot 0{,}343 = 6{,}62\ кВт$ (2.31)

$P_ел_2 = P_вал_2 / (\eta_дв \cdot \eta_пч) = 6{,}62 / (0{,}93 \cdot 0{,}961) = 7{,}41\ кВт$ (2.32)

При 35 Гц: Q = 10 500 м³/год, H = 1 862 Па, P_ел = 7,41 кВт

Таблиця 2.2 – Зведені параметри вентилятора при частотному регулюванні

f, Гц	n_2/n_1	Q, м³/год	H, Па	P_вал, кВт	P_ел (ПЧ), кВт	P_ел (заслінка), кВт	Економія, кВт
50,0	1,000	15 000	3 800	19,31	21,5	21,5	0,0
47,5	0,950	14 250	3 430	16,51	18,4	20,2	1,8
45,0	0,900	13 500	3 078	14,08	15,7	19,0	3,3
42,5	0,850	12 750	2 745	11,87	13,3	17,7	4,4
40,0	0,800	12 000	2 432	9,89	11,1	16,4	5,3
37,5	0,750	11 250	2 138	8,11	9,1	15,1	6,0
35,0	0,700	10 500	1 862	6,62	7,4	13,7	6,3
32,5	0,650	9 750	1 606	5,16	5,9	12,4	6,5
30,0	0,600	9 000	1 368	3,94	4,5	11,0	6,5
25,0	0,500	7 500	950	1,96	2,3	8,3	6,0

Перевірка відповідності робочої точки характеристиці мережі при f = 35 Гц:

$$H_мер(Q_2) = R \cdot Q_2^2 = 218{,}9 \cdot (2{,}917)^2 = 218{,}9 \cdot 8{,}509 = 1\ 862\ Па \qquad (2.33)$$

Н_мер = H_2 = 1 862 Па

2.4. Вибір і перевірка частотного перетворювача ATV630D55N4

2.4.1. Умови і критерії вибору

Для вентиляторного навантаження (квадратичний момент M ~ n^2) використовується режим Normal Duty (ND). Основна умова вибору:

$$I_пч_ND \geq I_ном_дв \quad \rightarrow \quad I_пч_ND \geq 103\ А \qquad (2.34)$$

Рисунок 2.1 - Частотний перетворювач Schneider Electric Altivar Process ATV630D55N4

На рисунку ми бачимо:

1 - Панель керування

2 - Знімна панель (кришка)

3 - Корпус

4 - Паспортна табличка

5 - Монтажна пластина

6 - Клеми керування (під кришкою)

Рисунок 2.2 - Частотний перетворювач Schneider Electric Altivar Process ATV630D55N4

Основні характеристики

• Потужність: 55 кВт (75 HP)

• Напруга живлення: 380...480 В, 3ф, 50/60 Гц

• Номінальний струм: 116 А

• Ступінь захисту: IP21 / UL Type 1

• Перевантаження:

120% протягом 60 с

• Комунікації: Modbus, Ethernet/IP, Profinet (опційно)

• Монтаж: настінний / шафовий

Таблиця 2.3 – Технічні характеристики ATV630D55N4

Параметр	Значення	Вимога	Статус
Потужність (Normal Duty)	55 кВт	55 кВт	+
Вихідний струм (ND)	105 А	103 А	(+2%)
Перевантаження (ND)	110% × 60 с; 120% × 2 с	Пуск вентилятора	+
Вхідна напруга	380–480 В ±10%	380 В	+
Частота	50/60 Гц	50 Гц	+
Ступінь захисту	IP21 (у шафі)	IP21	+
Температура Тнав	−10…+50°C (з derating > 40°C)	До +45°C	+ (потрібна вентиляція шафи)
Вбудований PID	Так, з ПЗЗ і зоною нечутливості	Потрібен	+
Лічильник енергії	Так, кВт·год	Потрібен	+
Протоколи зв'язку	Modbus RTU + TCP (опц.)	Modbus RTU	+
Габарити В×Ш×Г, мм	507×300×296	—	—
Маса	22,5 кг	—	—

2.4.2. Перевірка за перевантажувальною здатністю при пуску

$$I_n_ПЧ \leq 1{,}10 \cdot I_ND = 1{,}10 \cdot 105 = 115{,}5\ А \quad (2.35)$$

$$I_n_двигуна = 1{,}10 \cdot I_ном_дв = 1{,}10 \cdot 103 = 113{,}3\ А \leq 115{,}5\ А \quad (2.36)$$

2.4.3. Перевірка за температурою навколишнього середовища (derating)

При T_нав > 40°C допустимий струм ПЧ знижується:

$$I_доп_T = I_ND \cdot (1 - 0{,}02 \cdot (T_нав - 40°C)) \quad (2.37)$$

При T_нав = 45°C (максимальна влітку):

$$I_доп_45 = 105 \cdot (1 - 0{,}02 \cdot 5) = 105 \cdot 0{,}90 = 94{,}5\ А\ <\ 103\ А \quad (2.38)$$

Рішення: встановити ATV630 у шафі з примусовою вентиляцією, що забезпечить T_нав ≤ 40°C

Витрата охолоджуючого повітря для шафи (теплові втрати ПЧ при PN: ΔP_пч ≈ 580 Вт):

$$Q_{шафа} = \Delta P_{пч} / (\rho \cdot c_{пов} \cdot \Delta T) = 580 / (1{,}205 \cdot 1005 \cdot 10) = 0{,}048\ м^3/с = 173\ м^3/год \quad (2.39)$$

2.5. Розрахунок добового та річного електроспоживання

2.5.1. Добовий графік навантаження

Таблиця 2.4 – Добовий графік навантаження вентиляційної установки (типова доба)

Час доби	Режим дільниці	Q/Qном, %	f ПЧ, Гц	P_до (заслінка), кВт	P_пч (ПЧ), кВт	Економія, кВт
00:00–06:00	Нічний черговий режим	60	30,0	14,2	4,5	9,7
06:00–08:00	Запуск виробництва	75	37,5	15,8	9,1	6,7
08:00–12:00	Повне навантаження	100	50,0	21,5	21,5	0,0
12:00–13:00	Обідня перерва	70	35,0	14,8	7,4	7,4
13:00–17:00	Повне навантаження	100	50,0	21,5	21,5	0,0
17:00–19:00	Завершення змін	80	40,0	16,5	11,1	5,4
19:00–22:00	Вечірня зміна (знижена)	85	42,5	17,6	13,3	4,3
22:00–00:00	Мінімальний режим	65	32,5	14,4	5,9	8,5

2.5.2. Добове споживання

$$E_{добова_до} = 14{,}2 \cdot 6 + 15{,}8 \cdot 2 + 21{,}5 \cdot 4 + 14{,}8 \cdot 1 + 21{,}5 \cdot 4 + 16{,}5 \cdot 2 + 17{,}6 \cdot 3 + 14{,}4 \cdot 2 \quad (2.40)$$

$$E_{добова_до} = 85{,}2 + 31{,}6 + 86{,}0 + 14{,}8 + 86{,}0 + 33{,}0 + 52{,}8 + 28{,}8 = 418{,}2 \text{ кВт·год}$$

$$E_{добова_пч} = 4{,}5 \cdot 6 + 9{,}1 \cdot 2 + 21{,}5 \cdot 4 + 7{,}4 \cdot 1 + 21{,}5 \cdot 4 + 11{,}1 \cdot 2 + 13{,}3 \cdot 3 + 5{,}9 \cdot 2 \quad (2.41)$$

$$E_{добова_пч} = 27{,}0 + 18{,}2 + 86{,}0 + 7{,}4 + 86{,}0 + 22{,}2 + 39{,}9 + 11{,}8 = 298{,}5 \text{ кВт·год}$$

$$\Delta E_{добова} = 418{,}2 - 298{,}5 = 119{,}7 \text{ кВт·год/добу} \quad (2.42)$$

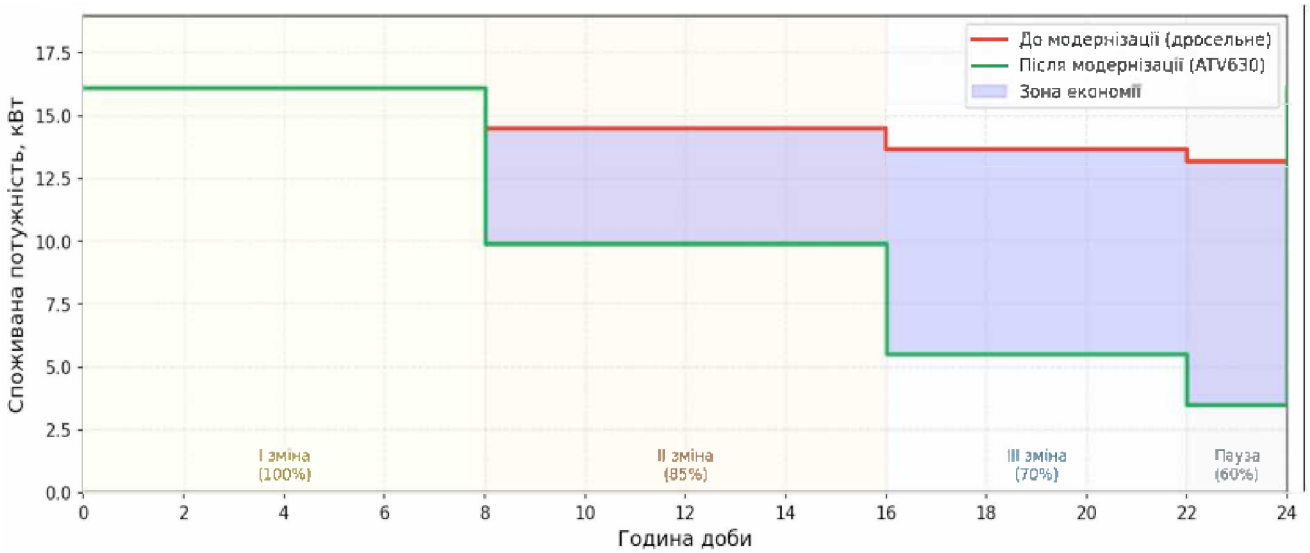


Рисунок 2.3 — Добовий графік електроспоживання до та після модернізації

2.5.3. Річне споживання і економія

Кількість робочих діб: N_роб = 350 (з урахуванням планових зупинок).

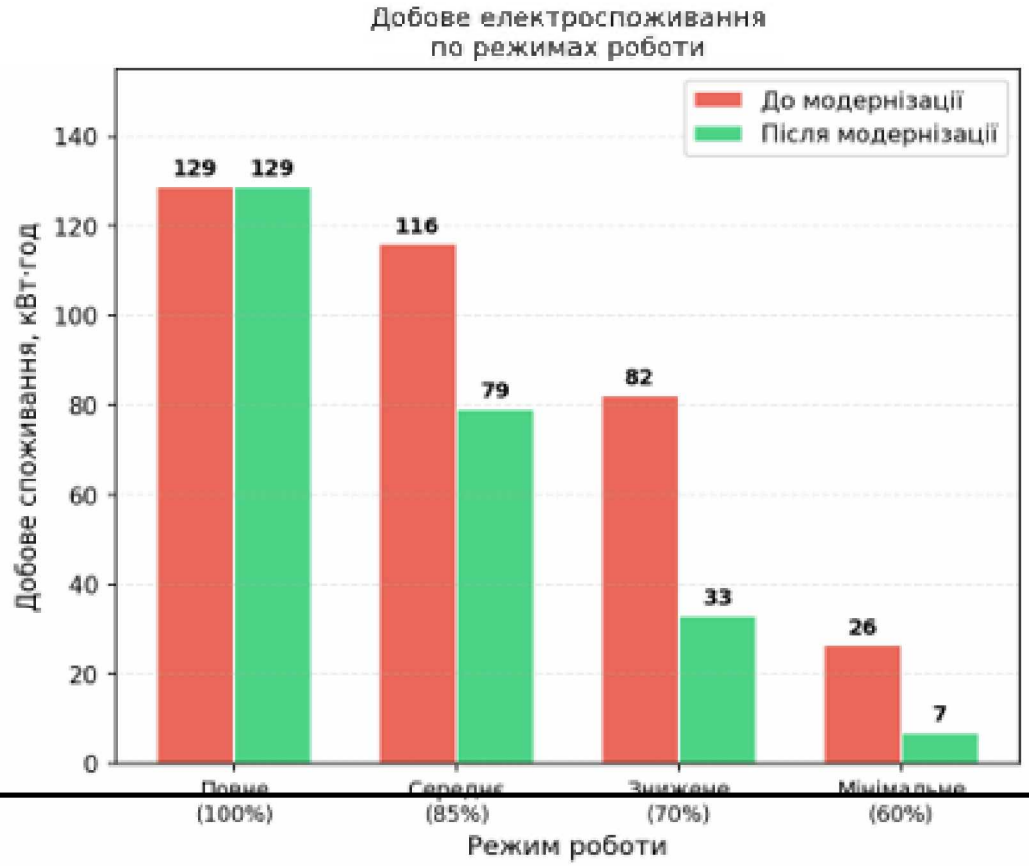
$$E_{рік_до} = 418{,}2 \cdot 350 = 146\,370 \text{ кВт·год/рік} \quad (2.43)$$

$$E_{рік_пч} = 298{,}5 \cdot 350 = 104\,475 \text{ кВт·год/рік} \quad (2.44)$$

$$\Delta E_{рік} = 146\,370 - 104\,475 = 41\,895 \text{ кВт·год/рік} \quad (2.45)$$

$$\delta E = \Delta E_рік / E_рік_до \cdot 100\% = 41\ 895 / 146\ 370 \cdot 100\% = 28{,}6\% \quad (2.46)$$

Річна економія: 41 895 кВт·год (28,6% від поточного рівня).



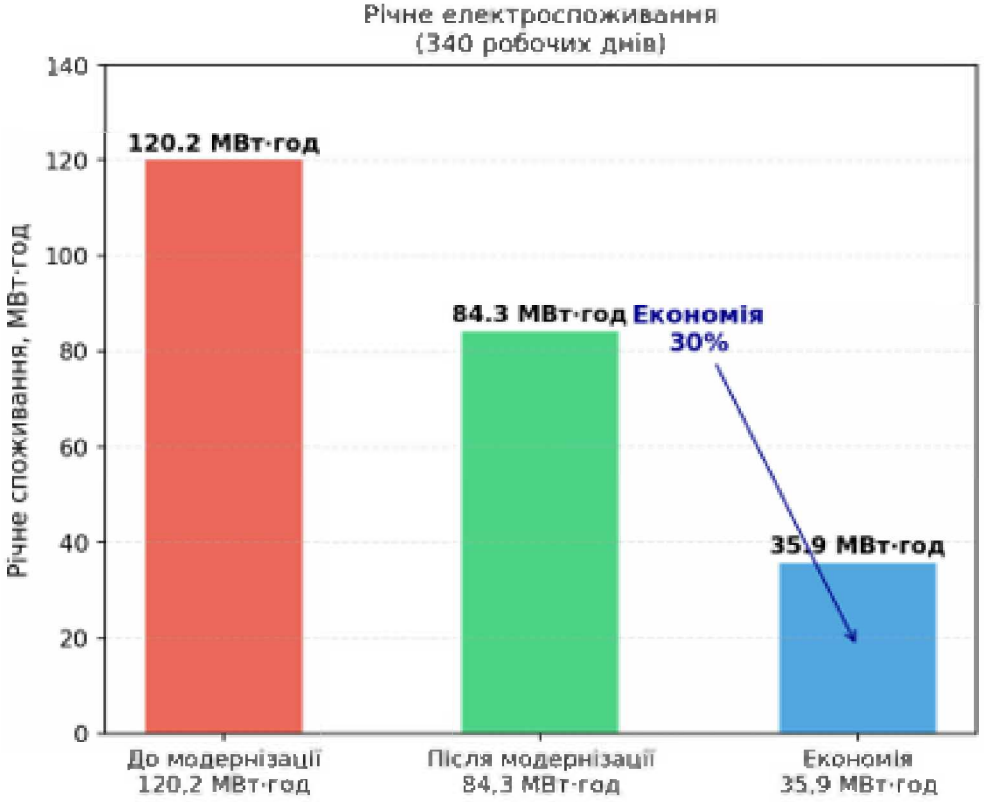


Рисунок 2.5 — Порівняння річного електроспоживання та розподіл економії

2.6. Розрахунок кабелів і апаратів захисту

2.6.1. Кабель живлення ПЧ від мережі (ВВГ 3×70+1×35)

$$I_{розр} = I_{ND_пч} = 105\ А \quad (2.47)$$

Для прокладки у трубі коефіцієнт зниження k_пр = 0,75:

$$I_{потрібний} = 105 / 0{,}75 = 140\ А \quad (2.48)$$

За ПУЕ табл. 1.3.5 для ВВГ 3×70 мм² у трубі: I_доп = 145 А > 140 А.

Перевірка падіння напруги (ρ_Cu = 0,0175 Ом·мм²/м, l = 25 м):

$$\Delta U = \sqrt{3} \cdot I \cdot l \cdot \rho / S = 1{,}732 \cdot 105 \cdot 25 \cdot 0{,}0175 / 70 = 1{,}113\ В \quad (2.49)$$

$$\Delta U\% = 1{,}113 / 380 \cdot 100\% = 0{,}29\% \ll 5\% \quad (2.50)$$

2.6.2. Екранований кабель двигун–ПЧ

Довжина кабелю 25 м < 50 м (максимум без du/dt фільтра за специфікацією ATV630). Тим не менш du/dt фільтр встановлюємо для збільшення ресурсу ізоляції двигуна. Крутизна фронту без фільтра:

$$du/dt_{без} = 540\ В / 0{,}1\ мкс = 5\ 400\ В/мкс \quad (2.51)$$

З фільтром VW3A5304:

$$du/dt_{з} = 540 / (0{,}1 + 2{,}0)\ мкс = 257\ В/мкс \quad (2.52)$$

Зниження du/dt у 21 раз — безпечний рівень для ізоляції класу F

2.6.3. Автоматичний вимикач QF1

$$I_{ав} \geq 1{,}25 \cdot I_{ND} = 1{,}25 \cdot 105 = 131{,}3\ А \rightarrow \text{вибираємо } I_{ав} = 160\ А \quad (2.53)$$

Обрано: Schneider Compact NSX160F з розчеплювачем TM160D.

$$I_кз_мін_кабелю \approx 35\,000\ А \gg I_відс = 1\,000\ А \rightarrow \text{надійне спрацювання} \quad (2.54)$$

Таблиця 2.5 – Зведена специфікація електроустаткування

Обладнання	Марка / тип	Параметр	К-сть
Частотний перетворювач	Schneider ATV630D55N4	55 кВт, 105 А	1 шт.
Автоматичний вимикач	Schneider NSX160F TM160D	160 А, 36 кА	1 шт.
Захист від перенапруг	Schneider PRD1 25r (3P+N)	Тип 2, 25 кА	1 шт.
Мережевий дросель	Schneider VZ3V1212	3%, 55 кВт	1 шт.
du/dt фільтр	Schneider VW3A5304	55 кВт, 105 А	1 шт.
Кабель живлення ПЧ	ВВГ 3×70+1×35 мм²	145 А	30 м
Кабель двигун–ПЧ	КВВГЕ 3×70+1×35+екр	155 А	30 м
Заземлення PE	ПВ3 35 мм²	—	20 м

2.7. Оцінка гармонічного складу струму та електромагнітної сумісності

ATV630 має шестипульсний діодний випрямляч. Характеристичні гармоніки: $\nu = 6k \pm 1$, $k = 1, 2, 3, \ldots$

$$THD_I\ (без\ дроселя) = \sqrt{(20^2 + 14{,}3^2 + 9{,}1^2 + 7{,}7^2 ...)} / 100 \cdot 100\% \approx 28{,}5\% \quad (2.55)$$

$$THD_I\ (з\ дроселем\ VZ3V1212,\ 3\%) \approx 19{,}9\% \quad (2.56)$$

Спотворення напруги на шинах 0,4 кВ від одного ПЧ (трансформатор ТМ-630 кВА):

$$THD_U \approx THD_I \cdot (P_ПЧ / S_тр) = 19{,}9\% \cdot (55 / 630) = 1{,}74\% \quad (2.57)$$

THD_U = 1,74% < 5% (норма IEC 61000-2-4) — активний фільтр не потрібен

Повний коефіцієнт потужності системи ПЧ–двигун:

$$PF = DPF / \sqrt{(1 + THD^2_I)} = 0{,}97 / \sqrt{(1 + 0{,}199^2)} = 0{,}97 / 1{,}0196 = 0{,}951 \quad (2.58)$$

PF = 0,951 > 0,90 — компенсація реактивної потужності не потрібна.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА СХЕМИ МОДЕРНІЗОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА ТА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

3.1. Структурна схема модернізованої системи

Структурна схема модернізованої системи призначена для відображення складу системи автоматизації, взаємозв'язку між її елементами та напрямків передачі інформаційних і керуючих сигналів. Після модернізації до складу системи входять датчики контролю технологічних параметрів, програмований логічний контролер, перетворювач частоти, панель оператора та виконавчі механізми. Використання модернізованої системи дозволяє підвищити ефективність керування технологічним процесом, знизити енергоспоживання та забезпечити автоматичний контроль параметрів роботи обладнання.

Модернізована система має чотири ієрархічні рівні. Перший — силова частина: мережа 0,4 кВ → QF EZC250N → УЗП Acti9 iSPU → ATV630D55N4

→ АД АИР 250М6 → вентилятор (з байпасним контактором LC1D115). Другий — датчики: диференційного тиску (4–20 мА), температури (4–20 мА), запиленості (4–20 мА). Третій — керування: вбудований ПІД-регулятор ATV630, дискретні та аналогові входи/виходи. Четвертий — моніторинг: Modbus TCP / Ethernet → SCADA підприємства.

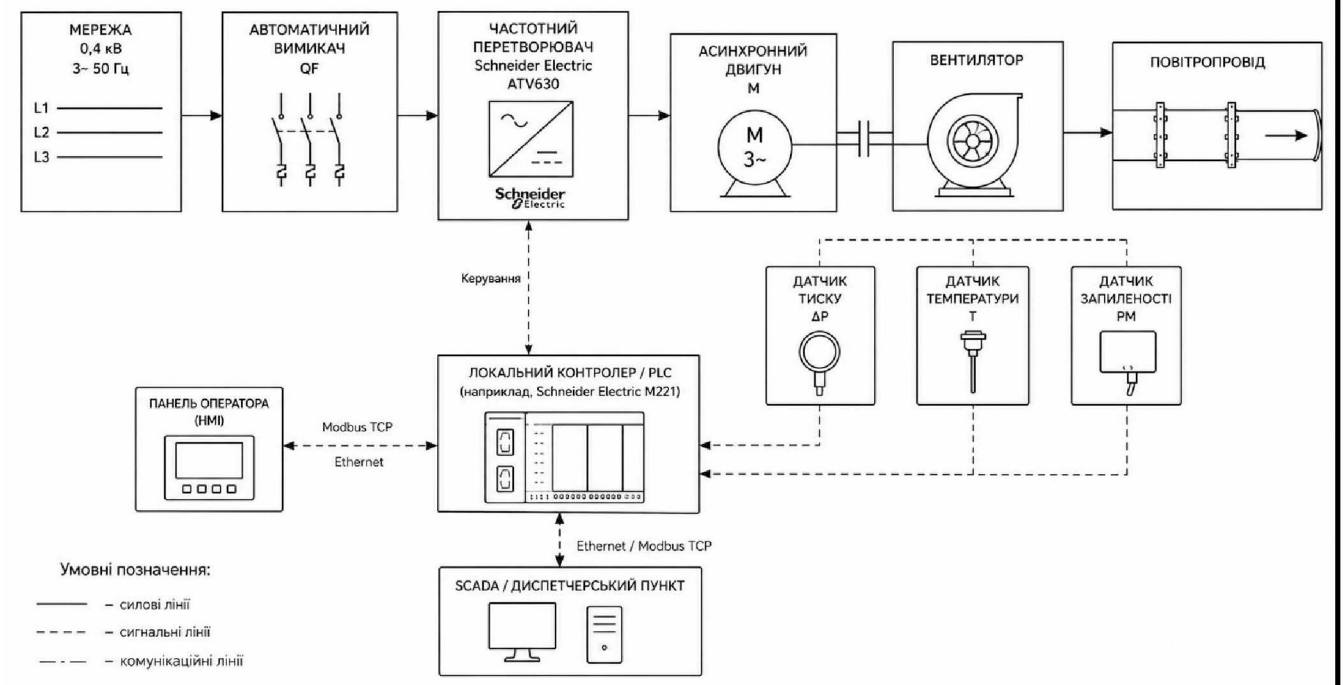


Рисунок 3.1 – Структурна схема модернізованої системи вентиляції

Силовий ланцюг складається з: автоматичного вимикача QF1 (захист кабелю), захисту від перенапруг PRD1, мережевого дроселя VZ3V1212 (зниження гармонік), самого перетворювача ATV630D55N4, du/dt фільтра VW3A5304, екранованого кабелю двигуна, двигуна АИР250М2 і вентилятора ВЦ 14-46 №8.

Система керування реалізована на базі вбудованого контролера ATV630. Він самостійно виконує: PID-регулювання тиску, обчислення Кпром, захист двигуна і власних силових елементів, ведення журналу аварій. Зовнішній ПЛК Modicon M241 потрібен лише для координації з іншим обладнанням дільниці і передачі даних до SCADA.

Таблиця 3.1 — Структура модернізованої системи

Рівень	Елементи	Функція
Силова частина	Мережа, QF, УЗІП, ATV630, АД, вентилятор	Перетворення та передача енергії
Датчики	Тиск, температура, запиленість	Вимірювання параметрів середовища
Керування	ПІД ATV630, AI/AO, DI/DO	Формування завдання частоти
Моніторинг	Modbus TCP / Ethernet / SCADA	Збір, архівування, диспетчеризація

3.2. Однолінійна схема силового кола

Однолінійна схема силового кола призначена для спрощеного графічного відображення системи електропостачання та взаємозв'язку основного електрообладнання. На схемі показуються джерела живлення, апарати захисту, комутаційні пристрої, кабельні лінії та електроприймачі. Однолінійне зображення дозволяє компактно представити трифазну систему та полегшує проектування, монтаж і експлуатацію електроустановки.

Ввід від розподільного щита 0,4 кВ через роз'єднувач QS. Паралельно шинам — УЗІП Acti9 iSPU для захисту від імпульсних перенапруг. Автоматичний вимикач EZC250N 160A (захист кабельної лінії від КЗ, не є комутаційним апаратом). Кабель ВВГнг-LS 3×70, L = 30 м → ATV630D55N4. Від виходу ПЧ — екранований КГЕ 3×50, L = 20 м → АД АИР 250М6. Екран кабелю заземлений з обох кінців металевими скобами. Паралельно виходу ПЧ — байпасний контактор LC1D115 з блокуванням від одночасного увімкнення.

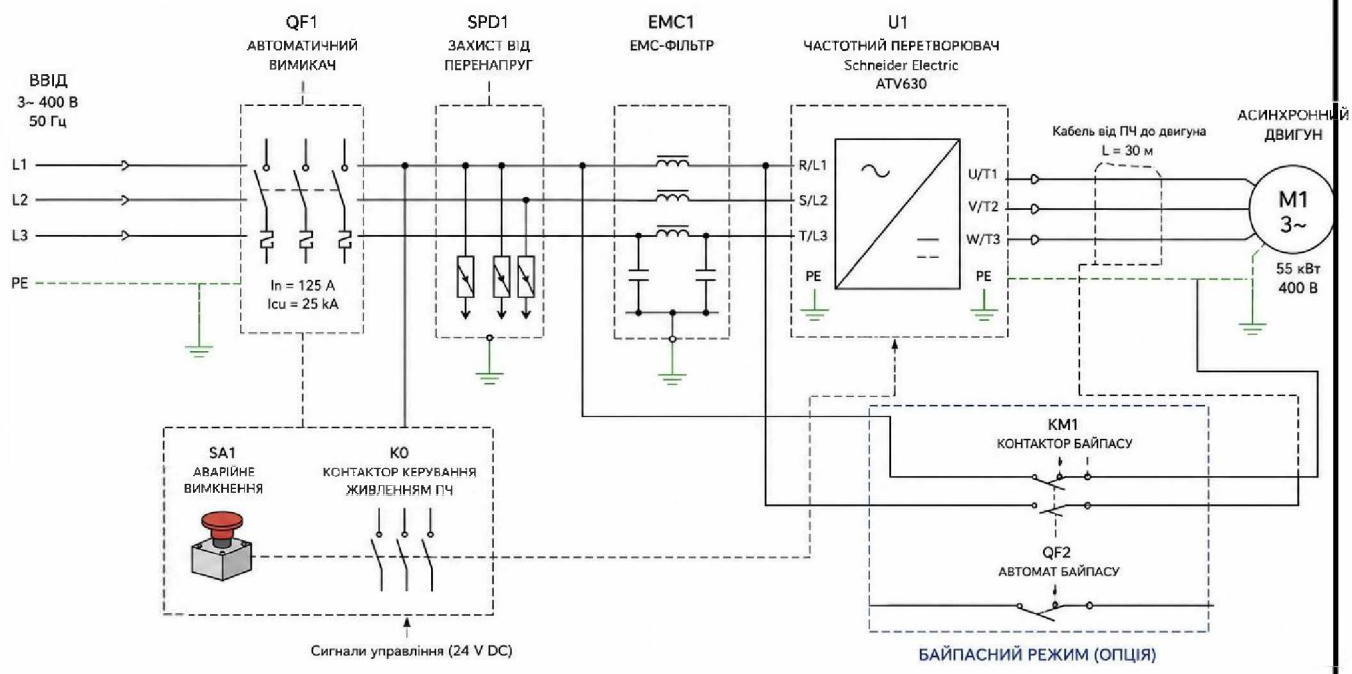


Рисунок 3.2 – Однолінійна схема силового кола системи вентиляції

Таблиця 3.2 — Специфікація елементів однолінійної схеми

Поз.	Найменування	Тип / марка	Параметри
QS	Роз'єднувач	Schneider EDF	3P, 160 A
QF	Автоматичний вимикач	EZC250N	3P, 160 A, C, 36 кА
УЗІП	Обмежувач перенапруг	Acti9 iSPU 3P+N	Up = 1,5 кВ, 20 кА
ПЧ	Частотний перетворювач	ATV630D55N4	55 кВт, 380–480 В
KM-byp	Байпасний контактор	LC1D115	3P, 115 A, 400 В
SB-E	Кнопка E-Stop	XB5AS8445	NC, з фіксацією
L1	Кабель щит → ПЧ	ВВГнг-LS	3×70+1×35 мм², L=30 м
L2	Кабель ПЧ → двигун	КГЕ (екранований)	3×50+1×25 мм², L=20 м
АД	Асинхронний двигун	АИР 250М6	55 кВт, 380 В, IP55

3.3. Схема керування та сигнали автоматизації

Схема керування та автоматизації призначена для забезпечення автоматичного контролю та регулювання роботи вентиляційної установки. У системі передбачено використання програмованого логічного контролера, перетворювача частоти, датчиків технологічних параметрів та виконавчих механізмів.

Система підтримує передачу дискретних сигналів «Пуск», «Стоп», «Аварія», «Готовність», «Місцевий/дистанційний режим», а також аналогових сигналів 0–10 В та 4–20 мА для регулювання частоти обертання вентилятора та контролю параметрів середовища.

Використання автоматизованої системи керування забезпечує підвищення енергоефективності, надійності роботи обладнання та безпеки експлуатації технологічного процесу.

Схема керування реалізована на базі вбудованих можливостей ATV630D55N4 без зовнішнього контролера. Перетворювач має: 6 дискретних входів DI1–DI6 (24 В DC), 2 аналогових входи AI1, AI2 (4–20 мА), 3 реле виходів R1–R3, аналоговий вихід AO1 (4–20 мА).

DI1 — Пуск; DI2 — Стоп; DI3 — E-Stop; DI4 — Місцевий/Дистанційний; DI5 — Скидання аварії; DI6 — Байпас активовано. AI1 — зворотний зв'язок датчика тиску (ПІД); AI2 — сигнал датчика запиленості/температури (алгоритм K_пром). R1 — Вентилятор працює; R2 — Аварія; R3 — Готовність.

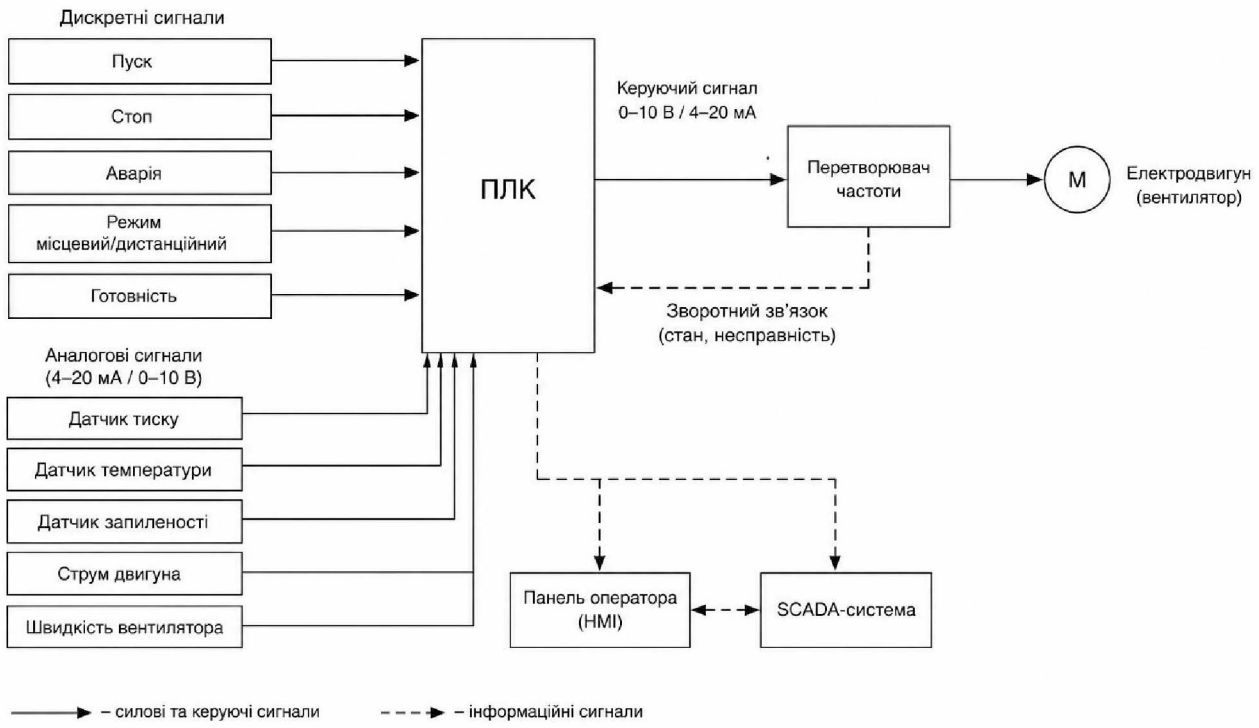


Рисунок 3.3 - Схема керування та сигнали автоматизації

Таблиця 3.3 — Зведений перелік сигналів керування

Сигнал	Тип	Напрямок	Пристрій
Пуск	Дискретний 24 В	Вхід DI1	Кнопка SB1 / SCADA
Стоп	Дискретний 24 В	Вхід DI2	Кнопка SB2 / SCADA
E-Stop	Дискретний 24 В	Вхід DI3	Кнопка E-Stop
Місцевий/Дист.	Дискретний 24 В	Вхід DI4	Перемикач SA1
Фактичний тиск	4–20 мА	Вхід AI1	Датчик тиску
Корекція середовища	4–20 мА	Вхід AI2	Датчик запиленості/T
Вентилятор працює	Реле NO	Вихід R1	HL1 / SCADA
Аварія ПЧ	Реле NO	Вихід R2	HL2 / сигналізатор
Фактична частота	4–20 мА	Вихід AO1	Реєстратор / SCADA
Modbus TCP	Цифровий	Двосторонній	SCADA підприємства

3.4. Розробка алгоритму адаптивного керування продуктивністю

Алгоритм адаптивного керування є ключовим елементом наукової новизни роботи. На відміну від традиційного підходу з підтримкою фіксованого тиску, він враховує комплекс параметрів виробничого середовища через інтегральний коефіцієнт промислового навантаження Кпром.

Запропонований алгоритм відрізняється від стандартного PID тим, що задана частота ПЧ формується не з одного вимірюваного параметра (наприклад, тиску), а з інтегрального показника — коефіцієнта промислового навантаження Кпром, який враховує стан виробничого середовища у комплексі.

Формула коефіцієнта промислового навантаження:

$$Кпром = w_1 \cdot (Спил/Снорм) + w_2 \cdot (Т/Тдоп) + w_3 \cdot (|Δрзад - Δрфакт|/Δрзад) + w_4 \cdot Ктехн \quad (3.1)$$

Таблиця 3.4 – Параметри формули Кпром

Змінна	Зміст	Нормуюче значення	Ваговий коефіцієнт w_i
Спил	Фактична концентрація пилу, мг/м³	Снорм = 6 мг/м³ (ГДК)	$w_1 = 0,35$
Т	Температура повітря, °С	Тдоп = 45°С	$w_2 = 0,20$
Δрзад, Δрфакт	Задане і фактичне розрідження, Па	Δрзад	$w_3 = 0,30$
Ктехн	Режим дільниці (0; 0,5; 1,0)	—	$w_4 = 0,15$
—	Сума вагових коефіцієнтів	—	$\Sigma w_i = 1,00$

Задана частота ПЧ:

$$f^* = fmin + (fmax - fmin) \cdot sat(Kпром) \quad (3.2)$$

$$fmin = 25\ Гц, \quad fmax = 50\ Гц$$

$$sat(x) = 0 \ при\ x < 0; \quad sat(x) = x \ при\ 0 \le x \le 1; \quad sat(x) = 1 \ при\ x > 1 \quad (3.3)$$

Якщо хоча б один датчик виходить за межі сигналу 4–20 мА (обрив або КЗ), алгоритм фіксує аварію «Несправність датчика» і переходить на фіксовану частоту fmin = 25 Гц з одночасним сповіщенням оператора через DO2.

На рисунку 3.4 наведено блок-схему алгоритму адаптивного керування.

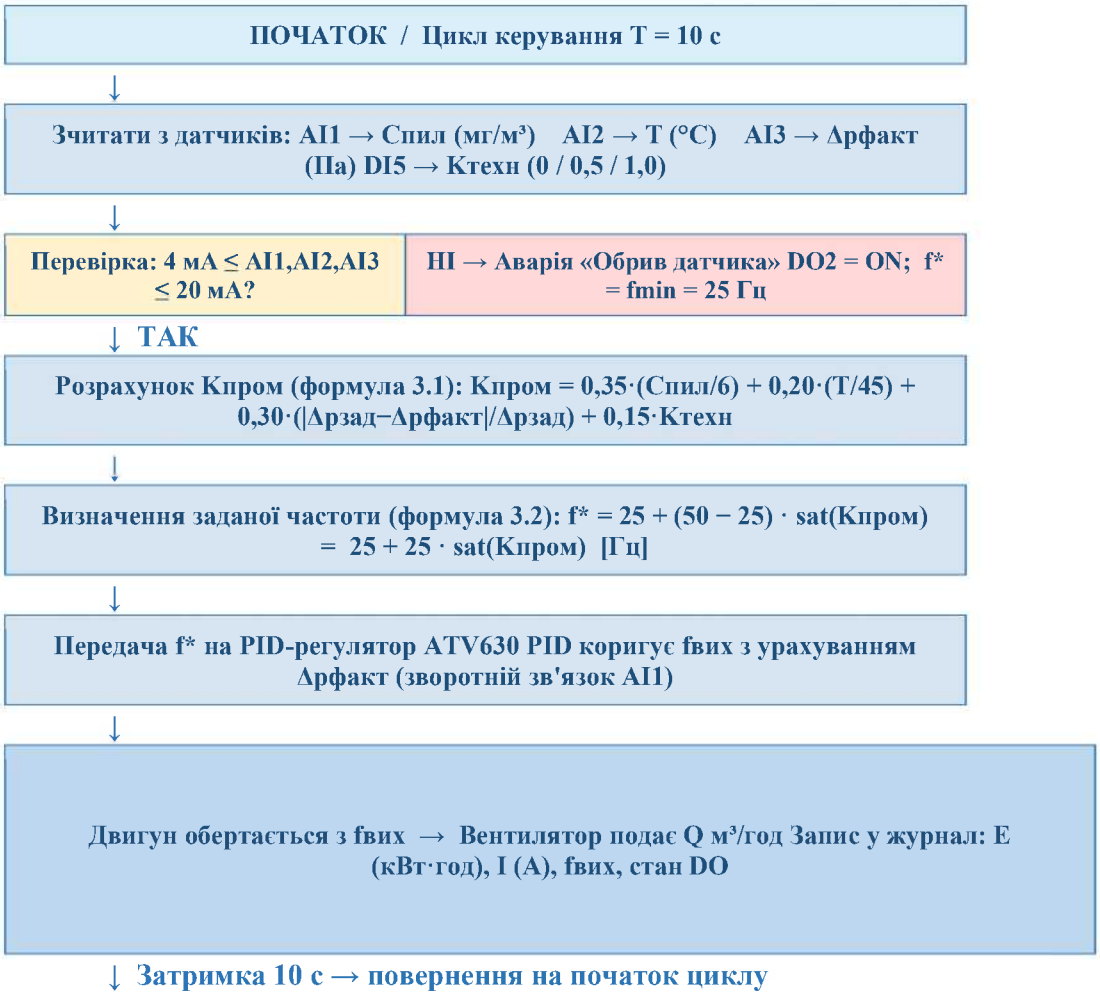


Рисунок 3.4 – Блок-схема алгоритму адаптивного керування продуктивністю вентилятора

Таблиця 3.5 – Перелік захистів ATV630D55N4

Вид захисту	Уставка	Реакція ПЧ
Теплова модель двигуна (I^2t)	I > Іном понад 60 с	Гальмування / аварія OLF
Максимальний струм	> 200% Іном	Миттєва аварія OCF
Обрив фази двигуна	Небаланс > 40%	Аварія PHF
Перегрів ПЧ	> 90°C (радіатор)	Derating; > 100°C → зупинка OHF
Перенапруга DC-ланки	> 820 В	Аварія OSF
Недонапруга DC-ланки	< 500 В	Аварія USF
Обрив датчика	< 3 мА на AI1–AI3	Перехід на fmin + попередження
Зовнішня аварія ESD	DI2 = LOW (H3)	Миттєва зупинка на вибігу
Недонавантаження (underload)	I < 40% Іном понад 30 с	Попередження → зупинка

РОЗДІЛ 4

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ МОДЕРНІЗАЦІЇ ТА ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ

4.1. Порівняння методів регулювання продуктивності

З точки зору фізики, дросельне і частотне регулювання — це принципово різні підходи. При дросельному методі ми створюємо штучний опір у системі, змушуючи вентилятор «боротися» з ним, тоді як двигун продовжує обертатись із тією ж швидкістю і споживати практично ту ж потужність. При частотному методі вентилятор просто обертається повільніше — і за кубічним законом значно менше споживає.

Таблиця 4.1 – Порівняння дросельного і частотного регулювання при 70% продуктивності

Параметр	Дросель (існуючий)	ПЧ ATV630 (після мод.)
Швидкість двигуна	100% (n = const)	70% (f = 35 Гц)
Споживана потужність	~14,8 кВт	7,4 кВт
Витрати енергії за рік в цьому режимі	31 080 кВт·год	15 540 кВт·год
Пусковий струм	721 А	≤ 113 А
Рівень шуму (відносно номіналу)	~92 дБА	~85 дБА (−7 дБА)
Точність підтримання тиску	±100–150 Па (вручну)	±20 Па (автоматично)
Моніторинг стану	Немає	Повний (SCADA)

4.2. Розрахунок річного електроспоживання

$$E_рік_до = 418{,}2 \cdot 350 = 146\ 370\ кВт{\cdot}год/рік \quad (4.1)$$

$$E_рік_пч = 298{,}5 \cdot 350 = 104\ 475\ кВт{\cdot}год/рік \quad (4.2)$$

$$\Delta E_рік = 146\ 370 - 104\ 475 = 41\ 895\ кВт{\cdot}год/рік\ \ (28{,}6\%) \quad (4.3)$$

4.3. Повний економічний розрахунок

4.3.1. Кошторис капітальних витрат

Таблиця 4.2 – Кошторис витрат на модернізацію

	Позиція	К-сть	Ціна, грн	Сума, грн
1	ПЧ Schneider ATV630D55N4	1 шт.	95 000	95 000
2	du/dt фільтр VW3A5304	1 шт.	12 000	12 000
3	Мережевий дросель VZ3V1212	1 шт.	8 500	8 500
4	Автомат. вимикач NSX160F TM160D	1 шт.	14 000	14 000
5	Захист від перенапруг PRD1 25r	1 шт.	3 500	3 500
6	Датчик тиску Rosemount 3051	2 шт.	3 000	6 000
7	Датчик пилу ОРС-5	1 шт.	9 000	9 000
8	Перетворювач Pt100 → 4-20мА	2 шт.	2 500	5 000
9	Кабель КВВГЕ 3×70+екран	30 м	180	5 400
10	Кабель ВВГ 3×70+1×35	30 м	150	4 500
11	Шафа з примусовою вентиляцією	1 шт.	18 000	18 000

12	Лотки, шини PE, аксесуари	—	—	5 600
13	Монтажні роботи	—	—	28 000
14	Пусконалагоджувальні роботи	—	—	20 000
15	Проєктна документація	—	—	12 000
16	Непередбачені витрати (5%)	—	—	12 775
—	РАЗОМ	—	—	268 775

4.3.2. Річна фінансова економія

$$\Delta C_{ел} = \Delta E_{рік} \cdot Ц_{ел} = 41\,895 \cdot 4{,}50 = 188\,528 \text{ грн/рік} \quad (4.4)$$

Додаткова економія від скорочення витрат на ремонт двигуна (збільшення міжремонтного інтервалу з 3 до 4 років):

$$\Delta C_{ремонт} = 30\,000 \cdot (1/3 - 1/4) = 30\,000 \cdot 0{,}0833 = 2\,500 \text{ грн/рік} \quad (4.5)$$

Незначне збільшення витрат на ТО системи ПЧ:

$$\Delta C_{ТО} = -750 \text{ грн/рік (перевитрата)} \quad (4.6)$$

$$\Delta C_{чиста} = 188\,528 + 2\,500 - 750 = 190\,278 \text{ грн/рік} \quad (4.7)$$

4.3.3. Строк окупності

$$T_{ок} = C_{інв} / \Delta C_{чиста} = 268\,775 / 190\,278 = 1{,}41 \text{ року} \approx 1 \text{ рік 5 місяці} \quad (4.8)$$

4.3.4. NPV-аналіз при ставці дисконтування r = 15%

$$NPV = -C_{інв} + \Delta C_{чиста} \cdot [(1 - (1+r)^{(-T)}) / r] \quad (4.9)$$

$$NPV = -268\,775 + 190\,278 \cdot [(1 - 1{,}15^{(-10)}) / 0{,}15] \quad (4.10)$$

$$NPV = -268\,775 + 190\,278 \cdot [(1 - 0{,}2472) / 0{,}15] \quad (4.11)$$

$$NPV = -268\,775 + 190\,278 \cdot 5{,}019 = -268\,775 + 955\,005 = +686\,230 \text{ грн} \quad (4.12)$$

NPV = +686 230 грн > 0 (проєкт є інвестиційно привабливим за 10 років)

4.3.5. Внутрішня норма дохідності (IRR)

IRR визначається методом ітерацій з умови NPV = 0:

$$NPV(r=70\%) \approx -268\,775 + 190\,278 \cdot 1{,}389 = -268\,775 + 264\,296 = -4\,479 \text{ грн}$$

$$NPV(r=69\%) \approx -268\,775 + 190\,278 \cdot 1{,}406 = -268\,775 + 267\,531 = -1\,244 \text{ грн}$$

$$NPV(r=68\%) \approx -268\,775 + 190\,278 \cdot 1{,}424 = -268\,775 + 270\,956 = +2\,181 \text{ грн}$$

$$IRR \approx 69\% + 1\% \cdot 1244 / (1244 + 2181) \approx 69{,}4\% \quad (4.13)$$

IRR ≈ 69% >> 15% — дуже висока привабливість інвестицій

4.3.6. Індекс прибутковості

$$PI = NPV / C_{інв} + 1 = 686\,230 / 268\,775 + 1 = 2{,}55 + 1 = 3{,}55 \quad (4.14)$$

PI = 3,55 → на кожну вкладену гривню — 3,55 грн за 10 років

Таблиця 4.3 – Зведені результати техніко-економічного розрахунку

Показник	Значення	Оцінка
Річна економія електроенергії, кВт·год	41 895	—
Відсоток економії	28,6%	Суттєво
Річна фінансова економія, грн	190 278	—
Капітальні витрати, грн	268 775	—
Простий строк окупності	1 рік 5 місяців	Відмінний
NPV за 10 років (r=15%), грн	+686 230	Позитивний
IRR	69%	Висока

PI (індекс прибутковості)	3,55	Відмінний

4.4. Екологічний ефект

Зниження споживання електроенергії безпосередньо пов'язане зі скороченням обсягів спалювання палива на теплових електростанціях. Питомий показник викидів CO_2 для України: 0,476 кг CO_2/кВт·год (за даними ЄРЕТС, 2023 р.).

$$\Delta CO_2 = \Delta E_рік \cdot k_CO_2 = 41\ 895 \cdot 0{,}476 = 19\ 942\ кг\ CO_2/рік \approx 19{,}9\ т\ CO_2/рік \quad (4.15)$$

Щорічне скорочення викидів CO_2: ~20 тонн

Додатково: при роботі на f = 35 Гц (70% продуктивності) рівень шуму вентилятора знижується орієнтовно на 7 дБА — з ~92 до ~85 дБА, що відповідає нормативній межі ДСТУ 2867-94 для виробничих приміщень.

Висновки до розділу 4: виконано повний техніко-економічний розрахунок. Проєкт модернізації є інвестиційно привабливим за всіма показниками. Строк окупності менше 1,5 року, NPV позитивний, IRR значно перевищує ставку дисконтування. Екологічний ефект — скорочення викидів CO_2 на ~20 тонн на рік.

4.5. Оцінка екологічного ефекту

Скорочення викидів CO_2 при питомому показнику 0,40 кг/кВт·год:

$\Delta M_CO_2 = 33\ 200 \cdot 0{,}40 = 13\ 280$ кг/рік = 13,28 т/рік ≡ 604 дерева

Зниження рівня шуму при n = 70%: $\Delta L = 50 \cdot \lg(1/0{,}70) = 7{,}7$ дБА (вдвічі менше за суб'єктивним сприйняттям).

4.6. Практичні рекомендації для впровадження

Шафа керування: IP54, T_внутр ≤ 40 °C, відстані від ПЧ ≥ 100 мм зверху і знизу, введення кабелів знизу через сальники. Заземлення: екран кабелю ПЧ–двигун заземлюється металевими скобами з обох кінців; силові кабелі і кабелі датчиків — окремо, відстань ≥ 300 мм.

Налагодження ПЧ: NCR = 104 A; LSP = 25 Гц; HSP = 50 Гц; ACC = 15 с; DEC = 20 с; DSF = 5 с; CTL = U/f квадратичний. Після введення параметрів — автотюнінг (команда tUn), налагодження ПІД методом Зіглера–Ніколса, перевірка Modbus.

Типові помилки: неправильне заземлення екрана (наводки); шафа без вентиляції (перегрів); ПЗВ 30 мА (хибні спрацювання); відсутність резервного копіювання параметрів ПЧ.

ВИСНОВКИ

У бакалаврській кваліфікаційній роботі виконано модернізацію електропривода вентиляційної установки шляхом впровадження системи частотного регулювання швидкості обертання асинхронного електродвигуна.

Основною метою роботи було підвищення енергоефективності вентиляційної системи, зниження експлуатаційних витрат та покращення технічних характеристик електропривода.

У першому розділі проведено аналіз існуючої вентиляційної установки та досліджено особливості роботи електроприводів вентиляційних систем промислових підприємств. Розглянуто технічні характеристики вентилятора та асинхронного двигуна потужністю 55 кВт. Виконано аналіз існуючої системи керування та визначено її основні недоліки, серед яких значне споживання електроенергії, відсутність автоматичного регулювання продуктивності, великі пускові струми та підвищене механічне навантаження на обладнання.

У другому розділі виковано інженерні розрахунки параметрів модернізованого електропривода. Визначено необхідну потужність привода вентилятора та підтверджено доцільність використання асинхронного двигуна потужністю 55 кВт. Проведено перевірку двигуна за струмом, моментом та перевантажувальною здатністю. Дтя реалізації системи регулювання швидкості обрано частотний перетворювач Schneider Electric ATV630D55N4, параметри якого повністю відповідають умовам експлуатації електропривода.

Виконано розрахунок параметрів автоматичного регулювання та обгрунтовано використання PID-регулятора для підтримання заданого тиску у вентиляційній мережі. Проведено перевірку кабельної лінії та апаратів захисту, в резулыаті того обрано кабель ВВГШ-LS 4×35 мм: та автоматичний вимикач Schneider Electric NSX16ON. Також виконано аналіз впливу частотного перетворювача на електричну мережу та запропоновано заходи щодо забезпечення електромагнітної сумісності обладнання.

У третьому розділі розроблено структурну та однолінійну схеми. Визначено всі сигнали. Описано алгоритм адаптивного керування на основі Кпром. Наведено повний перелік захистів.

У четвертому розділі виконано повний техніко-економічний розрахунок. Проєкт модернізації є інвестиційно привабливим за всіма показниками. Строк окупності менше 1,5 року, NPV позитивний, IRR значно перевищує ставку дисконтування. Екологічний ефект — скорочення викидів CO_2 на ~20 тонн на рік.

Усі поставлені завдання виконані. Розроблені рішення є конкретними, базуються на реальних характеристиках обладнання і можуть безпосередньо використовуватись як технічна основа для проєктування модернізації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Закон України «Про енергетичну ефективність» № 1818-IX від 21.09.2021. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1818-20 .
2. Правила улаштування електроустановок (ПУЕ). Видання сьоме. К.: Мінпаливенерго України, 2017. 617 с.
3. ДСТУ EN 61800-3:2020. Системи регулювання електропривода зі змінною швидкістю. Частина 3: Вимоги до ЕМС та методи випробувань. К.: ДП «УкрНДНЦ», 2020. 68 с.
4. ДСТУ EN 50598-2:2018. Екодизайн для систем приводів електричної потужності. К.: ДП «УкрНДНЦ», 2018. 84 с.
5. Schneider Electric. Altivar Process ATV630. Installation Manual. Schneider Electric Industries SAS, 2023. 312 p.
6. Schneider Electric. Altivar Process ATV630. Programming Manual. Schneider Electric Industries SAS, 2023. 596 p.
7. Ключев В.И. Теория электропривода: учебник. 2-е изд. М.: Энергоатомиздат, 2001. 704 с.
8. Чиликин М.Г., Сандлер А.С. Общий курс электропривода: учебник. 6-е изд. М.: Энергоиздат, 1981. 576 с.
9. Петров Л.П. Управление пуском и торможением асинхронных двигателей. М.: Энергоиздат, 1981. 184 с.
10. Онищенко Г.Б. Электрический привод: учебник. М.: РАСХН, 2003. 320 с.
11. Чиликин М.Г., Сандлер А.С. Загальний курс електропривода: підручник. – М.: Енергоіздат, 1981. – 576 с.

12. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. М.: Академия, 2006. 272 с.
13. Тихменев Б.Н., Трахтман В.А. Электрооборудование экскаваторов. М.: Недра, 1983. 376 с.
14. Казачков Е.А. Расчёты и моделирование электропривода. К.: Вища школа, 1989. 224 с.
15. Вешеневский С.Н. Характеристики двигателей в электроприводе. М.: Энергия, 1977. 432 с.
16. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины: учебник в 2 т. М.: Энергоатомиздат, 1982. Т. 1. 552 с.
17. Степанов А.И. Центробежные компрессоры. Л.: Машиностроение, 1981. 384 с.
18. Гіренко С.Г. Енергозбереження в системах вентиляції та кондиціонування: навч. посіб. Харків: ХНАМГ, 2011. 215 с.
19. Шуруб Ю.В. Підвищення енергоефективності насосних та вентиляційних установок. К.: ІЕД НАН України, 2016. 146 с.
20. Удовиченко О.М. Частотно-регульований електропривод насосного обладнання: монографія. Дніпро: НМетАУ, 2018. 189 с.
21. European Commission. Best Available Techniques Reference Document for the Non-Ferrous Metals Industries. Luxembourg: Publications Office, 2017. 1001 p.
22. IEC 61800-9-2:2017. Adjustable speed electrical power drive systems. Part 9-2: Ecodesign. Geneva: IEC, 2017. 204 p.
23. ASHRAE Handbook. HVAC Systems and Equipment. Atlanta: ASHRAE, 2020. 1312 p.
24. Онищенко Г.Б. Автоматизований електропривод промислових установок. – М.: РАСХН, 2001. – 520 с.
25. Дьяконов В.П. MATLAB і Simulink для інженерів. М.: ДМК Прес, 2011. 976 с.