

ЗАКЛАД ВИЩОЇ ОСВІТИ «ПОДІЛЬСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»
Факультет енергетики та інформаційних технологій
Кафедра енергозберігаючих технологій та енергетичного менеджменту

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

Підвищення енергоефективності системи мікроклімату адміністративної будівлі

Виконав:

здобувач вищої освіти денної форми навчання освітнього ступеня «Магістр», освітньо-професійної програми «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

_____ **Юрій Маєр**

Керівник: канд. технічн. наук, доцент

_____ **Віктор ДУБІК**

Оцінка захисту:

Національна шкала _____

Кількість балів _____ Шкала ECTS _____

Допускається до захисту:

« ____ » _____ 2025р.

Керівник проектної групи
(гарант освітньої програми)

«Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»

кандидат технічних наук, доцент _____ **Павло ПОТАПСЬКИЙ**

м. Кам'янець-Подільський, 2025р.

ЗМІСТ

РОЗДІЛ 1. Аналіз систем керування вентиляторними установками як об'єктами енергозбереження	10
1.1. Призначення та класифікація вентиляторних установок	10
1.2. Конструктивні особливості та принцип дії основних вузлів вентиляторних установок головного провітрювання (ВУГП).	11
1.3. Аналіз технічних вимог до електропривода вентилятора під час функціонування в загальній мережі електропостачання	14
1.4. Проблеми та шляхи енергозбереження у вентиляційних установках сучасних будівель.....	18
1.5. Способи керування режимами вентиляторних установок.....	19
1.6. Основні джерела енергозбереження у вентиляційних установках.	24
1.8. Заходи для зниження енергоспоживання в системах та установках	27
1.8. Модернізація та оптимізація вентиляційних систем.....	30
1.9. Інвестиційна привабливість заходів з енергозбереження у вентиляційних установках.....	31
1.10. Економічні аспекти експлуатації вентиляційних установок.....	32
Висновок.	34
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА ЕФЕКТИВНОЇ СИСТЕМИ ВЕНТИЛЯЦІЇ.....	35
2.1 Загальна інформація	35
2.2 Розрахунок схем вентиляції та кондиціонування повітря в приміщеннях	36
2.3 Аеродинамічний розрахунок систем вентиляювання	43
2.4 Підбір технічних засобів для системи вентиляції	47

2.4.1. Оптимальний вибір високоточного вентиляторного обладнання	47
2.4.2 Вибір чилера	48
Висновки	50
РОЗДІЛ 3. Автоматизація систем вентиляції.....	51
3.1 Загальні відомості	51
3.2. Функціонування САУ припливної вентиляційної системи.....	52
3.2.1 Процедура ввімкнення системи.....	52
3.2.2 Дія заслонки припливного повітря.....	52
3.2.3 Моніторинг стану повітряного фільтра	52
3.2.4 Функціонування калорифера в зимовий сезон	54
3.2.5 Функціонування повітряного охолодника в літній сезон.....	54
3.2.6 Вентилятор припливного повітря.....	55
3.3. Завдання систем автоматики та диспетчеризації	55
3.3.1. Завдання, які забезпечує система АСУ та диспетчеризації.....	56
3.3.2. Використання LONWORKS® у сучасних системах диспетчеризації.....	56
3.3.3. Модель інтеграції відкритих систем	58
3.4 Мікроконтроллер Neuron	58
3.4.1 Робота по протоколу Lontalk	61
3.5. Об'єднання інженерних систем будівлі за допомогою технології LonWorks.....	63
3.6 Автоматизація роботи припливно-витяжної вентиляційної установки	67
3.6.1 Датчики	68
3.7 Контролер PCO3.....	71

3.7.1 Загальні технічні характеристики	71
3.7.2 Елементи пристроя	73
3.7.3 Технічна специфікація.....	74
3.8 Розподіл керування і моніторингу на пункти контролю	76
3.9. Тестування систем автоматизації під час випробувань технологічного обладнання.....	76
3.10. Аналіз характеристик синхронних двигунів для частотного регулювання.....	78
3.10.1. Регулювання реактивної потужності	81
3.9.2. Обмеження застосування синхронних двигунів.....	82
3.11. Застосування перетворювачів частоти	82
3.11.1. Функціонування перетворювача частоти	84
3.11.2. Метод зниження споживання реактивної потужності з використанням частотних перетворювачів	88
3.11.3 Алгоритм вибору перетворювача частоти	89
Висновок	93
Висновки	94
СПИСОК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ.....	95
Додатки	99

РЕФЕРАТ

Дипломна робота магістра складається з пояснювальної записки, виконаної машинописним способом на 93 аркушах формату А4, вміщує 3 розділи, 9 таблиць 17 рисунків, 34 літературних джерел, додатків, та презентаційного матеріалу на 12 аркушах.

Магістерська робота присвячена підвищенню енергоефективності та оптимізації керування електромеханічними системами, а саме: головною вентиляційною установкою адміністративної будівлі та електроприводом електронавантажувача. Метою роботи є розроблення та обґрунтування технічних рішень для покращення техніко-економічних показників обох систем.

Виконано розрахунок, вибір та автоматизацію електромеханічного обладнання головної вентиляційної установки. Для забезпечення енергоефективності запропоновано та реалізовано регулювання продуктивності вентиляторної системи відповідно до добової та сезонної потреби.

Доведено, що використання автоматизованого електроприводу та систем автоматизації значно підвищує надійність і безпеку роботи установки.

На основі порівняння характеристик приводів постійного та змінного струму (за масо-габаритними показниками та ККД) найбільш доцільним для електронавантажувача визнано застосування системи з синхронним двигуном.

Для досягнення оптимальної швидкодії та енергоефективності електропривода навантажувача, розроблено модель із Fuzzy-регулятором швидкості. Таке рішення є доцільним, оскільки нечітка логіка ефективно вирішує проблему постійного переналагодження параметрів класичних П-регуляторів, яке необхідне для підтримки мінімального кута запасу.

Ключові слова: МІКРОКЛІМАТ, СИСТЕМИ МІКРОКЛІМАТУ, АДМІНІСТРАТИВНА БУДІВЛЯ, ВЕНТИЛЯЦІЯ, КОНДИЦІОНУВАННЯ ПОВІТРЯ, ОПАЛЕННЯ, ПОВІТРООБМІН, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ, АВТОМАТИЗАЦІЯ СИСТЕМ, ТЕМПЕРАТУРНИЙ РЕЖИМ, ВОЛОГІСТЬ, ЯКІСТЬ ПОВІТРЯ.

Анотація

В рамках дослідження виконано розрахунок, вибір та автоматизацію обладнання головної вентиляційної установки. Для забезпечення енергоефективності запропоновано регулювання продуктивності вентиляторної системи відповідно до добової та сезонної потреби, що значно підвищує надійність і безпеку роботи.

На основі порівняння характеристик приводів, для електронавантажувача найбільш доцільним визнано застосування системи з синхронним двигуном з огляду на його кращі масо-габаритні показники та ККД. Для побудови оптимального за швидкодією та енергоефективністю електропривода навантажувача розроблено модель із Fuzzy-регулятором швидкості. Використання нечіткої логіки доведено як доцільне, оскільки вона ефективно вирішує проблему постійного перенастроювання параметрів класичних ПІ-регуляторів, необхідного для підтримки мінімального кута запасу.

Робота підтверджує, що застосування сучасних систем автоматизації та інтелектуальних регуляторів є ключовим фактором для досягнення високої економічної ефективності та стабільності електромеханічних систем.

Annotation

The study included the calculation, selection and automation of the main ventilation equipment. To ensure energy efficiency, it was proposed to regulate the performance of the fan system in accordance with daily and seasonal needs, which significantly increases the reliability and safety of operation.

Based on a comparison of the characteristics of the drives, the most appropriate for an electric forklift was the use of a system with a synchronous motor, given its better weight-dimensional indicators and efficiency. To build an electric forklift drive that is optimal in terms of speed and energy efficiency, a model with a Fuzzy speed controller was developed. The use of fuzzy logic has been proven to be appropriate, since it effectively solves the problem of constant readjustment of the parameters of classical PI controllers, necessary to maintain the minimum margin angle.

The work confirms that the use of modern automation systems and intelligent controllers is a key factor in achieving high economic efficiency and stability of electromechanical systems.

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ

АД – асинхронний двигун

ДПС – двигун постійного струму

ПІ – пропорційно інтегральний регулятор

Г— генератор

Д–двигун

ЕРС – електрорушійна сила

КТВ – керований тиристорний випрямляч

КТВ – керований тиристорний випрямляч

ККД – Коефіцієнт корисної дії

ВСТУП

Енергоефективність будівель є одним із стратегічних пріоритетів сучасної світової економіки. В умовах зростання цін на енергоносії та жорстких екологічних стандартів, підвищення ефективності систем життєзабезпечення набуває критичного значення. Адміністративні будівлі, через високе теплове навантаження та тривалий робочий час, є значними споживачами енергії, причому до 60% загального споживання часто припадає на системи мікроклімату (опалення, вентиляція, кондиціонування – HVAC). Таким чином, оптимізація системи мікроклімату адміністративних будівель є ключовим важелем для досягнення значної економії ресурсів та зниження операційних витрат.

Метою магістерської роботи є розробка та наукове обґрунтування комплексу технічних рішень та алгоритмів керування, спрямованих на підвищення енергоефективності системи мікроклімату адміністративної будівлі.

Для досягнення поставленої мети визначено такі завдання:

- Провести енергетичний аудит та детальний аналіз поточного стану системи HVAC адміністративної будівлі та виявити основні джерела енерговитрат.
- Здійснити математичне моделювання роботи ключових елементів системи мікроклімату, включаючи вентиляційні установки та теплові контури.
- Обґрунтувати та розрахувати доцільність впровадження сучасних технологій регулювання (наприклад, частотне регулювання продуктивності вентиляторів та насосів).
- Розробити оптимальний алгоритм автоматизованого керування параметрами мікроклімату, що базується на адаптивних або інтелектуальних методах (наприклад, нечітка логіка або підпорядковане керування) для мінімізації енергоспоживання.

Об'єкт дослідження: Система мікроклімату типової адміністративної будівлі.

Предмет дослідження: Методи та засоби підвищення енергоефективності, включаючи алгоритми автоматизованого керування електроприводами та тепловими процесами системи мікроклімату.

Практичне значення роботи полягає в можливості безпосереднього впровадження запропонованих рішень на існуючих об'єктах, що забезпечить: Зниження споживання електричної та теплової енергії на 15-30%. Покращення якості електропостачання за рахунок ефективною компенсації реактивної потужності. Підвищення надійності та комфорту експлуатації адміністративної будівлі.

Публікації:

Юрій МАЄР. СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ТА КЕРУВАННЯ МІКРОКЛІМАТОМ БУДІВЛІ НА БАЗІ ТЕХНОЛОГІЇ LONWORKS / Юрій МАЄР, Віктор ДУБІК //Ефективне використання енергії: стан і перспективи. Збірник наукових праць V Всеукраїнської студентської науково-практичної конференції. 12 листопада 2025 р. (ЗВО «ПДУ», м. Кам'янець-Подільський). – Кам'янець-Подільський, 2025. – С. 69-71.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ВЕНТИЛЯТОРНИМИ УСТАНОВКАМИ ЯК ОБ'ЄКТАМИ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

Equation Chapter 1 Section 1

1.1. Призначення та класифікація вентиляторних установок

Вентиляційні установки є найбільш енергоємним комплексом як у промисловості, так і в адміністративних будівлях, що зумовлює великі витрати електроенергії в масштабах країни. Через їхнє широке застосування в усіх галузях, питання зменшення енергоспоживання стоїть гостро. Наприклад, у гірничій галузі вентилятори споживають 15-35% від усієї шахтної електроенергії. Отже, підвищення економічності роботи вентиляторів має виняткове державне значення [1]. Це може бути досягнуто підвищенням ККД самих вентиляторів і, головне, підвищенням експлуатаційного ККД, який обумовлюється належною взаємодією вентилятора з приводним двигуном і з обслуговуючою мережею.

Вентиляторна установка формується з комплексу елементів: вентилятора, двигуна та мережі, які функціонують спільно. Очевидно, що успішна робота такої установки вимагає не лише належної експлуатації, а й коректного проектування (розрахунку), якісного монтажу та точної наладки.

Вентилятори є одним із найбільш поширених видів обладнання і застосовуються для:

Забезпечення мікроклімату (вентиляція, повітряне опалення) та підтримки чистоти (аспірація, пневмозбирання) у промислових, громадських і житлових будівлях (як вентиляційні вентиляторні установки).

Оптимізації роботи котелень шляхом створення тяги та дуття (як тягодуттєві вентиляторні установки).

Забезпечення безпеки та провітрювання рудників і шахт (як рудничні вентиляторні установки).

Також вони використовуються для обслуговування багатьох технологічних процесів.

Універсальність вентиляторних установок полягає в тому, що незалежно від конкретної області використання чи умов експлуатації, основні принципи їх розрахунку, монтажу, наладки та подальшого використання є незмінними.

Зазначені обставини зумовили потребу створення спеціалізованих моделей вентиляторів, чії технічні характеристики відповідають специфічним запитам гірничодобувної промисловості.

Ключовою відмінністю шахтних вентиляторів є їхня потужність: вони забезпечують велику продуктивність (до 500–600 м³/с) одночасно з високим тиском (у межах 0,5–10 кПа). Через низький ступінь стиску повітря (1,1), для спрощення інженерних розрахунків, пов'язаних із їхньою роботою, повітря можна розглядати як нестиснене.

За призначенням вентилятори класифікуються на такі групи:

Вентилятори основного провітрювання (для забезпечення загальної вентиляції).

Додаткові вентилятори.

Вентиляторні установки місцевого провітрювання (для локального використання).

1.2. Конструктивні особливості та принцип дії основних вузлів вентиляторних установок головного провітрювання (ВУГП).

У кінцевій конфігурації основного провітрювання цей комплекс складається з: двох вентиляційних агрегатів, кожен з яких містить вентилятор, електродвигун та системи управління, автоматизації й спостереження. Додатково передбачено обладнання для реверсування та перемикання повітряного потоку, а також систему вентиляційних каналів, яка дає змогу

реалізувати прямий і реверсивний режими функціонування кожного агрегату [2,3].

Склад додаткового обладнання охоплює: заслінки (ляди), які перекривають вентиляційні канали, механізми для їх відкриття/закриття, ущільнювальні пристрої для герметизації та ревізійні люки для доступу в канали.

Конструктивно ляди можуть бути падаючими або самохідними вертикальними дверима. Для падаючих ляд як привід слугують лебідки з канатною системою. Натомість самохідні вертикальні ляди приводяться в дію ланцюговим приводом (з черв'ячним редуктором) або гвинтовим приводом (з мотор-редуктором).

Компонування вентиляторної установки залежить від таких характеристик вентилятора:

Тип конструкції (осьовий чи відцентровий).

Схема входу повітря (з одним або двобічним входом).

Функціональність (реверсивний чи неревверсивний).

Оскільки відцентрові вентилятори не мають функції реверсу, вентиляторні установки, що їх використовують, обов'язково оснащуються обвідними каналами. Ці канали потрібні для того, щоб повітря могло надходити до системи при її роботі у реверсивному режимі. Конструктивно такі установки зазвичай мають загальний дифузор для обох вентиляторів, який на певній висоті звужується і переходить у конфузор [4].

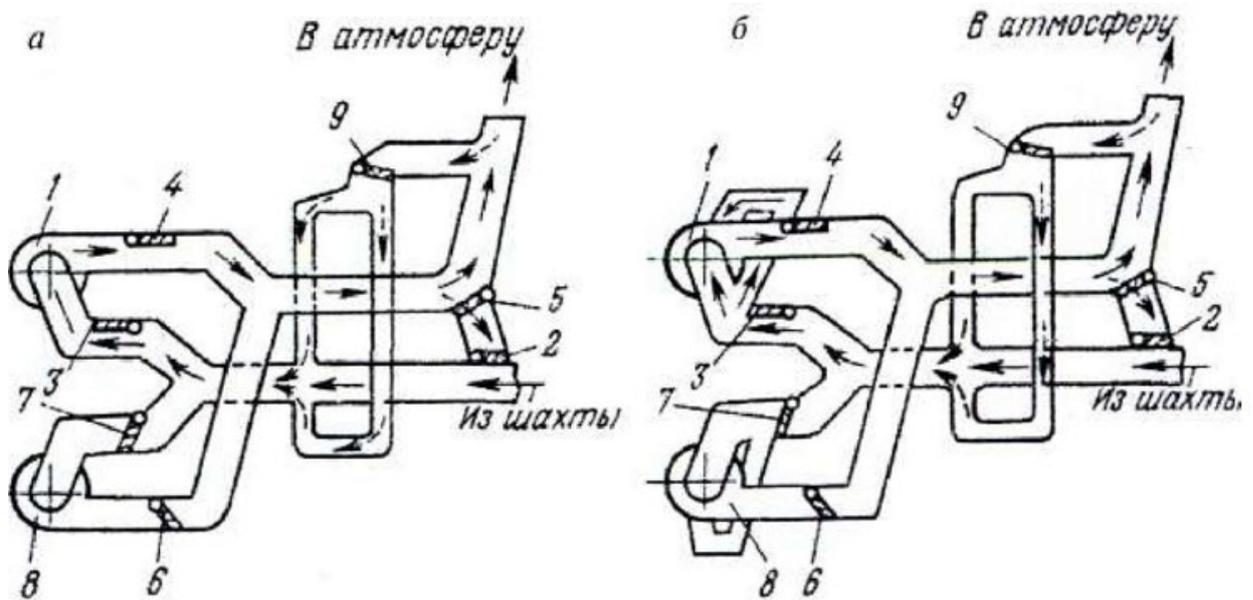


Рис. 1.1 - Схеми головного провітрювання з відцентровими вентиляторами:
а – однобічне всмоктування, б – двобічне всмоктування

Під час функціонування робочого вентилятора 1 у режимі всмоктування (нормальна робота), забезпечується наступний стан заслінок (ляд): відкритими є ляди 2 (підвідного каналу), 3 (комутації всмоктувального каналу), 4 (відсікаюча нагнітального каналу) та 5 (дифузора). При цьому ляди 6 (відсікаюча), 7 (комутації резервного вентилятора 8) та 9 (всмоктувальної будки) залишаються закритими. Повітря надходить до робочого агрегату через головний підвідний та всмоктувальний канали (рух показано суцільними стрілками) і нагнітається в атмосферу через нагнітальні канали та дифузор. Перемикання на резервний вентилятор вимагає закриття ляд 3 та 4 та відкриття ляд 6 та 7 [7].

У реверсивному режимі (робота на нагнітання) вентилятор всмоктує повітря з атмосфери через відкриту ляду 9 всмоктувальної будки. Далі він нагнітає це повітря в шахту через обвідний канал, сполучений із підвідним каналом (рух повітря позначено пунктирними стрілками). Ляда 5 дифузора в цьому режимі закрита.

1.3. Аналіз технічних вимог до електропривода вентилятора під час функціонування в загальній мережі електропостачання

Рівень енергоспоживання турбомашинами є надзвичайно високим, особливо у таких ключових галузях, як нафтова, газова, хімічна, гірничовидобувна промисловість та у системах водопостачання (комунального й промислового). Ця проблема має глобальний масштаб: у промислово розвинених країнах 50% електроенергії йде на електроприводи, причому понад половина цього споживання припадає безпосередньо на турбомеханізми.

Через зростання вартості енергоресурсів останнім часом чітко простежується тенденція до підвищення цін на електроенергію. Водночас, значного зниження (до 25–30%) рівня електроспоживання турбомеханізмами можна досягти шляхом застосування регульованого електропривода [7].

Відцентрові насоси, вентилятори та компресори формують специфічний клас навантажувальних машин (механізми з так званою вентиляторною характеристикою). Ця особливість, у поєднанні з їхньою великою енергоємністю, зумовлює необхідність застосування найбільш технічно й економічно вигідних систем електропривода. Такі системи не лише покращують якість технологічного процесу, але й знижують споживання електричної енергії.

Широке впровадження регульованих електроприводів змінило їхню роль: сучасний електропривод є не просто енергосиловою установкою для забезпечення механічною енергією, а й ключовим засобом керування технологічними процесами. Це зумовлено тим, що якість виробничих процесів тепер значною мірою залежить від інтеграції систем керування регульованими електроприводами із загальною технологічною автоматикою.

У процесі експлуатації вентиляторних установок часто виникає необхідність одночасного підключення кількох вентиляторів до спільної мережі. Ці вентилятори повинні не лише долати індивідуальний опір своїх ділянок, а й працювати спільно на одну загальну мережу.

Вентилятори можуть функціонувати паралельно, послідовно або одночасно в обох режимах. До спільної роботи можна залучати будь-яку кількість агрегатів.

Паралельний режим використовується, коли загальну необхідну подачу недоцільно або неможливо забезпечити однією машиною. Він також часто застосовується для регулювання подачі в широкому діапазоні шляхом зміни кількості одночасно працюючих вентиляторів.

Спільне функціонування вентиляторів є складним через взаємодію одночасно працюючих турбомашин та чутливість їхніх параметрів до характеристик зовнішньої мережі. З цієї причини будь-якому одночасному приєднанню кількох агрегатів до спільної мережі має передувати ретельний аналіз їхньої сумісної роботи [8,9].

Розглянемо схему паралельної роботи двох ідентичних вентиляторів, розташованих поруч і підключених до спільної мережі (рис. 1.2, а). За такого розміщення гідравлічний опір ділянок мережі до точки 0 можна ігнорувати. Отже, вважається, що обидві машини працюють безпосередньо на зовнішню мережу 0–0.

Прийmemo як початкове припущення, що ці турбомашини мають ідентичні напірні характеристики (на рис. 1.2, б це лінія $H_{1,2}$).

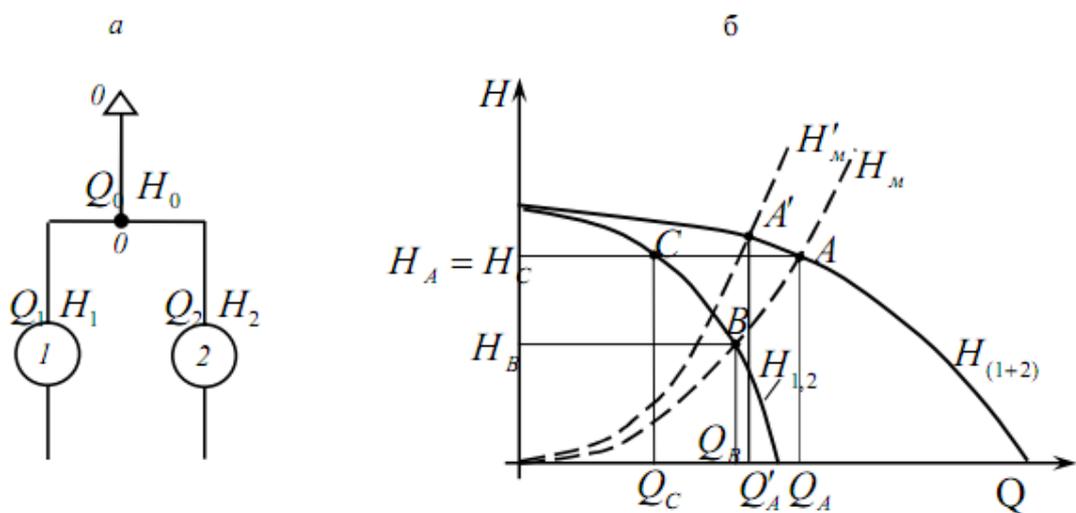


Рис. 1.2 - Характеристики паралельної роботи двох однакових вентиляторів у системах промислової вентиляції: а – схема агрегату; б – навантажувальні характеристики, робочі точки

Під час паралельної роботи вентиляторів обов'язково дотримуються такі співвідношення [10].:

$$Q_0 = Q_1 + Q_2; H_0 = H_1 = H_2.$$

Робоча точка вентиляторної установки буде точкою В, а параметри роботи (подача Q_B та напір H_B) відповідатимуть окремо працюючому вентилятору.

Паралельне ввімкнення різних турбомашин може призвести до того, що результат роботи всього агрегату буде гіршим, ніж у найефективнішої з них. Тому такі агрегати не використовують, особливо коли напірні характеристики машин значно відрізняються. Якщо ж таке приєднання необхідне, слід провести детальний аналіз їхньої сумісної роботи [11].

При роботі вентиляторів у мережах практично завжди виникають періодичні коливання таких параметрів, як продуктивність, тиск і потужність. Це відбувається внаслідок зміни характеристик самих вентиляторів або мереж (рис. 1.3).

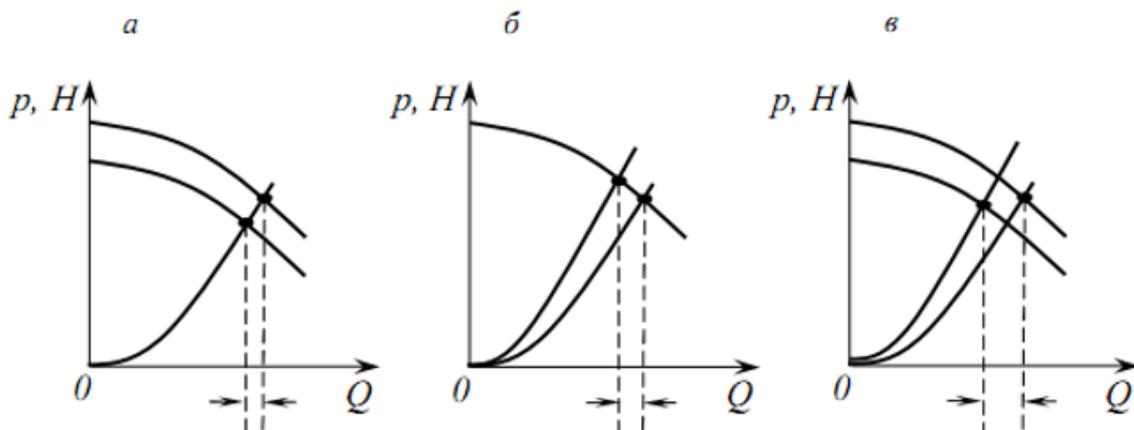


Рис.1.3. - Стаціонарний режим роботи вентилятора при зміні вентиляторної характеристики (а), мережі (б) та вентилятора і мережі (в)

Визначаючи найбільш доцільний спосіб і діапазон регулювання швидкості електропривода, необхідно взяти до уваги: через сезонні коливання тиску й температури зовнішнього середовища потреба в регулюванні продуктивності складає 10–15%.

Система регулювання та електропривод вентиляторів зобов'язані забезпечувати:

- Плавне та широке регулювання: Глибина регулювання має становити 1:2 за продуктивністю та 1:3 за тиском, із плавним характером зміни параметрів.
- Максимальну економію: Досягнення якомога ширшої зони економічної роботи вентилятора.
- Високу ефективність: Підтримка високих енергетичних показників (ККД і коефіцієнта потужності).
- Надійність роботи: Здатність зберігати стійку швидкість обертання при різких змінах навантаження або коливаннях напруги мережі.
- Гнучкість: Можливість оперативного втручання та регулювання робочого режиму вентилятора [14].

Зміна швидкості обертання робочого колеса визнана найперспективнішим способом регулювання продуктивності. Це пояснюється тим, що при стабільній зовнішній мережі параметри турбомашин підпорядковуються таким залежностям:

1. подача змінюється прямо пропорційно зміні частоти;
2. напір — пропорційно квадрату частоти;
3. споживана потужність — пропорційно кубу частоти обертання.

1.4. Проблеми та шляхи енергозбереження у вентиляційних установках сучасних будівель

Сучасний алгоритм керування вентиляторами головного провітрювання, поширений на більшості шахт, є неефективним. Методи, які він використовує (формування постійного резерву продуктивності або зменшення подачі повітря у гірничі виробки), не дозволяють досягти необхідних показників, зокрема: скорочення витрат електроенергії, покращення точності й оперативності регулювання, а також підвищення рівня безпеки під час гірничих робіт.

Вентиляція шахт і рудників є значною статтею витрат, сягаючи до 7% валового національного продукту, причому лєвова частка цих коштів йде на оплату електроенергії, спожитої вентиляторними установками.

Наявні методи й алгоритми не дозволяють ефективно та оперативно керувати цими процесами. Статистика показує, що на 75% ВГП не реалізовано оперативне плавне регулювання продуктивності, а близько 20% вентиляторів працюють без жодного регулювання. Така ситуація спричиняє невиправдано високі перевитрати електроенергії та прискорює зношування устаткування.

Підвищення ефективності управління шахтними ВГП лежить у площині використання новітніх алгоритмів та засобів автоматизації, які дозволяють інтегрувати управління в єдину централізовану систему. Така система забезпечить низку значних переваг: оперативне усунення загазованості, мінімізацію простоїв виймальної техніки (через газові обмеження), а також зменшення загального споживання повітря й електроенергії завдяки оптимізованому та оперативному регулюванню продуктивності ВГП [8].

1.5. Способи керування режимами вентиляторних установок

Зміна продуктивності є основною метою регулювання вентиляторів. Для досягнення цієї мети застосовуються два методи: якісний метод, що передбачає коригування характеристик вентиляторів, та кількісний метод, який полягає у зміні характеристик мереж (див. рис. 1.4).

Хоча кількісний метод (регулювання за допомогою дроселя або засувки для збільшення опору повітропроводу) є надзвичайно простим у реалізації, він має два суттєві недоліки: він у край неекономічний і дає змогу регулювати продуктивність лише в діапазоні від номінальної подачі до її зменшення.

Економічна перевага якісного регулювання є очевидною. Воно здійснюється за рахунок коригування швидкості обертання, зміни геометричних характеристик вентилятора або впровадження напрямних апаратів. Ці методи дозволяють безпосередньо змінювати характеристику вентилятора і, відповідно, його продуктивність.

В даний час переважна частина вентиляторів використовує електродвигуни змінного струму. Їхня швидкість обертання (найчастіше 720, 960, 1440, 2880 об/хв) визначається частотою струму і кількістю пар полюсів та мало залежить від навантаження [9].

Паралельно розширюється виробництво багатошвидкісних електродвигунів (з можливістю перемикання пар полюсів). Ці двигуни переважно двошвидкісні і забезпечують дискретну зміну числа обертів (наприклад, між 2880 і 1440 об/хв). Однак їхніми основними недоліками є великі габарити та висока вартість.

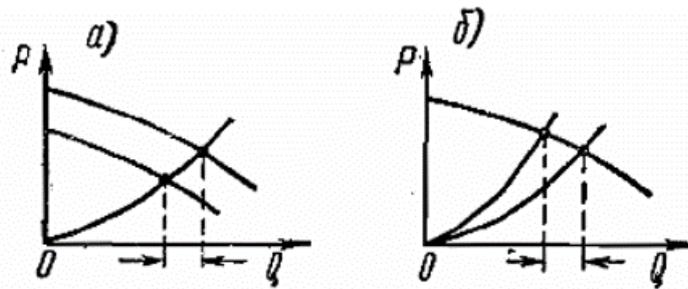


Рис. 1.4 – Стаціонарна робота вентилятора в мережі при якісному (а) та кількісному (б) регулюванні.

Найбільш доцільний спосіб з'єднання — пряме підключення електродвигунів змінного струму до вентиляторів (забезпечує надійність, низький шум, менші габарити та мінімізує втрати). Однак це суттєво ускладнює регулювання через зміну швидкості обертання.

Агрегатні електричні системи (Леонарда, Спідлера та подібні) є надто складними та громіздкими і тому не використовуються для вентиляторних установок.

Хоча двигуни постійного струму пропонують просте та економічне регулювання швидкості електричними методами, їхнє застосування обмежене через рідкісне використання постійного струму в силових мережах.

У випадку використання проміжної передачі (хоча вона є менш оптимальною), регулювання швидкості обертання вентилятора досягається зміною її передавального числа. Як правило, застосовують ремінну передачу (клинову або плоску), регулюючи оберти шляхом варіювання діаметрів шківів.

У разі застосування спеціальних клиновидних ременів є можливість використати розтискний шків (рис. 1.5). Його діаметр змінюється при зміні натягу, що дозволяє регулювати передавальне число у широких межах [9].

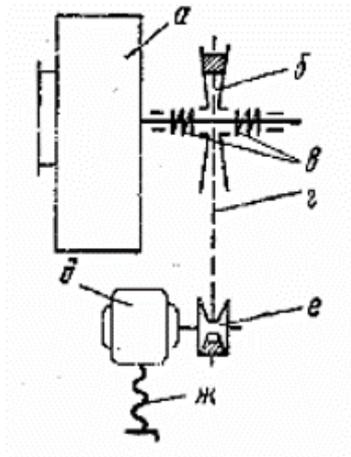


Рис. 1.5. - Схема роботи варіатора: а – вентилятор; б – розтискний шків; в – пружини; г – ремінь; д – електродвигун; е – звичайний шків двигуна; ж – механізм натягу ремня.

Для регулювання великих установок успішно застосовуються гідromуфти (рис. 1.6). Вони складаються з двох співвісних роторів — ведучого (на валу двигуна) та веденого (на валу вентилятора). Обертання передається через масло, що заповнює кільцевий простір між лопатками роторів. Число обертів вентилятора прямо залежить від кількості (або тиску) цієї рідини. Однак існуючі конструкції гідromуфт складні, дорогі та мають недостатньо високий ККД при глибокому регулюванні [12].

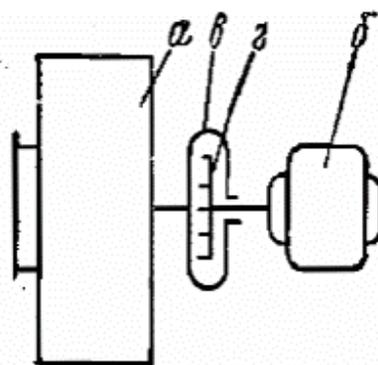


Рис. 1.6. - Схема роботи гідromуфти: а – вентилятор; б – електродвигун; в – захисний кожух; г – турбіна гідromуфти

Електромуфти, які працюють на принципі електромагнітної індукції, є досить перспективними для регулювання вентиляторів. Електромуфта (рис. 1.7) складається з індуктора: його вал з'єднується з валом вентилятора, а статор — з валом двигуна. Зміна струму збудження коригує силу магнітного потоку та взаємодію між статором і якорем, що дозволяє регулювати число обертів вентилятора в широких межах. Істотною перевагою є просте дистанційне керування, хоча ККД при глибокому регулюванні залишається недостатньо високим.

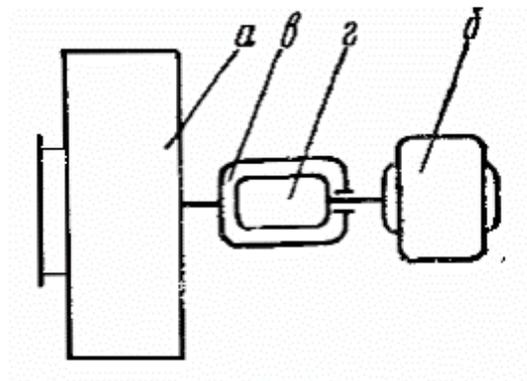


Рис. 1.7. - Схема роботи електромуфти: а – вентилятор; б – електродвигун; в – статор електромуфти; г – ротор

Регулювання геометричних параметрів є одним зі способів контролю вентиляторів, і його можна здійснювати багатьма методами. Цей процес найлегше реалізується в осьових моделях за допомогою повороту або зміни числа робочих лопаток.

Відцентрові вентилятори дозволяють реалізувати ефективний метод регулювання — зміну активної ширини колеса за допомогою осьового переміщення диска (рис. 1.8). Переміщення диска може здійснюватися стрижнем, проведеним через порожнистий вал, або іншим способом. Варто зазначити, що цей тип регулювання складний у виконанні для коліс із двояковигнутими криволінійними лопатками [12].

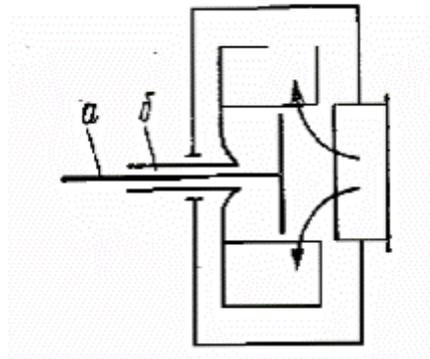


Рис. 1.8. - Схема роботи вентилятора з регулюванням активної ширини колеса: а – вал регульованого диска; б – пустотілий вал вентилятора

Наразі для якісного регулювання вентиляторів дедалі частіше застосовуються лопаткові напрямні апарати. Вони є конструктивно простими та досить ефективними і встановлюються перед всмоктувальними отворами. Поворот лопаток змінює швидкість закручування потоку, що надходить до колеса, в результаті чого змінюються тиск і продуктивність. При цьому ККД знижується значно менше, ніж при дроселюванні.

Для зручного порівняння регулюючих пристроїв використовують стандартизовані графіки регулювання, представлені в координатах N/N_0 проти Q/Q_0 . Параметри з індексом 0 (N_0 , Q_0) позначають потужність і продуктивність на вихідному (номінальному) режимі, тоді як параметри без індексу (N , Q) — їхні значення на режимі регулювання [11].

Критерій економічності регулювання визначається мінімізацією відносного споживання потужності. Іншими словами, чим менше співвідношення фактичної потужності до номінальної (N/N_0) при збереженні заданого рівня відносної продуктивності (Q/Q_0), тим ефективнішим є метод.

Графік регулювання відцентрового вентилятора (рис. 1.9), побудований на основі випробувань із використанням дроселя, напрямного апарату та електромuftи, чітко ілюструє економічну ефективність. Як і в більшості аналогічних випадків, розташування кривих підтверджує високу перевагу

електромуфти порівняно з напрямним апаратом і значну перевагу над дроселем [3].

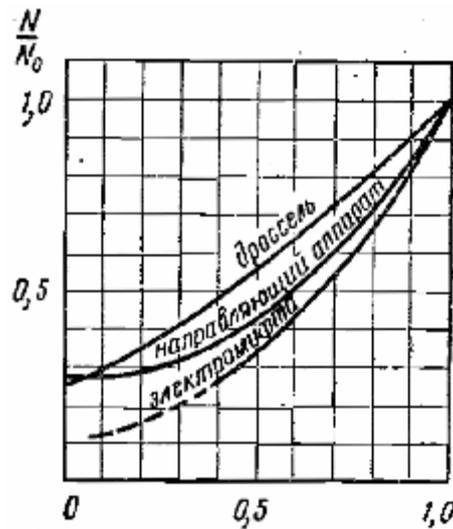


Рис. 1.9 – Характеристика регулювання відцентрового вентилятора

1.6. Основні джерела енергозбереження у вентиляційних установках

Функціонування вентиляторної установки неминуче супроводжується втратами енергії. Ці втрати проявляються як втрати тиску (на подолання опорів установки та потоку повітря) і втрати продуктивності (витоки через пристрої та стінки каналів). На практиці втрати тиску можуть сягати 15-30% депресії вентилятора, а витоки — 5-20% його продуктивності. Такі втрати неминуче впливають на експлуатаційні витрати, зокрема на споживання електроенергії протягом усього терміну служби установки.

Економічна ефективність вентиляторної установки закладається вже на етапі її створення і охоплює весь процес: розрахунок провітрювання, визначення параметрів головної установки, вибір устаткування, проектування систем вентиляційних каналів і будівлі установки. Необхідно забезпечити герметичність складових та мінімальні втрати тиску. Слід пам'ятати: економія на якості неминуче призведе до подальших експлуатаційних втрат [14].

Вентиляторні установки є споживачами-регулювальниками (С-Р). Якщо застосовується двоставковий тариф, що включає плату за пікове навантаження, підприємство мусить обмежувати споживання у години максимальних навантажень енергосистеми. Зонний тариф також змушує скорочувати споживання в дорогі часові періоди.

Однак на шахтах, де С-Р лише регулюють зовнішні піки енергосистеми, але не використовуються для внутрішнього вирівнювання навантажень у решту часу, зростає їхня власна нерівномірність між максимумами. Це часто призводить до необхідності модернізації (збільшення пропускної спроможності) елементів системи електропостачання, що є критичним для уникнення перевантажень, додаткових втрат енергії та забезпечення надійності [8].

Згідно з чинними Правилами безпеки, головні установки вентиляторів повинні функціонувати безперервно, оскільки їхнє вимкнення не допускається. Єдиний дозволений вплив на їхню роботу — це регулювання.

Існують два принципово різні методи регулювання режиму роботи вентиляторної установки, що залежать від її типу:

Через механічні параметри: Для відцентрових вентиляторів це поворот лопаток напрямного апарату, а для осьових — поворот лопаток робочого колеса.

Через електричні параметри: Регулювання частоти обертання вентилятора шляхом зміни частоти обертання приводного електродвигуна.

Хоча другий метод регулювання (зміна частоти обертання) економічно вигідніший, він, однак, передбачає суттєві капітальні вкладення для його реалізації.

У багатьох секторах, таких як промисловість, транспорт, сільське господарство та ЖКГ, типовою є помилка надмірного вибору обладнання (з великим перевищенням за продуктивністю та потужністю). У ЖКГ, наприклад, це проявляється у завищених параметрах вентиляторів (продуктивність, напір)

та потужності їхніх двигунів. Недовантаження цих агрегатів, крім марних капітальних витрат, призводить до зростання втрат електроенергії (W) в асинхронних двигунах і в загальній електромережі [16]:

$$\Delta W = 3((K_3 \cdot P_n) / (3 \cdot U_\phi \cdot \eta_e))^2 \cdot R_e \cdot T,$$

де P_n , K_3 , U_ϕ , R_e , T - відповідно номінальна потужність, коефіцієнт завантаження, фазна напруга АД, еквівалентний електричний опір лінії, що сполучає АД і джерело електричної енергії, T - час роботи установки;

де P_n , K_3 , U_ϕ , R_e , T - відповідно номінальна потужність, коефіцієнт завантаження, фазна напруга АД, еквівалентний електричний опір лінії, що сполучає АД і джерело електричної енергії, T - час роботи установки;

$\eta_e = \cos j_d h_d$ - енергетичний ККД двигуна.

Оскільки $\cos j_d$ і h_d при недовантаженні різко знижуються, то при реальному, наприклад, $K_3 = 0,7$ $\eta_e = 0,45 \dots 0,6$ і, отже, з формули видно, що ΔW обернено пропорційні до квадрата η_e , швидко ростуть.

Перетворювачі частоти (ПЧ), безумовно, здатні скоротити втрати W. Однак, через необхідність обирати ПЧ із потужністю, трохи вищою за номінальну потужність АД, його вартість виявляється більшою, ніж та, що відповідає б фактичному робочому навантаженню.

При виборі автоматизованого електропривода ключовим критерієм є мінімізація відношення "ціна/якість виконання вимог" (ц/я). Намагання придбати найдешевшу систему гарантовано призводить до погіршення якості: це виражається у зростанні енерго- та ресурсоемності, а також у зниженні продуктивності, безпеки, надійності, терміну служби і, відповідно, ефективності ЕМС, через невиконання низки важливих функцій [18].

1.8. Заходи для зниження енергоспоживання в системах та установках

Як зазначалося, вентиляторні установки є споживачами-регулювальниками (C-P). Ефективність їхньої роботи може бути підвищена за таких умов:

Критерій ефективності — прибуток: Мінімізація електроспоживання не є єдиним показником ефективності. Кращим показником слугує прибуток, отриманий споживачем. Максимізувати прибуток можна, знижуючи споживання та переходячи в зони мінімальної оплати за диференційованим тарифом. Однак зміна режимів роботи ШВУ (шахтної вентиляторної установки) може скоротити міжремонтні періоди і збільшити експлуатаційні витрати, що, своєю чергою, знижує прибуток.

Відповідність тарифів витратам: Витрати на генерацію електроенергії перевищують витрати на її споживання і практично відповідають ступінчастій циклічній структурі тарифів.

Регулювання енергоекономічних взаємодій в межах ЕЕС здійснюється через тарифи на електроенергію. НКРЕ (Національна комісія з регулювання електроенергетики) відповідає за встановлення тарифних коефіцієнтів, диференційованих за часом доби. Досконалість цих взаємодій має вирішальне значення для формування енергетичної стратегії розвитку ЕЕС України.

Інтегральні енергоекономічні характеристики вентиляторних комплексів, що функціонують в умовах диференційованих за часом доби та сезонами тарифів на електричну енергію, будуть представлені у вигляді:

Сумарної енергетичної величини для виділеного i -го робочого циклу в j -му добовому періоді: ΣW_i (кВт·год/цикл).

Сумарної вартості спожитої електричної енергії для виділеного циклу: ΣC_i (грн./цикл).

Сумарна енергетична величина виділеного циклу ΣW_i , кВт.ч/цикл, визначається наступним співвідношенням [18].:

$$\Sigma W_i = W_{ДНП} + W_{ВНП} + W_{УНП} + W_{НМН}, \quad (1.1)$$

де $W_{ДНП}$, $W_{ВНП}$, $W_{УНП}$, $W_{НМН}$, W_i - величини споживаної електромагнітної енергії ШВУ відповідно в денному напівпіку, вечірньому напівпіку, уранішньому напівпіку і нічному мінімумі ЕЕС, кВт·г.

Вартість спожитої електромагнітної енергії за виділений (річний) цикл роботи ШВУ, ΣC_i , грн./цикл, визначається співвідношенням:

$$\Sigma C_i = (W_{ДНП} + W_{ВНП} + W_{УНП}) \times k_{\text{обл.ен}} \times k_{\text{тарифНП}} + W_{НМН} \times k_{\text{обл.ен}} \times k_{\text{тарифНМН}}$$

де $k_{\text{обл.ен}}$ - тарифний коефіцієнт, встановлюваний регіональним розподільником електромагнітної енергії, грн./кВт·г;

$k_{\text{тарифНП}}$, $k_{\text{тарифНМН}}$ - тарифні коефіцієнти, що встановлюються НКІ відповідно для напівпіку і нічного мінімуму ЕЕС.

Основою успішної та енергоефективної роботи вентиляторної установки є правильно підібраний привод. На шахтах I категорії допускається заміна існуючих приводів ШВУ на ПЧ-АД.

Впровадження РЕП призводить до спрощення технологічного циклу та автоматизації процесу, що вимагає перегляду технологічних схем і норм проектування для максимального використання його переваг. Це критично, враховуючи, що капітальні витрати на РЕП вищі, ніж на нерегульований привод.

Обґрунтування рішення про РЕП має бути закріплене техніко-економічним аналізом, який враховує всі аспекти. Доцільність цих витрат

(завдяки відмові від механічних регуляторів, як-от дроселі чи напрямні апарати) визначається не тільки економією енергоресурсів, а й такими чинниками:

Додаткова генерація електроенергії під час пікового навантаження.

Продовження міжремонтного періоду та зниження витрат на обслуговування.

Позитивний екологічний ефект (скорочення викидів).

Регульований електропривод (РЕП), як метод енергозбереження, вважається окупним (згідно з численними вітчизняними та зарубіжними дослідженнями і практикою), якщо період його окупності не перевищує п'яти років. Такий підхід до проектів впровадження РЕП є традиційним для промислово розвинених країн, які вирішують проблеми енерго- і ресурсозбереження на основі довгострокової державної політики.

Для оцінки ефективності використання регульованого електропривода застосовуються ключові інтегральні показники.

Коефіцієнт питомої економії електроенергії, вклад, що враховує, 1 кВт встановленій потужності регульованого електроприводу в економію електроенергії, можна визначити як [20]:

$$K_e = E/P_{РЕП} \quad (1.2)$$

де E - економія електроенергії (кВт·г/рік); $P_{РЕП}$ - встановлена потужність двигуна.

Якщо $K_e > 800$, те оснащення механізмів РЕП, як правило, вважається доцільним.

1.8. Модернізація та оптимізація вентиляційних систем

Реверсування вентиляторів типу ВОКД відбувається через обвідні канали. Для вентиляторів ВОД реверс є значно складнішим: він вимагає вимкнення, наступного реверсування обертання та механічного розвороту 28 лопаток (14 напрямно-спрямляючих і 14 випрямляючих). Надійність цих систем, особливо під час роботи у реверсивному режимі, низька.

Завдяки новим аеродинамічним розробкам тепер можливо створювати одноступінчаті осьові вентилятори. Вони здатні досягати тих самих параметрів тиску і продуктивності, що й двоступінчаті ВОКД та ВОД.

Модернізація зазначених вентиляторів переважно полягає у заміні двоступінчастого ротора на одноступінчастий та заміні поворотно-лопатевого НА і СА на неповоротні, жорстко зварені елементи, інтегровані між корпусом (кожухом) і втулкою вентилятора.

У ході модернізації, наприклад, вентилятора ВОКД, з проміжного кожуха демонтується спрямляюче-напрямний апарат (23 лопатки з поворотними закрилками та електроприводом). Замість нього встановлюються 23 листові лопатки спеціальної геометрії, зварені між втулкою та корпусом. Проєм у втулці, що утворився після демонтажу другого ступеня, герметизується. Механізм повороту лопаток (кривошипно-шатунова колонка з підшипниковим повзуном) розташовується у нижній внутрішній частині втулки кожуха. Регулювання та реверсування продуктивності на ходу вентилятора здійснюється поворотом валу серійним однообертним механізмом МЕО в діапазоні 120° протягом 1,5-2 хвилин. Двоступінчастий ротор замінюється на одноступінчастий ротор з вісьмома лопатками, розробленими під необхідні вентиляційні параметри [20].

Модернізація вентилятора ВОД-40 здійснюється за аналогічним конструктивним принципом. Шляхом граничного спрощення конструкції (зокрема, усунення двоступінчастого ротора з 24 лопатками та поворотно-

лопатевих спрямляючих і напрямних апаратів із 28 лопатками), досягається суттєве підвищення надійності та економічності машини.

Для вентиляторів ВО-36К результати вимірів демонструють зростання номінального ККД з 0,73–0,74 до 0,82, а експлуатаційного ККД — з 0,55 до 0,75–0,8. За попередніми техніко-економічними розрахунками, термін окупності устаткування не перевищує одного року, оскільки економія електроенергії за цей період складає понад 250 000 гривень.

1.9. Інвестиційна привабливість заходів з енергозбереження у вентиляційних установках

Провідні вуглевидобувні держави (включаючи Німеччину, Казахстан, Росію, Україну, Францію) вимушені, виходячи з міркувань економічної безпеки та соціальної рівноваги, здійснювати дотування вугільної промисловості у межах своїх фінансових можливостей. Враховуючи, що фінансові можливості уряду України для дотування національної вугільної промисловості є обмеженими і не прогнозується їхнє збільшення у найближчій перспективі, особливо актуалізується проблема залучення зовнішніх інвестицій.

Концерн "Енерго" був заснований у 1992 році з метою практичної реалізації організаційних та економічних механізмів, передбачених "Комплексною програмою соціального і економічного розвитку Донбасу". Програма, розроблена інститутами НАН України, ДонДТУ та адміністраціями Донецької, Луганської і Дніпропетровської областей (на підставі розпорядження Кабінету Міністрів України № 603-р від 16.09.92 р.), мала на меті: забезпечення регіону енергетичними і сировинними ресурсами, сприяння технічному переозброєнню підприємств енергетики, вугільної, металургійної та інших стратегічно важливих галузей промисловості, а також розвиток соціальної сфери і зовнішньоекономічної діяльності.

На відміну від багатьох компаній, що виникли під час економічних реформ, концерн "Енерго" вирізняється унікальною стратегією співпраці. Вона обов'язково включає: випереджаюче інвестування для стимулювання виробництва, продуктивності праці та зниження собівартості; забезпечення оборотними коштами та фінансову санацію; підвищення конкурентоспроможності продукції. Крім економічних цілей, концерн приділяє увагу соціальній сфері: гарантує своєчасну виплату зростаючої зарплати, сплату податків, збереження робочих місць та реалізацію соціальних програм. Важливо, що інвестування "Енерго" доповнюється впровадженням новітніх технологій для підйому виробництва, які вже успішно апробовані в Україні та СНД на підприємствах гірничо-металургійного, машинобудівного та енергетичного комплексів.

Концерн "Енерго", попри ризики інвестування у депресивну вугільну галузь, взяв на себе зобов'язання не лише щодо розробки та реалізації програм підтримки й оновлення шахтного фонду та впровадження передової техніки й технологій, а й створив на шахті умови для успішного освоєння цих інвестицій. Позитивний досвід співпраці шахти "Червоноармійська-західна" № 1 з вітчизняними інвесторами спростовує усталений стереотип про безперспективність інвестування в українські вуглевидобувні підприємства [7].

1.10. Економічні аспекти експлуатації вентиляційних установок

Вентиляторні установки, налагоджені бездоганно, можуть через певний проміжок часу виявитися незадовільними, якщо не буде забезпечено належне експлуатаційне обслуговування.

Коректна експлуатація вентиляторних установок передбачає не лише повсякденне спостереження за їхнім технічним станом, своєчасне проведення ремонту, а також дотримання правил техніки безпеки та пожежної охорони, але й забезпечення мінімізації матеріальних витрат.

Сукупні витрати на експлуатацію вентиляторних установок за визначений часовий інтервал, які значною мірою визначаються вартістю електричної енергії, що споживається двигунами, у більшості випадків перевищують частку їхньої будівельної вартості, віднесеної до того ж проміжку часу.

Кількість електроенергії, споживаної двигуном, залежить від режиму роботи мережі, вентилятора та двигуна.

Оптимізація мережі: Зростання витрати через мережу різко збільшує потужність відцентрових вентиляторів. Тому доцільно відключати недіючі відгалуження.

Зниження обертів: Ще більший ефект (наприклад, при сезонній зміні) дає зниження числа обертів вентилятора, що призводить до різкого зниження потужності як відцентрових, так і осьових вентиляторів (пропорційно кубу зменшення обертів).

Врахування двигуна: Зменшення потужності вентилятора не призводить до пропорційного зменшення потужності, споживаної двигуном, оскільки в недовантаженого електродвигуна знижується $\cos\varphi$. Тому при постійній зміні режиму необхідна заміна двигуна.

Економічна доцільність: Рентабельною може виявитися і заміна вентилятора. Слід пам'ятати: навіть незначне збільшення ККД установки швидко окупить витрати на ремонт або заміну обладнання [21].

Наприклад, вартість установки (включаючи проектування) станов 30000 грн. Установка потужністю 30 кВт працює щодоби по 21 годину. Рі (365 днів) вартість електроенергії з розрахунку 0,2436 грн за 1 кВт-г складає

$$30 \cdot 21 \cdot 365 \cdot 0,2436 = 56015,82 \text{ грн.}$$

В результаті заміни вентилятора на більш відповідний (що обійшло 15000 грн.) ККД установки збільшився на 10% і це дало річну економію електроенергії в $56016 \cdot 0,1 = 5601,6$ грн. і з надлишком окупило витрати реконструкцію.

Висновок.

Витрати на утримання обслуговуючого персоналу є другим важливим фактором зниження експлуатаційної вартості вентиляторних установок. Впровадження автоматизації та диспетчеризації керування забезпечує механізацію і здешевлення процесу обслуговування.

Автоматизовані системи забезпечують регулювання в поточному режимі (наприклад, керування засувками моторчиками) та захист обладнання (зокрема, вимкнення двигунів тепловими реле у випадку перевантаження). Диспетчеризація централізує керування, дозволяючи контролювати всі установки з єдиного пункту. Крім того, важливо, щоб резервні пускові пристрої знаходилися біля самого обладнання.

РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА ЕФЕКТИВНОЇ СИСТЕМИ ВЕНТИЛЯЦІЇ

Equation Chapter 1 Section 2

2.1 Загальна інформація

З метою забезпечення заданих параметрів повітря робочої зони застосовується система вентилявання, що використовує прецизійні вентилятори, які є різновидом шафних моноблочних агрегатів. Вони обладнані системою мікропроцесорного керування, що дозволяє підтримувати високу точність температури та відносної вологості у приміщенні.

Відмінні характеристики прецизійних вентиляторів:

Точність контролю: Забезпечення контролю та керування температурою з точністю до 1С і відносною вологістю з точністю до 2%.

Надійність: Висока безвідмовність при безперервній експлуатації.

Експлуатаційна стійкість: Здатність функціонувати в широкому діапазоні температур навколишнього середовища (до -30⁰С).

Режим економії: Можливість роботи в енергозберігаючому режимі в нічний час.

Інтеграційні можливості: Сумісність із загальними системами керування мікрокліматом будівлі.

Прецизійна вентиляційна система з повітряним охолодженням має двокомпонентну будову, що включає внутрішній та зовнішній блоки.

Внутрішній блок містить такі функціональні елементи: компресор, випарний теплообмінник, вентилятор, зволожувач повітря, повітряний фільтр, електричний підігрівник повітря та систему автоматичного керування. Зовнішній блок являє собою конденсатор із повітряним охолодженням холодоагенту. Робочим холодоагентом є фреон марки R407C. Подача

обробленого повітря у приміщення відбувається за допомогою мережі повітропроводів, розташованої у просторі підвісної стелі [22].

Точне підтримання параметрів внутрішнього повітря є обов'язковою вимогою у приміщеннях №1, 3, 4, 5. У приміщенні №5 потреба в прокладанні великої повітророзподільчої мережі для забезпечення рівномірної подачі повітря спричиняє зростання необхідного робочого напору вентилятора.

Для ефективного подолання значного тиску можливе встановлення додаткового вентилятора у мережі повітропроводів або розділення навантаження між двома окремими системами вентилявання. Встановлення двох систем додатково підвищує надійність функціонування всієї вентиляційної системи. Подача повітря до кондиціонера може здійснюватись як через мережу повітропроводів, так і через вбудовану вентиляційну решітку, розташовану на передній або зворотній стороні установки.

Таблиця 2.1: Параметри ВУ

Параметр	Холодний період року	Теплий період року	Внутрішнє повітря (обидва періоди)
Температура, °С	-22	21,7	20
Ентальпія, кДж/кг	-20,7	51,6	–
Відносна вологість, %	–	–	50
Джерело параметрів	Б [1]	А [1]	–

2.2 Розрахунок схем вентиляції та кондиціонування повітря в приміщеннях

Точне підтримання параметрів внутрішнього повітря є обов'язковою вимогою у приміщеннях №1, 3, 4, 5. У приміщенні №5 потреба в прокладанні великої повітророзподільчої мережі для забезпечення рівномірної подачі повітря спричиняє зростання необхідного робочого напору вентилятора.

Для ефективного подолання значного тиску можливе встановлення додаткового вентилятора у мережі повітропроводів або розділення навантаження

між двома окремими системами вентиляювання. Встановлення двох систем додатково підвищує надійність функціонування всієї вентиляційної системи. Подача повітря до кондиціонера може здійснюватись як через мережу повітропроводів, так і через вбудовану вентиляційну решітку, розташовану на передній або зворотній стороні установки [26] .

Приміщення №1

а) Теплий період року

Відомі:

- витрата повітря в системі припливної вентиляції $L_1=326 \text{ м}^3/\text{год}$;
- надходження теплоти в приміщення $Q_1=1881 \text{ Вт}$;
- надходження вологи в приміщення $W_1=0,000063 \text{ кг/год}=1,7 \cdot 10^{-8} \text{ кг/с}$
(з попередніх розрахунків);
- температура зовнішнього повітря $t_{\text{зовн}}=21,7^\circ\text{C}$;
- ентальпія зовнішнього повітря $h_{\text{зовн}}=51,6 \text{ кДж/кг}$;
- температура внутрішнього повітря $t_{\text{вн}}=20^\circ\text{C}$;
- відносна вологість внутрішнього повітря $\varphi_{\text{вн}}=50\%$;
- об'єм приміщення $V_1=108,8 \text{ м}^3$ (за архітектурними даними).

1) За параметрами зовнішнього повітря t_3 , h_3 визначаю т.Н та вологовміст повітря в цій точці $d_3=11,4 \text{ г/кг}$.

2) За отриманою в розділі 2.3.2 температурою припливного повітря системи механічної вентиляції $t_{\text{пв}}=18,2^\circ\text{C}$ та $d_3=\text{const}$ отримую т.П_в з параметрами $h_{\text{пв}}=47,8 \text{ кДж/кг}$, $d_{\text{пв}}=11,4 \text{ г/кг}$.

Визначаю процедуру процесу :

$$\varepsilon_{i\delta} = \frac{\sum Q}{\sum W} \quad (2.1)$$

$$\varepsilon_{i\delta} = \frac{1,881}{1,7 \cdot 10^{-8}} = 1,11 \cdot 10^8 \approx +\infty .$$

1) За параметрами внутрішнього повітря $t_{вн}$, $\phi_{вн}$ визначаю т.В та параметри повітря в цій точці $h_{в} = 38,6$ кДж/кг, $d_{в} = 11,4$ г/кг.

2) Температура повітря на виході з вентилятора $t_{пк} = t_{вн} - 3 = 20 - 3 = 17^{\circ}\text{C}$.

Через т.В провожу промінь процесу. На перетині $\varepsilon \times t_{пк}$ отримую т.П_к з параметрами $h_{пк} = 35,5$ кДж/кг, $d_{пк} = 7,2$ г/кг.

3) Процес змішування припливного повітря системи механічної вентиляції та внутрішнього повітря в приміщенні проходить між т.П_в та т.В. Витрата повітря в т.П_в $L_{пв} = 326$ м³/год = 393 кг/год.

Загальна витрата повітря :

$$L_{в} = V_{в} + L_{пв} , \quad (2.2)$$

$$L_{в} = 108,8 + 326 = 434,8 \text{ м}^3/\text{год} = 524 \text{ кг/год}.$$

Параметри точки суміші повітря визначають за допомогою рівняння:

$$\frac{L_{в} + L_{пв}}{l_{[в-пв]}} = \frac{L_{пв}}{l_{[в-с]}} , \quad (2.3)$$

звідки

$$l_{|B-C|} = \frac{l_{|B-ПВ|} \cdot L_{ПВ}}{L_B + L_{ПВ}},$$

$$L_{кл} = \frac{\Sigma Q}{h_B - h_{ПК}}, \quad (2.4)$$

де $l_{B-ПВ}=21$ мм – довжина відрізка між т.В та т.П_В,

l_{B-C} – довжина відрізка між т.В та т.С,

$$l_{|B-C|} = \frac{21 \cdot 393}{524} = 16 \text{ мм.}$$

Параметри повітря в т.С $t_c = 18,8^\circ\text{C}$, $h_c = 45,5$ кДж/кг, $d_c = 10,3$ г/кг.

1) З'єдную т.С та т.П_к – процес обробки повітря в вентиляційній установці відповідає саме цьому відрізку.

2) Витрата повітря, що оброблюється в прецизійному вентиляторі:

$$L_{кл} = \frac{1881}{38,6 - 35,5} = 0,606 \text{ кг/с} = 1812 \text{ м}^3 / \text{год.}$$

Кількість теплоти, необхідна для охолодження повітря до заданих параметрів:

$$Q_{охл} = L_{кл} (h_c - h_{ПК}) \quad (2.5)$$

$$Q_{охл} = 0,606 \cdot (45,5 - 35,5) = 6,06 \text{ кВт.}$$

Кількість вологи, що видаляється в вентиляторі:

$$W_{вл} = L_{кл} \frac{d_c - d_{ПК}}{1000} \quad (2.6)$$

$$W_{\text{вл}} = 0,606 \cdot \frac{10,3 - 7,2}{1000} = 0,002 \text{ кг/с} = 7,2 \text{ кг/год.}$$

б) Холодний період року

Відомі:

- витрата повітря в системі припливної вентиляції $L_1 = 326 \text{ м}^3/\text{год}$;
- надходження теплоти в приміщення $Q_1 = 1881 \text{ Вт}$;
- надходження вологи в приміщення $W_1 = 0,000063 \text{ кг/год} = 1,7 \cdot 10^{-8} \text{ кг/с}$
(з попередніх розрахунків);
- температура зовнішнього повітря $t_{\text{зовн}} = -22^\circ\text{C}$;
- ентальпія зовнішнього повітря $h_{\text{зовн}} = -20,7 \text{ кДж/кг}$;
- температура внутрішнього повітря $t_{\text{вн}} = 20^\circ\text{C}$;
- відносна вологість внутрішнього повітря $\varphi_{\text{вн}} = 50\%$;
- об'єм приміщення $V_1 = 108,8 \text{ м}^3$ (за архітектурними даними).

1) За параметрами зовнішнього повітря t_3 , h_3 визначаю т.Н та вологовміст повітря в цій точці $d_3 = 0,56 \text{ г/кг}$.

За отриманою в розділі 2.3.1 температурою припливного повітря систем механічної вентиляції $t_{\text{пв}} = 21^\circ\text{C}$ та $d_3 = \text{const}$ отримую т.П_в з параметрами $h_{\text{пв}} = 23,9 \text{ кДж/кг}$, $d_{\text{пв}} = 0,56 \text{ г/кг}$.

Визначаю промінь процесу за формулою (3.1):

$$\varepsilon_{\text{іо}} = \frac{1,881}{1,7 \cdot 10^{-8}} = 1,11 \cdot 10^8 \approx +\infty .$$

За параметрами внутрішнього повітря $t_{вн}$, $\phi_{вн}$ визначаю т.В та параметри повітря в цій точці $h_B = 38,6$ кДж/кг, $d_B = 11,4$ г/кг.

Температура повітря на виході з кондиціонера $t_{пк} = t_{вн} - 3 = 20 - 3 = 17^\circ\text{C}$.

Через т.В провожу промінь процесу. На перетині $\epsilon \times t_{пк}$ отримую т.П_к з параметрами $h_{пк} = 35,5$ кДж/кг, $d_{пк} = 7,2$ г/кг.

Процес змішування припливного повітря системи механічної вентиляції та внутрішнього повітря в приміщенні проходить між т.П_в та т.В. Витрата повітря в т.П_в $L_{пв} = 326$ м³/год = 393 кг/год.

Загальна витрата повітря в т.В $L_B = 434,8$ м³/год = 524 кг/год.

Визначення точки суміші повітря за формулою (3.3):

$$l_{|e-c|} = \frac{l_{|B-пв|} \cdot L_{пв}}{L_B + L_{пв}},$$

де $l_{B-пв} = 31$ мм – довжина відрізка між т.В та т.П_в,

l_{B-c} – довжина відрізка між т.В та т.С,

$$l_{|e-c|} = \frac{31 \cdot 393}{524} = 23 \text{ мм.}$$

Параметри повітря в т.С $t_c = 21,8^\circ\text{C}$, $h_c = 27,2$ кДж/кг, $d_c = 2,2$ г/кг.

Розрахунок витрати повітря в прецизійному вентиляторі здійснюється за формулою (3.4) :

$$L_{\text{кз}} = \frac{1881}{38,6 - 35,5} = 0,606 \text{ кг} / \text{с} = 1812 \text{ м}^3 / \text{год}.$$

Теплова енергія, яка потрібна для охолодження повітря до встановлених умов:

$$Q_{\text{охл}} = L_{\text{кз}} (h_{\text{пк}} - h_{\text{с}}) \quad (2.7)$$

$$Q_{\text{охл}} = 0,606 \cdot (35,5 - 27,2) = 5,03 \text{ кВт}.$$

Обсяг вологи, який надходить у повітря під час роботи зволожувача:

$$W_{\text{вл}} = L_{\text{кз}} \frac{d_{\text{пк}} - d_{\text{с}}}{1000} \quad (2.8)$$

$$W_{\text{вл}} = 0,606 \cdot \frac{7,2 - 2,2}{1000} = 0,003 \text{ кг} / \text{с} = 10,47 \text{ кг} / \text{год}.$$

Розрахунок схем обробки повітря для інших систем прецизійного вентилявання виконується за тією ж методологією. Вхідні параметри для обчислень містяться в таблиці 2.1. Зведені результати розрахунків будуть представлені в окремій таблиці.

2.3 Аеродинамічний розрахунок систем вентиляювання

Схему повітропровідної мережі системи ПР1 подано на рисунку 2.6.

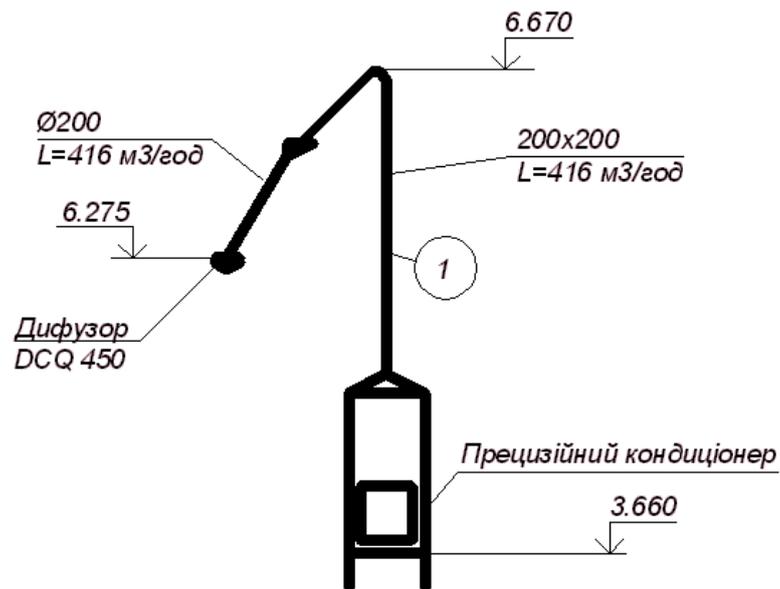


Рис. 2.1 – Розрахункова модель вентиляційної установки ПР1

1) Ділянка №1

Витрата повітря на ділянці $L=416 \text{ м}^3/\text{год} = 0,116 \text{ м}^3/\text{с} = 0,14 \text{ кг/с}$.

Довжина ділянки $l=3,7 \text{ м}$.

Площа поперечного перерізу повітропроводу:

$$f_{\text{пв}} = \frac{L}{\rho_{\text{пв}} \cdot v_{\text{пв}}} \quad (2.9)$$

де L – масова витрата повітря, кг/с;

$\rho_{\text{пв}}$ – густина повітря, кг/м³ ($\rho = 1,205 \text{ кг/м}^3$ при $t_{\text{в}}=20^\circ\text{C}$);

$v_{\text{пв}}$ – швидкість повітря, м/с (приймаю 3 м/с);

$$f_{\text{пв}} = \frac{0,14}{1,205 \cdot 3} = 0,039 \text{ м}^2.$$

Переріз повітропроводу виконано у прямокутній формі. За рекомендаціями [1] вибрано розмір 200×200 мм, що забезпечує фактичну площу перерізу $f_{\text{пвд}} = 0,04 \text{ м}^2$.

Дійсна швидкість повітря:

$$v_{\text{пв}}^{\text{д}} = \frac{L}{\rho_{\text{пв}} \cdot f_{\text{пв}}^{\text{д}}} \quad (2.10)$$

$$v_{\text{пв}}^{\text{д}} = \frac{0,14}{1,205 \cdot 0,04} = 2,9 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Втрати тиску в мережі повітропроводів на найдовшій ділянці становлять:

$$\Delta P_{\text{м}} = \sum_{i=1}^n (R \cdot \ell + Z) \quad (2.11)$$

Питома втрата тиску внаслідок тертя в повітропроводах становить:

$$R = \lambda \cdot \frac{\rho_{\text{пв}} \cdot v_{\text{пв}}^2}{2} \cdot \frac{1}{d_{\text{екв}}} \quad (2.12)$$

де λ – коефіцієнт опору тертя;

$d_{\text{екв}}$ – еквівалентний діаметр повітропроводу, м.

Еквівалентний діаметр для прямокутного перерізу повітропроводу:

$$d_{\text{екв}} = 2ab / (a + b) \quad (2.13)$$

$$d_{\text{екв}} = \frac{2 \cdot 0,2 \cdot 0,2}{0,2 + 0,2} = 0,2 \text{ м}.$$

Розрахунок коефіцієнта опору тертя проводиться за формулою Альтшуля:

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{K_{\text{екв}}}{d_{\text{екв}}} + \frac{68}{\text{Re}} \right)^{0,25} \quad (2.14)$$

де $K_{\text{екв}}=0,0001$ м приймається як абсолютна еквівалентна шорсткість сталевих повітропроводів.

$$\text{Re} = \frac{v_{\text{пв}} \cdot d_{\text{екв}}}{\nu} \quad (2.15)$$

де ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості повітря, $\text{м}^2/\text{с}$

(при $t_{\text{пв}} = 20^\circ \text{C}$, значення - $\nu = 1,51 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$).

$$\text{Re} = \frac{2,9 \cdot 0,2}{1,51 \cdot 10^{-5}} = 38411,$$

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{0,0001}{0,2} + \frac{68}{38411} \right)^{0,25} = 0,024.$$

Питомі втрати тиску на тертя на ділянці №1:

$$R = 0,024 \cdot \frac{1,205 \cdot 2,9^2}{2} \cdot \frac{1}{0,2} = 0,61 \text{ Па} / \text{м},$$

Втрати тиску:

$$Z = \sum \xi \frac{\rho_{\text{пв}} v_{\text{пв}}^2}{2} \quad (2.16)$$

де $\sum \xi$ – сума коефіцієнтів місцевих опорів на розрахунковій ділянці.

Коефіцієнти місцевих опорів [21]:

- для дросель-клапана $\xi_1 = 0,5$;
- для поворота $\xi_2 = 1,06$;
- для повітрярозподільчого пристрою - дифузора $\xi_3 = 1,3$;

Втрати тиску на місцеві опори:

$$Z = (0,5 + 1,06 + 1,3) \cdot \frac{1,205 \cdot 2,9^2}{2} = 14,5 \text{ Па}.$$

Втрати тиску на ділянці №1:

$$\Delta P_1 = 0,61 \cdot 3,7 + 14,5 = 16,8 \text{ Па.}$$

Вихідні дані для проведення аеродинамічного розрахунку системи ПР1 представлені в таблиці 3.3, а сам розрахунок системи ПР1 наведено в таблиці 3.4.

Вихідні дані для розрахунку системи ПР2 та результати аеродинамічного розрахунку цієї системи наведені відповідно в таблицях 2.2 і 2.3. Розрахункова схема системи ПР2 представлена на рисунку 2.7.

Результати аеродинамічного розрахунку усіх інших систем вентилявання зведені в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Розрахункові показники аеродинаміки системи вентиляції

№ системи	Витрата повітря L, м ³ /год	Втрати тиску в мережі, Па
ПР1	413,0	16,0
ПР2	1378,0	98,0
ПР3	1812,0	76,0
ПР4	882,0	364,0
ПР5	882,0	304,0

2.4 Підбір технічних засобів для системи вентиляції

2.4.1. Оптимальний вибір високоточного вентиляторного обладнання

З метою забезпечення параметрів внутрішнього повітря, вказаних у завданні, обрано прецизійні вентиляторні установки марки Emerson Liebert Hiross серії НРМ. Ці агрегати оснащені повітряним охолодженням конденсатора. Технічні характеристики доступні на рисунку 3.8.

Ключові переваги обраного обладнання:

Цілорічна надійність: Гарантована безвідмовність роботи.

Централізоване керування: Можливість єдиного управління кількома системами, розміщеними в одному приміщенні.

Висока енергоефективність: До 35% економії електроенергії при використанні електронно-керованого двигуна вентилятора.

Показник	Опис та діапазон значень
Холодопродуктивність	Від 4 до 100 + кВт (залежно від моделі та типу охолодження).
Витрата повітря	Від 2 000 до 25 000 + м ³ /год.
Тип холодоагенту	Переважно R410A (екологічно безпечний, з високим ККД).
Клас фільтрації	Стандартно G4 (EU4), опціонально до F7.
Електроживлення	400 В / 3 фази / 50 Гц (для більшості промислових моделей).
Рівень шуму	Оптимізований завдяки шумоізоляції корпусу (45-65 дБА на відстані 2м).
Точність підтримки T°	±0.5-1.0 °C.
Точність вологості	±2-5\%.

Рис.2.2 – Основні технічні показники вентустановок Hiross НРМ із повітряно охолоджуванним конденсатором [13]

За рисунком 2.8 при відомих з попередніх розрахунків витраті повітря та охолоджувальній потужності системи обираю:

- 1) для вентиляційної системи ПР1 з витратою повітря $L_k = 413 \text{ м}^3 / \text{год}$ та охолоджувальною потужністю $Q_{\text{охл}} = 1,62 \text{ кВт}$ - прецизійний вентилятор Liebert Hiross HPM S04 OA;
- 2) для вентиляційної системи ПР2 з витратою повітря $L_k = 1378 \text{ м}^3 / \text{год}$ та охолоджувальною потужністю $Q_{\text{охл}} = 4,67 \text{ кВт}$ - прецизійний вентилятор Liebert Hiross HPM S05 OA;
- 3) для вентиляційної системи ПР3 з витратою повітря $L_k = 1812 \text{ м}^3 / \text{год}$ та охолоджувальною потужністю $Q_{\text{охл}} = 6,06 \text{ кВт}$ - прецизійний вентилятор Liebert Hiross HPM S0 OA;
- 4) для вентиляційної системи ПР4 та ПР5 з витратою повітря $L_k = 882 \text{ м}^3 / \text{год}$ та охолоджувальною потужністю $Q_{\text{охл}} = 1,92 \text{ кВт}$ - 2 прецизійні вентилятори Liebert Hiross HPM S04 OA.

2.4.2 Вибір чилера

Подача холодної води до охолоджувачів повітря здійснюється чилером. Для його встановлення в приміщенні використовується конфігурація з виносним конденсатором повітряного охолодження [27].

Це рішення має таку компоновку:

Випарний блок (випарник, гідромодуль і розширювальні ємності) розташований всередині будівлі.

Конденсатор винесений назовні для ефективного охолодження та конденсації холодоагенту.

Такий підхід дозволяє економити простір і зменшувати акустичне навантаження в приміщенні. Насосний модуль, необхідний для підтримки достатнього тиску води для користувачів, також монтується всередині як

окремий блок. Він поставляється разом із чилером і конденсатором, відповідно до його типорозміру.

У системі використовується холодоагент R407C – зетропна суміш, яка є екологічною заміною R22, оскільки не порушує озоновий шар і не утворює небезпечних сумішей при витoku.

Температура охолодженої води на виході чилера $t_{\text{вих}}=7^{\circ}\text{C}$, зворотної — $t_{\text{зв}}=12^{\circ}\text{C}$. Загальна холодопродуктивність компресорно-випарного блоку чилера дорівнює сумарній холодопродуктивності охолоджувачів у припливних вентиляційних установках [25]:

$$Q_{\text{ч}} = Q_{\text{ox1}} + Q_{\text{ox1}} + Q_{\text{ox1}} \quad (2.17)$$

$$Q_{\text{ч}} = 4,2 + 3,6 + 1,6 = 9,4 \text{ кВт.}$$

Відповідно до каталогу обладнання Climaveneta [14], обрано випарний агрегат із холодильним навантаженням $Q_{\text{чд}}=10,5 \text{ кВт}$, у комплектації з окремим гідромодулем IDRO B та зовнішнім компресорно-конденсаторним блоком NHCR 0041. Технічні параметри системи подано на рисунку 3.9.

Відповідно до каталогу обладнання Climaveneta [24], для системи обрано випарний агрегат із холодильною потужністю $Q_{\text{чд}}=10,5 \text{ кВт}$, у комплекті з окремим гідромодулем IDRO B та зовнішнім компресорно-конденсаторним блоком NHCR 0041. Технічні характеристики обраної системи наведені на рисунку 3.9.

Параметр	Опис / Значення
Тип установки	Прецизійна шафна установка (DX – пряме випаровування)
Холодопродуктивність (явна)	від 7.0 до 105.0 кВт (залежно від моделі)
Тип вентиляторів	ЕС-вентилятори (з електронною комутацією)
Витрата повітря	від 2 100 до 28 000 м ³ /год
Напрямок повітряного потоку	Under (вниз, під фальшпідлогу) або Over (вгору)
Клас фільтрації	Стандарт G4 (опціонально F5, F7)
Холодоагент	R410A
Система керування	Мікропроцесор Evolution (з підтримкою протоколів Modbus/BACnet)
Електроживлення	400 В / 3 фази / 50 Гц

Рис. 2.3 - Технічні параметри випарних агрегатів HE FF та зовнішніх компресорно-конденсаторних блоків NHCR виробництва Climaveneta. [14]

Висновки

Для ефективного функціонування прецизійних вентиляційних систем ПР1, ПР2, ПР3, ПР4 та ПР5 необхідна потужність та продуктивність буде забезпечена шляхом встановлення відповідних моделей прецизійних кондиціонерів Liebert Hiross НРМ. Зокрема, для систем ПР4 та ПР5 передбачається спільне використання двох одиниць НРМ S04 ОА для сумарного покриття необхідних параметрів.

РОЗДІЛ 3. АВТОМАТИЗАЦІЯ СИСТЕМ ВЕНТИЛЯЦІЇ

3.1 Загальні відомості

Ефективне функціонування вентиляційних установок забезпечується Системою Автоматизації Управління (САУ). Це усуває потребу в постійному контролі з боку обслуговуючого персоналу. Крім того, САУ гарантує якісну підтримку заданих параметрів повітря в приміщенні та сприяє економії енергоресурсів. Система має функціонал для роботи згідно з часовим графіком та графіком зміщення температур.

Система автоматизації управління (САУ) припливної вентиляційної установки виконує такі функції:

Контроль температури зовнішнього повітря: Вибір режиму регулювання відповідно до пори року та коригування заданої температури в приміщенні за графіком зміщення температур.

Регулювання температури: Підтримка заданої температури припливного повітря.

Контроль фільтра: Виявлення забрудненості фільтра за допомогою пресостата ($P = 100 \text{ } 150 \text{ Па}$).

Контроль роботи вентилятора: Моніторинг за допомогою пресостата.

Захист двигуна: Захист електродвигуна вентилятора за допомогою датчика температури обмотки.

Управління засувкою: Керування засувкою зовнішнього повітря за допомогою електропривода.

Захист від замороження: Захист водяного повітропідігрівача від замерзання за датчиком температури на трубопроводі зворотньої води.

Обробка всіх сигналів від датчиків і виконавчих пристроїв здійснюється контролером. Усі компоненти САУ централізовано розміщуються у щиті

управління, який, як правило, монтується безпосередньо у вентиляційній камері поруч із обладнанням.

3.2. Функціонування САУ припливної вентиляційної системи

3.2.1 Процедура ввімкнення системи

Запуск системи можливий двома шляхами: вручну оператором (кнопка SB1 на щиті) або автоматично згідно з графіком. Контролер адаптує роботу системи: використовуючи дані датчика зовнішньої температури (2а), він визначає необхідний режим («зима» / «літо») та відповідні параметри. Температура припливного повітря регулюється на основі інформації від датчика в каналі (1а). Для забезпечення надійності передбачено автоматичний перезапуск системи після будь-якої аварійної ситуації чи відновлення електричного живлення.

3.2.2 Дія заслонки припливного повітря

Керування жалюзі заслінки здійснюється контролером через виконавчий механізм (6а). Регулювання температури припливного повітря досягається шляхом зміни ступеня відкриття жалюзі на основі даних, отриманих від датчика температури (1а). Передбачено також функцію встановлення максимального і мінімального лімітів для положення відкриття жалюзі.

3.2.3 Моніторинг стану повітряного фільтра

Для здійснення контролю забруднення фільтра застосовується пресостат (5а), який вимірює перепад тиску повітря до і після фільтрувального елемента. При досягненні значення, що перевищує заданий поріг, на приладовій панелі щита керування активується відповідний індикатор (HLE), що свідчить про необхідність заміни фільтрувального матеріалу.

3.2.4 Функціонування калорифера в зимовий сезон

При запуску системи взимку активується циркуляційний насос (3а). На основі даних давача зовнішньої температури (2а), трьохходовий клапан (3б) відкривається для попереднього прогріву повітрянагрівача. Час прогріву контролюється за допомогою давача зворотньої води (3в). Якщо після завершення прогріву температура води залишається нижчою за норму, спрацьовує аварійна сигналізація і система блокується [28].

Регулювання нагрівальної потужності калорифера здійснюється трьохходовим клапаном через контроль циркуляції теплоносія, поки температура зворотньої води не досягне заданого рівня, після чого клапан відкриває подачу гарячої води. У режимі очікування (вентилятор вимкнений) контролер підтримує задану температуру зворотньої води.

Захист від заморожування базується на температурі зворотньої води (у робочому режимі) та температурі припливного повітря (у неробочому). У разі загрози замерзання система автоматично вимикає вентилятор, вмикає насос і відкриває трьохходовий клапан.

3.2.5 Функціонування повітряного охолодника в літній сезон

При запуску системи в літньому режимі, після отримання сигналу від давача зовнішньої температури (2а), відбувається відкриття трьохходового клапана (4б) та ввімкнення циркуляційного насоса (4а).

Охолоджувальна потужність повітроохолодника регулюється за допомогою трьохходового клапана шляхом контролю циркуляції теплоносія. Регулювання триває доти, доки температура зворотньої води, виміряна давачем

(4в), не досягне встановленого значення. Після цього трьохходовий клапан відкривається, дозволяючи надходження холодної води в контур [26].

3.2.6 Вентилятор припливного повітря

Контроль функціонування вентилятора здійснюється за допомогою встановленого пресостата (7в), який вимірює диференційний тиск. У разі відсутності сигналу про перепад тисків, що може свідчити про механічні ушкодження вентилятора, відбувається блокування роботи системи. На електродвигуні вентилятора (7а) встановлено датчик температури обмотки (7б). При досягненні обмоткою температури 70⁰С спрацьовує пусковий механізм, що ініціює зупинку системи.

Також існує технічна можливість встановлення датчика температури внутрішнього повітря безпосередньо в приміщенні.

3.3. Завдання систем автоматики та диспетчеризації

Метою системи диспетчеризації є комплексний контроль за інженерним устаткуванням (включно з ліфтами, тепловим пунктом, водо- та електропостачанням). Вона повинна оперативно сигналізувати на диспетчерській пункт про критичні технологічні параметри для запобігання аваріям, а також забезпечувати дистанційне управління цим обладнанням [16].

- Система охоплює управління та моніторинг таких інженерних систем:
- Теплопостачання (опалення та ГВП).
- Водопостачання (господарсько-питне та протипожежне).
- Дренаж.
- Енергозабезпечення (електропостачання та електроосвітлення).
- Системи безпеки (пожежна та охоронна сигналізації, димовидалення).
- Ліфти.

3.3.1. Завдання, які забезпечує система АСУ та диспетчеризації

- Автоматичне управління роботою інженерного обладнання за допомогою локальних контролерів, встановлених у щитах автоматики.
 - Прийом та обробку інформації від автоматики інженерного обладнання.
 - Прийом та обробку інформації від датчиків, встановлених на інженерному обладнанні будівель.
 - Контроль параметрів тепло-, водо- та електропостачання.
 - Прийом аварійних сигналів обладнання.
 - Дистанційне керування контрольованим обладнанням, включно з керуванням за подіями, календарем тощо.
 - Автоматичну архівацію інформації, зокрема, і дій диспетчера.

3.3.2. Використання LONWORKS® у сучасних системах диспетчеризації

Розроблена компанією Echelon (США) технологія автоматизації та диспетчеризації будівель на сьогоднішній день є найбільш розповсюдженою у галузі та визнана стандартом де-факто для подібних систем [24].

Мережа LonWorks характеризується децентралізованою розподіленою архітектурою, в якій кожен вузол функціонально самодостатній: він здійснює управління, обробку інформації, введення/виведення даних та взаємодію з іншими вузлами, що забезпечується його програмним забезпеченням. В основі технології LonWorks лежить протокол LonTalk, який надає можливість створення мереж із практично необмеженим числом вузлів. Протокол спеціально розроблений для вирішення завдань автоматизації, де необхідна підвищена надійність і швидкість обміну невеликими пакетами даних.

Мережа будівлі інтегрує різноманітні пристрої, включаючи давачі (температури, освітленості), виконавчі механізми та контролери. Ключовим моментом є можливість зв'язати це обладнання стандартними мережевими засобами, забезпечуючи універсальне управління: керування системою може здійснюватися будь-яким ПК, незалежно від його платформи.

Мережа LonWorks забезпечує швидкість передачі інформації до 1,35 Мбіт/с із часом реакції вузла 15–25 мс. Стандартний розмір пакету становить 11–15 байт, але можлива передача повідомлень до 228 байт.

Як фізичне середовище використовуються вита пара, коаксіальний кабель, силова проводка та радіоканал, при цьому швидкість зв'язку варіюється залежно від типу каналу. Система має широкий набір програмних шлюзів для інтеграції з різними системами.

Технологія була створена американською компанією Echelon, заснованою у 1988 р. А. Маркулой (співзасновником Apple Computers). Спочатку це був закритий протокол, який швидко став стандартом для промислової автоматизації. У 1999 році ANSI затвердив офіційний стандарт, який описує відкритий комунікаційний протокол LonTalk, реалізований на базі моделі OSI для стандартизованого обміну інформацією між вузлами.

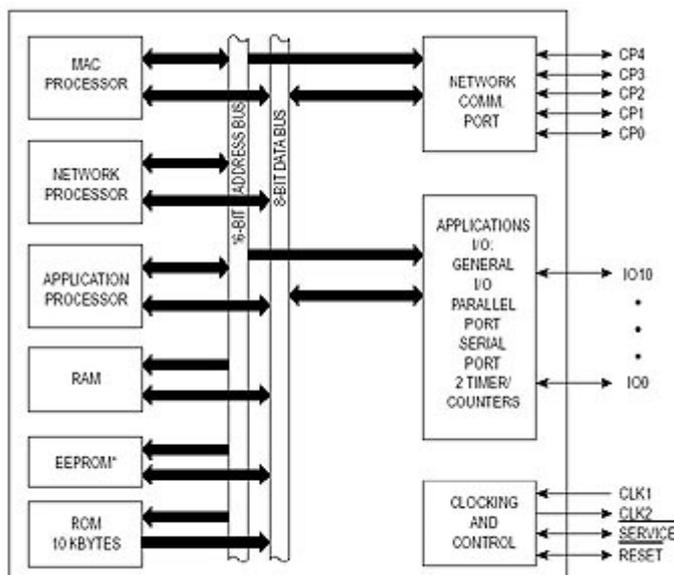
3.3.3. Модель інтеграції відкритих систем

Мережева модель OSI була введена ISO в цілях стандартизації побудови мережевих протоколів взаємодії відкритих систем і складається з 7 рівнів.

1. Фізичний рівень— передача двійкових даних і їх квітування. Підрівень MAC— алгоритм запобігання колізіям (конфліктних ситуацій); обслуговування пріоритетів і виявлення колізій.
2. Канальний рівень— формування пакетів, контроль за допомогою циклічної надлишкової коди (CRC).
3. Мережевий рівень— доставка пакетів усередині одного домена без взаємодії між доменами; опис можливих мережевих топологій на основі використання різних маршрутизаторів.
4. Транспортний рівень— підтримка функцій сервера, обслуговування групових запитів.
5. Сеансовий рівень— підтримка функцій за схемою «запит/відповідь». Рівень додатків і надання даних— мережеві змінні, засоби діагностики і статистики мережевих потоків, управління мережею [28].

3.4 Мікроконтролер Neuron

Neuron Chip (LonWorks) — це вузькоспеціалізований мікроконтролер



*512 bytes for MC143120B1
2 kbytes for MC143120E2

від Echelon/Cypress/Toshiba, який є серцем кожного вузла в мережах промислової та будівельної автоматизації LonWorks.

Makeblock Neuron — це не класичний мікроконтролер, а навчальний STEM-конструктор, що складається з модульних електронних блоків для швидкого прототипування.

Мікроконтролер LonWorks Neuron Chip, ось ключові технічні характеристики та унікальні особливості, які виділяють його з-поміж інших:

1. Архітектура та Обробка

Трипроменевий Процесор: Ядром чіпа є не один, а три 8-бітові процесори (так звана *Multi-Processor Architecture*). Два з них повністю присвячені обробці мережевого стека LonTalk (включно з рівнями 2–6 моделі OSI), а третій процесор виконує прикладну програму користувача та керує взаємодією з периферією/І/О.

Вбудований Стек: Підтримка мережевого стека LonTalk вбудована безпосередньо в кремній та ROM, що забезпечує швидкий і стандартизований зв'язок у мережі.

2. Унікальність та Адресація

48-бітовий Neuron ID: Кожен чіп отримує унікальний 48-бітовий ідентифікатор на етапі виробництва. Це апаратна MAC-адреса, яка є основою для адресації вузлів у мережі. Цей ID можна читати і використовувати для початкового налаштування пристрою.

3. Система Пам'яті (Приклади з Серій)

ROM для Системи: Містить системне прошивання, включаючи стек LonTalk. Наприклад, серія Echelon Neuron 5000 мала близько 16 КБ ROM.

RAM для Виконання: Використовується для буферів, стеку, та оперативних даних. У серії 5000 це могло бути 64 КБ ОЗП.

Енергонезалежна Пам'ять (NVM):

У ранніх серіях (наприклад, 5000), внутрішньої EEPROM не було. Замість неї використовувалася зовнішня NVM, а RAM "імітувала" енергонезалежне зберігання під час роботи.

У пізніших моделях (наприклад, Toshiba TMPN3120/3150) вбудована EEPROM для зберігання конфігурації мережі, Neuron ID та користувацьких даних. Запис у неї гарантується згідно з циклом, зазначеним у даташиті.

4. Комунікаційні Інтерфейси

CP-Порт: Наявність спеціального інтерфейсу (сигнали CP[4:0]) для зв'язку з мережевим трансівером (фізичним шаром). Це може бути як простий обмін бітами, так і спеціальний 16-бітовий кадровий режим (*8 біт статусу + 8 біт даних*).

Гнучкість Мережі: Завдяки розділенню на чип і трансівер, Neuron може працювати з різними фізичними середовищами: вита пара, лінії електроживлення (PLC), RF або оптоволокно.

Сплячий Режим (Sleep): Вивід CP3 часто використовується для переведення чіпа в режим низького енергоспоживання (*suspend*), з можливістю пробудження від зміни рівня на цьому ж виводі.

5. Розробка та Програмування

Мова Neuron C: Додатки для LON-вузлів пишуться на спеціалізованій мові Neuron C, яка оптимізована під архітектуру чіпа.

Оновлення "По Мережі": Однією з ключових особливостей є можливість дистанційного оновлення прошивки (*over-the-network*), що спрощує обслуговування розподілених систем.

6. Застосування

Розподілена Автоматизація: Neuron Chip є стандартом у LonWorks для створення "розумних" вузлів у системах автоматизації будівель (BMS), управління освітленням, сенсорах і промислових контролерах.

Мережеві Змінні: Кожен вузол може бути сконфігурований із мережевими змінними (*network variables*), які слугують стандартизованими точками обміну даними між пристроями.

Призначення: STEM-навчання та швидке прототипування.

Приклади характеристик (Inventor Kit):

Живлення від вбудованої Li-Po батареї 3.7 В.

Бездротовий зв'язок: Bluetooth 4.0.

Включає модулі: блок живлення, світлодіодні панелі, сенсори вологості/температури, звукові сенсори, мотори тощо.

3.4.1 Робота по протоколу Lontalk

Відкритий протокол LonTalk — це ключовий компонент технології LonWorks. Його структура базується на 7-рівневій мережевій моделі OSI, яка забезпечує взаємодію відкритих систем [28].

Протокол LonTalk не залежить від конкретної реалізації фізичного рівня, що дозволяє йому передавати дані через найрізноманітніші канали зв'язку з використанням всіляких методів кодування. Наприклад:

- Для витої пари застосовується метод диференціального кодування.
- Для роботи на сегментах ліній напруги та на радіочастотах використовується FSK-модуляція.

Вузли LonWorks функціонують на фізичному рівні у прямому або спеціальному режимі.

- Прямий режим: Дані передаються закодованими (наприклад, диференціальним манчестерським кодуванням). У цьому випадку мікроконтролер Neuron бере на себе повний контроль над швидкістю передачі, довжиною заголовків пакетів та процесом кодування.
- Спеціальний режим: Дані передаються послідовно і без кодування. Контроль над швидкістю та кодуванням у цьому режимі здійснює приймач, який використовується для сполучення з іншими фізичними протоколами.

Кожен пакет даних, незалежно від режиму передачі, обов'язково супроводжується 16-бітовим CRC-кодом. Ця особливість уможливорює ігнорування специфіки фізичної реалізації середовища при передачі бітів.

На підрівні MAC (Media Access Control) для запобігання конфліктним ситуаціям (колізіям) використовується предиктивний метод. Він ґрунтується на впорядкуванні доступу до каналу з урахуванням передбачуваного навантаження на нього.

Механізм Доступу до Каналу

Передавальний вузол отримує доступ до каналу із випадковою затримкою, діапазон якої (від 0 до w) є функцією від числа незавершених завдань, що стоять у черзі на виконання.

Правила Дозволу Колізій

У разі виникнення колізії, її дозвіл здійснюється відповідно до таких правил:

1. Зняття пріоритету: Якщо колізія виникла після двох послідовних спроб передачі пакета, який мав пріоритет, то наступне відсилання цього пакета відбуватиметься вже без пріоритету.
2. Інкрементування завдань: При виявленні колізії передавальний вузол повинен збільшити (інкрементувати) число своїх незавершених завдань.
3. Зняття завдання: Якщо колізія продовжує виникати після 255 послідовних спроб передачі пакета, завдання знімається з черги.

Канальний рівень використовує просте кодування кадрів і нескладний механізм виявлення помилок, але не відновлює їх за рахунок повторної передачі. Пропускна спроможність каналу залежить від низки чинників, включаючи швидкість передачі, час доступу до середовища та розмір пакетів.

Основне завдання Транспортного рівня полягає у надійній доставці пакетів до індивідуального або групового адресата. У протоколі LonTalk цей рівень підтримує зв'язок із сеансовим рівнем через наступні функціональні

запити: відправлення та приймання телеграм, а також підтвердження успішного завершення передачі.

Основна роль Сеансового рівня полягає у забезпеченні простого діалогового механізму («запит/відповідь») для доступу до віддалених даних. Цей рівень працює за принципом, де кожен запит вимагає підтвердження (відповіді). Такий функціонал ідеально підходить для реалізації прикладних завдань клієнт-серверної архітектури.

Критично важливим є те, що на обох рівнях, Транспортному і Сеансовому, діє механізм контролю авторизації: неавторизований запит (той, що не має права доступу до даних вузла) буде відхилено.

Найвищий рівень (додатків і надання даних) є основою сумісності вузлів у протоколі LonTalk. На цьому рівні вирішується ключове завдання — передача телеграм, що не належать до LonTalk, що необхідно для створення шлюзів між доменами та інтеграції з іншими протоколами.

Для ефективної роботи мережі застосовуються:

- CSMA/CD (модифікований): Метод довільного доступу з контролем носія.
- Подієвий обмін: Використовується для зниження загального навантаження на мережу.
- Сегментація: Скорочення внутрішньомережевого трафіку досягається сегментацією мережі за допомогою маршрутизаторів різних виробників.

3.5. Об'єднання інженерних систем будівлі за допомогою технології LonWorks

Системний інтегратор вирішує завдання побудови системи управління будівлею у кілька етапів: проектування системи, конфігурація мережі, конфігурація додатків та інсталяція обладнання. На кожному з цих етапів значна частина завдань виконується за допомогою пакету програм LonMaker для Windows. На малюнку показано користувацький інтерфейс LonMaker; у робочій області наведено приклад підсистеми управління кімнатним освітленням.

Дякую за текст. Це чудовий, детальний опис технології LonWorks у контексті інженерних систем будівель (BMS).

Щоб зробити цей текст оригінальним, більш динамічним та професійно відшліфованим, я переформатую його, зміщуючи акцент на стратегічні переваги та сучасну термінологію.

Інтегроване Керування Будівлею (BMS): Сила LonWorks

LonWorks є перевіреним хребтом для створення розумних, інтегрованих та високоавтоматизованих систем керування будівлями (BMS). Ця технологія особливо актуальна для комерційної нерухомості та високотехнологічного житла, де критично важливі енергоефективність, оперативний комфорт та безпека.

1. Концептуальна Основа: Розподілений Інтелект

LonWorks реалізує парадигму розподіленого керування на базі спеціалізованих мікроконтролерів Neuron Chip та протоколу LonTalk.

Автономні Вузли (Nodes): Кожен пристрій (контролер, сенсор, актуатор) функціонує як незалежний мережевий вузол, здатний приймати рішення. Це

Мережа працює без єдиної центральної точки відмови. Хоча можливе використання диспетчерського пункту (Supervisor) для моніторингу та аналітики, оперативне керування здійснюється локально.

Протокол LonTalk забезпечує надійний обмін даними між різноманітним обладнанням.

LonWorks ефективно об'єднує різноманітні підсистеми будівлі під єдиним мережевим управлінням:

Таблиця 3.1: Ключові інтегровані інженерні системи

Система	Основні Функції Інтеграції
HVAC (Опалення, Вентиляція, Кондиціонування)	Зональний клімат-контроль, керування повітряними заслінками та теплообмінниками, моніторинг температури, вологості та рівня CO ₂ для оптимізації якості повітря.
Освітлення	Світлорегулювання (DALI, 0-10V), керування на основі сенсорів присутності та рівня природного освітлення, автоматичне планування сценаріїв.
Безпека та Доступ	Інтеграція сигналізації, СКУД (Систем контролю доступу), передача критичних подій (тривоги) у реальному часі до єдиної системи диспетчеризації.
Енергоменеджмент	Деталізований моніторинг споживання ресурсів (електрика, вода, газ), автоматичне управління піковим навантаженням (Load Shedding) для зниження витрат.
Периферійні Системи	Управління жалюзі, шлагбаумами, системою поливу та іншими зовнішніми або допоміжними елементами.

3. Архітектура та Обмін Даними

Оснoву взаємодії вузлів становлять Мережеві Змінні (Network Variables, NV).

NVs: Це стандартизовані точки даних, які описують вхідні (SNVT) та вихідні (UNVT) параметри вузла. Вони дозволяють пристроям різних виробників "розуміти" один одного (наприклад, "поточна температура", "стан насоса").

Групoва Адресація: Забезпечує високу ефективність зв'язку, дозволяючи контролеру одночасно надсилати команди (наприклад, "Вимкнути") цілій групі однотипних пристроїв (наприклад, всім світильникам на поверсі).

Приклад Взаємодії:

[Сенсор CO₂] публікує NV `nviCO2Level`. [Контролер Вентиляції] приймає цей NV і, якщо значення перевищує норму, надсилає команду [Актуатору Заслінки] (через NV `nvoValveControl`) збільшити подачу свіжого повітря.

4. Стратегічні Переваги Вибору LonWorks

Використання LonWorks для інтеграції інженерних систем забезпечує низку критичних переваг для власників та операторів будівель:

Стійкість та Надійність (Fault Tolerance): Завдяки розподіленій логіці, вихід з ладу одного контролера не паралізує всю мережу, забезпечуючи високу безперебійність роботи.

Гнучкість та Масштабованість: Можливість легкого додавання нових вузлів, систем або функціоналу без необхідності повної реконфігурації або зупинки існуючої мережі. Це робить систему захищеною від застарівання.

Максимізація Енергоефективності: Точна координація HVAC та освітлення на основі реальних даних із сенсорів (наприклад, затемнення освітлення при достатній кількості сонячного світла) забезпечує значне зниження експлуатаційних витрат.

Сумісність (Multi-Vendor Interoperability): Відкритий стандарт LonWorks підтримується великою кількістю світових виробників, що дає свободу вибору обладнання та уникнення залежності від одного постачальника.

Прогностичне Обслуговування: Збір централізованих даних дозволяє здійснювати аналітику, діагностувати потенційні проблеми на ранній стадії та переходити до планово-профілактичного обслуговування (PPTO) замість аварійного ремонту [32].

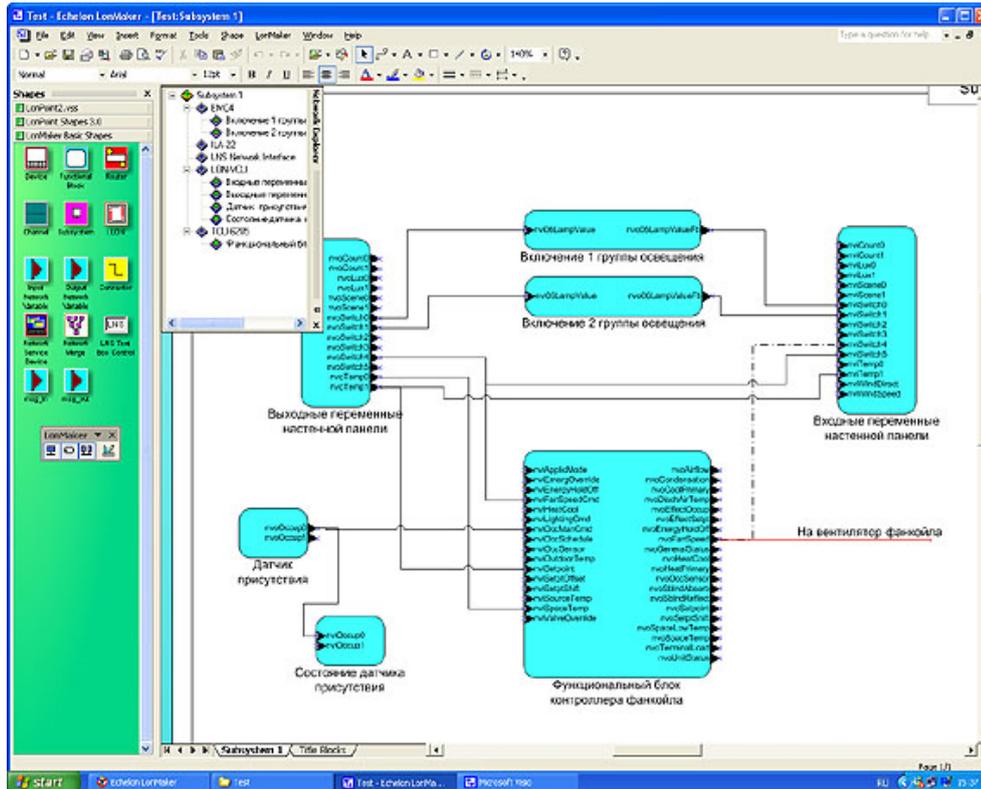


Рис.3.1 - LonWorks формує єдині інструкції для розробників та сертифікує обладнання.

3.6 Автоматизація роботи припливно-витяжної вентиляційної установки

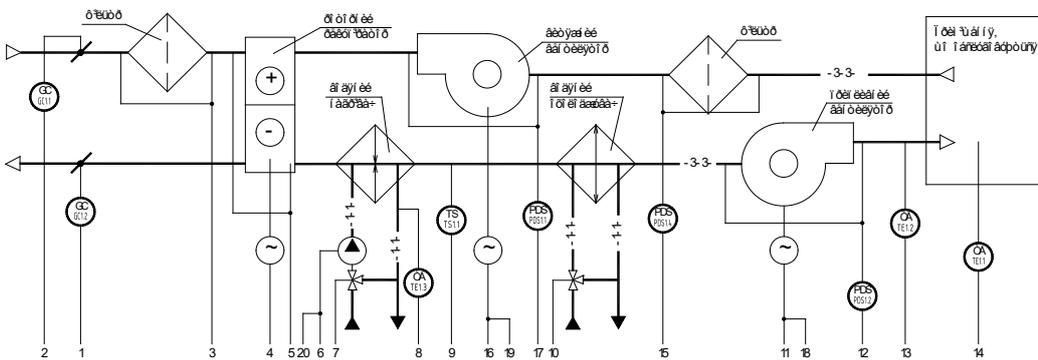


Рис.3.2 - Структурна схема автоматизації вентиляційної системи.

Моніторинг системних параметрів, таких як температура, тиск та контроль замерзання води у водяному нагрівачі, здійснюється за допомогою давачів фірми Carel. Вони інтегровані з контролером управління Pco3medium, який через мережеву систему LON забезпечує зв'язок із пультом управління, розташованим у кімнаті диспетчеризації.

3.6.1 Датчики

Ось оригінальний та більш структурований опис терміна "датчик зворотного теплоносія NTC" з фокусом на його технічному призначенні та характеристиках:

Термістор NTC: Сенсор Зворотного Теплоносія

Термін "датчик зворотного теплоносія NTC" (Negative Temperature Coefficient) описує високоточний тепловий сенсор, ключовою особливістю якого є зворотна залежність опору від температури. Він спеціально розроблений для моніторингу температури рідини, що повертається до теплогенератора (котла, теплового насоса) з контуру опалення або охолодження.

1. Принцип Дії та Застосування

- Технологія NTC: В основі лежить термістор — напівпровідниковий резистор, опір якого знижується (звідси *Negative*) зі зростанням температури.
- Функція: Вимірювання температури теплоносія, що вже пройшов контур споживання і повертається у систему. Ці дані критично важливі для:
 - Енергоефективності: Контролю різниці температур між подачею та "обраткою" для оптимізації роботи котла/насоса.
 - Захисту Обладнання: Запобігання перегріву або критично низьких температур теплообмінників.
 - Модуляції Потужності: Точне налаштування рівня нагріву (модуляції пальника) для підтримки заданого температурного графіка.

Таблиця 3.2: Типові специфікації та варіанти

Тип Сенсора	Опис та Особливості
NT-10K-B (Типовий NTC)	Означає, що при стандартній температурі 25°C його номінальний опір становить 10 кОм. Літера "B" або "Beta" вказує на конкретну криву "опір-температура" (B-константу), що визначає чутливість.
Водонепроникний NTC	Сенсор, поміщений у герметичний зонд (зазвичай металевий циліндр), під'єднаний дротом. Це необхідно для надійного монтажу в трубах, зовнішніх колекторах або інших середовищах із прямою дією рідини чи високої вологості.
NTC для HVAC- систем	Широко застосовується у всіх сучасних системах опалення, вентиляції та кондиціонування, оскільки пропонує високу точність, швидку реакцію та економічність.

Висока Чутливість: NTC-термістори мають значно більшу чутливість до зміни температури (більшу зміну опору на градус), ніж, наприклад, RTD-сенсори (Pt100/Pt1000). Це дозволяє контролеру швидше й точніше реагувати на найменші температурні коливання в контурі [32].

Таким чином, "датчик зворотного теплоносія NTC" є не просто сенсором, а критичним елементом керування в інтелектуальних теплових системах, що забезпечує точність, ефективність та безпеку.



Рис. 3 .3 – Різні типи датчиків

3.7 Контролер pCO3

3.7.1 Загальні технічні характеристики

Carel pCO3 – це високопродуктивна серія програмованих логічних контролерів (PLC-подібних), що є галузевим стандартом для складних систем кондиціонування, охолодження та вентиляції



(HVAC&R). Завдяки 32-бітному процесору та широким можливостям розширення, pCO3 є ідеальним рішенням для масштабованих та енергоефективних проєктів [30].

1. Загальна Концепція та Масштабованість

Призначення: Контроль та оптимізація технологічних процесів у системах охолодження, кондиціонування повітря та прецизійного клімат-контролю.

Модельний Ряд: Серія пропонує чотири типорозміри (Small, Medium, Large, Extra Large), дозволяючи точно підібрати контролер під вимоги проєкту щодо кількості входів/виходів та необхідної обчислювальної потужності.

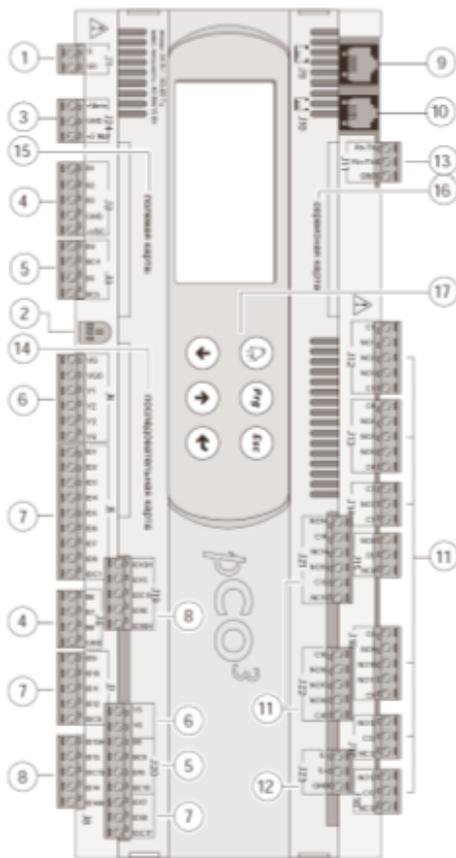
Зворотна Сумісність: Гарантована апаратна та програмна сумісність з попередньою серією pCO2, що спрощує модернізацію існуючих установок.

2. Обчислювальна Потужність та Пам'ять

Таблиця 3.3: Технічні характеристики

Характеристика	Параметр	Значення
Мікропроцесор	Архітектура	32-бітний чип – для швидкої обробки складних алгоритмів регулювання та комунікації.
Пам'ять Програми	Тип	Flash-пам'ять для надійного зберігання операційного програмного забезпечення.
Пам'ять Параметрів	Тип	EEPROM для збереження конфігураційних налаштувань та поточних параметрів, що забезпечує енергонезалежність даних.
Завантаження ПЗ	Швидкість	Підтримка високої швидкості завантаження програми (до 115.2 кбіт/с) через спеціальний "ключ програмування" або ПК.

3.7.2 Елементи пристроя



1. роз'єм джерела живлення [G (+), G0 (-)]
2. жовтий світлодіодний індикатор живлення і 3 світлодіодних індикатора для мереж plan
3. додаткове джерело живлення (макс. 200 мА) для терміналу і відносних датчиків від 0 до 5 В
4. аналогові входи: універсальний NTC: 0 – 1 В; відносний: 0 – 5 В, 0 – 10 В, 0 – 20 мА, 4 – 20 мА
5. аналогові входи: пасивний NTC, Pt1000, On/off
6. аналогові виходи 0 – 10 В
7. цифрові входи 24 В змінного/постійного струму
8. цифрові входи 230 В змінного струму або 24 В змінного/постійного струму
9. роз'єм для дисплея терміналу (зовнішня панель з безпосередніми сигналами)
10. роз'єм для всіх стандартних терміналів серії pco і для завантаження прикладного ПО
11. цифрові виходи реле
12. роз'єм для плати розширення введення/виводу
13. роз'єм мережі plan
14. кришка для вставки додаткової супервізорної послідовної плати
15. кришка для вставки додаткової польової плати
16. кришка для вставки додаткової сервісної плати
17. вбудований термінал (рідкокристалічний індикатор, кнопки і світлодіодні індикатори).

3.7.3 Технічна специфікація

1. Інтерфейси та Комунікація

rCO3 відрізняється розвинуеною мережевою інфраструктурою, необхідною для інтеграції у великі системи автоматизації будівель (BMS).

Три Серійні Порти:

Стандартний Послідовний Порт: Для локального налаштування та діагностики.

rLAN-Порт: Внутрішня мережа CAREL для швидкої комунікації та координації між кількома контролерами rCO3.

Опціональні Порти Field-Bus/BMS: До двох додаткових слотів для інтеграції у глобальні мережі автоматизації (наприклад, Modbus, BACnet, LonWorks) за допомогою змінних розширювальних карт.

2. Гнучкість Входів/Виходів (I/O)

Обсяг I/O залежить від типорозміру, забезпечуючи високу адаптивність.

Аналогові Входи: Від 5 (у версії Small) до 8–10+ у більших моделях.

Підтримка ключових сенсорів:

NTC-Термістори (зокрема, NTC 10 кОм) для точного вимірювання температури.

Універсальні входи для сигналів 0–1 В, 0–5 В, логотричних датчиків та інтеграції з ратиометричними датчиками тиску.

Цифрові Виходи: Включають надійні релейні виходи та швидкісні SSR (твердотільні реле) для управління компресорами, вентиляторами та іншими виконавчими механізмами.

Розширення: Можливість додавання опціональних I/O-карт для збільшення кількості точок контролю.

3. Умови Експлуатації та Монтаж

Температурний Діапазон: Широкий робочий діапазон, наприклад, для моделі Small: від -25 °C до +70 °C, що робить його придатним для роботи у важких умовах.

Захист (IP-Рейтинг):

IP65: При використанні з мембранною клавіатурою (захист від пилю та струменів води).

IP40: Стандартний захист плати.

Живлення: Стандартна напруга 24 В (AC або DC).

Споживання: ≤ 15 Вт (DC) або до ~ 40 ВА (AC).

Монтаж: Усі типорозміри монтуються на стандартну DIN-рейку (DIN 43880). Габарити варіюються від 13 (Small) до 18 (XL) модулів.

Таблиця 3.4: Характеристики технічні

Переваги (Strengths)	Обмеження (Considerations)
Універсальність: Широкий вибір типорозмірів для оптимального підбору.	Енергоспоживання (AC): Відносно високе споживання (40 ВА) для AC-моделей.
Потужність: 32-бітний процесор підтримує складні регуляторні цикли.	Вартість Інтеграції: Для повного підключення до BMS (наприклад, VASnet) часто потрібні опціональні карти.
Інтеграція BMS: Три вбудовані порти + можливість розширення Field-Bus.	Спеціалізоване ПЗ: Потреба у фірмовому ПЗ CAREL (1Tool) для програмування вимагає досвіду.
Надійність Сенсорів: Відмінна підтримка NTC-датчиків та інших аналогових сигналів.	

3.8 Розподіл керування і моніторингу на пункти контролю

Фінальний етап впровадження системи автоматизації включає монтаж, програмування, а також підключення до мережі з наступним виведенням контролю на екрани. Це завдання традиційно виконується із застосуванням SCADA-систем [32].

Диспетчерський контроль через монітор дозволяє:

Візуалізувати обладнання.

Моніторити ключові системні параметри та показники датчиків (температуру, тиск).

Оцінювати стан повітряних фільтрів за даними датчиків перепаду тиску.

Дистанційно керувати та задавати параметри для всієї системи.

Система має такий вигляд:

3.9. Тестування систем автоматизації під час випробувань технологічного обладнання

Щоб безпечно ввімкнути систему автоматизації, необхідно виконати такі кроки:

Заземлення (Замикання корпусу): Забезпечити заземлення корпусів усіх приладів та інших засобів автоматизації.

Живлення: Підключити розподільні пристрої системи автоматизації до живлення за постійною схемою.

Контроль Середовища: Перевірити параметри довкілля (температура, вологість, склад) у місцях встановлення приладів, щитів і пультів на відповідність допустимим умовам для даного типу обладнання.

Встановлення Захисту: Встановити запобіжники, здійснити встановлення автоматичних вимикачів та налаштування іншої запобіжної апаратури у суворій відповідності з проектом автоматизації.

Включення систем автоматизації починається з подачі живлення на всі первинні та вторинні прилади.

Етап Підготовки та Вимірювання

1. Включення приладів: Перетворювачі та первинні прилади вмикаються на вимірювання відповідно до інструкцій з монтажу та експлуатації.
2. Налаштування нуля: За потреби, за допомогою регулюючих органів встановлюється нульове значення вимірюваних величин.
3. Перевірка середовищ: Перед початком безпосереднього вимірювання необхідно переконатися, що характеристики реальних вимірюваних середовищ (агрегатний стан, температура, тиск, вологість) близькі до проектних (заданих).

Перевірка Роботи та Взаємодія

1. Випробування в режимах: Після підготовки перевіряється робота систем автоматизації в різних режимах.
2. Спільне перемикання: Перемикання технологічних режимів (наприклад, "зима"/"літо" або "макс./мін. навантаження") проводиться спільно з технологами або операторами технологічного обладнання.

Усунення Несправностей

Якщо в період пуску або випробування система виходить з ладу, необхідно усунути несправності. Перед повторним включенням елементи системи мають бути знову перевірені.

3.10. Аналіз характеристик синхронних двигунів для частотного регулювання

Одним із ефективних методів компенсації є застосування синхронної машини, яка шляхом регулювання струму збудження здатна генерувати реактивну потужність у електричну мережу. При цьому синхронний двигун працює з випереджальним коефіцієнтом потужності ($\cos \varphi$).

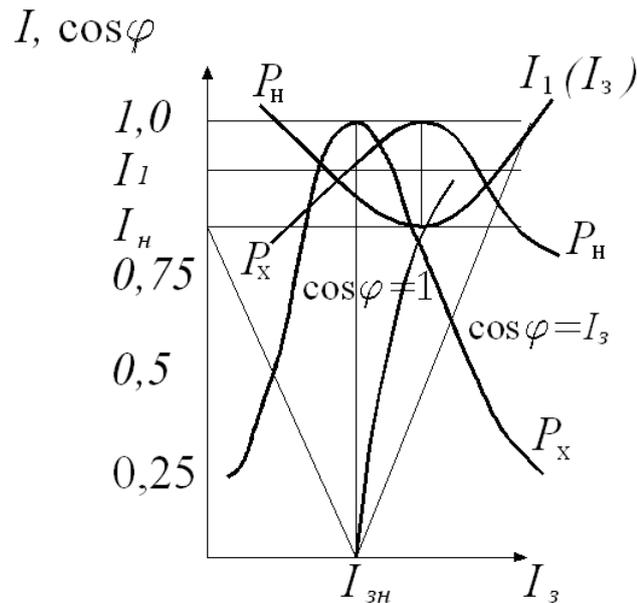


Рис.3.4. – V-подібні характеристики синхронного двигуна

Ось варіант перефразування вашого тексту в технічному стилі:

Можливість використання синхронного двигуна як джерела (компенсатора) реактивної потужності демонструють V-подібні характеристики (рис. 3.4), які відображають залежності струму статора (I_1) та коефіцієнта потужності $\cos \varphi$ від струму збудження (I_3) при постійних значеннях фазної напруги U , частоти (f) та активної потужності (P). Залежності ($I_1(I_3)$) мають мінімум, який відповідає максимуму коефіцієнта потужності $\cos \varphi = 1$, що пояснюється за допомогою векторної діаграми синхронного двигуна (рис. 3.4) [16].

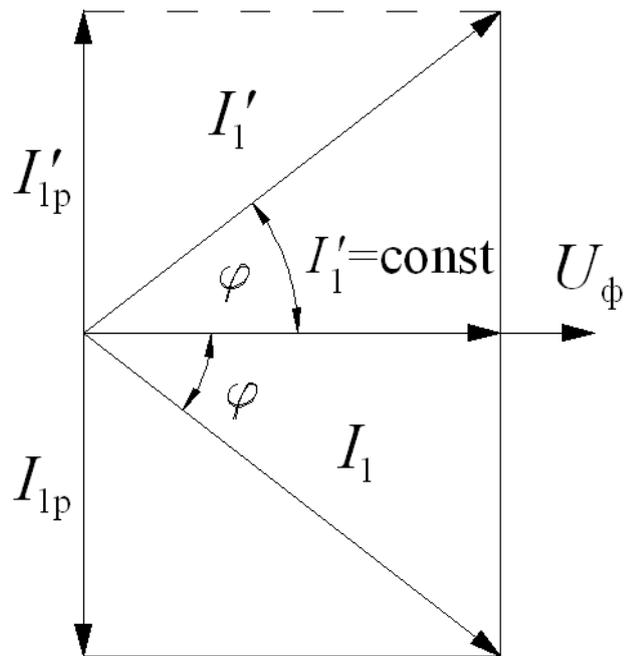


Рис.3.5 – Векторна діаграма синхронного двигуна

При невеликих струмах збудження струм статора I_1 , відстає від напруги U_ϕ на кут ϕ , що відповідає роботі СД із відстаючим $\cos\phi$ і споживанню ним реактивної потужності з мережі живлення. Активна складова повного струму $I_{1a} = I_1 \cos\phi$ збігається за напрямком з вектором напруги мережі U_ϕ , а реактивна складова I_{1p} відстає від нього на 90° , що і визначає споживання реактивної потужності.

Припустимо, що синхронний двигун працює під постійним навантаженням і споживає активну потужність із мережі:

$$P_1 = 3 \cdot U_\phi \cdot I_1 \cdot \cos\phi = 3 \cdot U_\phi \cdot I_{1a}$$

Ось варіант перефразування вашого технічного тексту:

З виразу видно, що при $P_1 = \text{const}$ і струм $I_{1a} = \text{const}$ при збільшенні струму збудження синхронного двигуна кінець вектора повного струму (I_1) переміщується вгору по штриховій вертикальній лінії (рис. 3.5, що відповідає зменшенню реактивної складової струму. При струмі збудження, близькому

до номінального, реактивна складова (I_{lr}) стає рівною нулю, тобто струм статора дорівнює лише його активній складовій I_a

Цьому режиму відповідає точка мінімуму кривих ($I(I_z)$) та максимально можливе значення коефіцієнта потужності ($\cos\phi = 1$). При подальшому збільшенні струму збудження (перезбудження синхронного двигуна) знову з'являється реактивна складова струму (I'_{lr}), але вже випереджуюча напругу мережі на 90° . Струм статора (I') також випереджає напругу мережі, і двигун працює з випереджуючим $\cos\phi$, віддаючи реактивну потужність у мережу [28].

На рис. 3.5 наведено залежності для двох рівнів навантаження — номінального (P_n) та при неробочому ході (P_x). Зона характеристик праворуч від штрих-пунктирної лінії ($\cos\phi = 1$) відповідає роботі двигуна з випереджуючим $\cos\phi$, а ліворуч — з відстаючим. З рис. 3.5 видно, що з ростом навантаження зона генерації реактивної потужності з випереджуючим $\cos\phi$ зміщується до більших струмів збудження. Таким чином, якщо синхронний двигун працює з змінним навантаженням на валу, для повного використання його компенсаційних властивостей необхідно відповідним чином регулювати струм збудження, що веде до збільшення габаритної потужності двигуна.

Співвідношення повної (сумарної) та активної потужності

$$\frac{S}{P} = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{P} = \sqrt{1 + \left(\frac{Q}{P}\right)^2}.$$

Показник споживання реактивної потужності СД

$$Q = 3 \cdot U_\phi \cdot I_1 \cdot \sin\phi$$

Для полюсного двигуна:

$$Q = 3 \cdot U_\phi \left[\frac{E \cos\phi}{X_d} - U_\phi \left(\frac{\cos^2\theta}{X_d} + \frac{\sin^2\theta}{X_q} \right) \right],$$

де X_d і X_q — індуктивні опори СД.

Для неполюсного двигуна $X_d = X_q = X_l$;

$$Q = \frac{3 \cdot U_\phi}{X_l} \cdot (E \cdot \cos \theta - U_\phi),$$

Визначимо величину реактивної потужності, що генерується синхронним двигуном, у квар (var):

$$Q = \frac{3 \cdot 220}{30} \cdot (230 \cdot 0,985 - 220) = 204$$

3.10.1. Регулювання реактивної потужності

Збільшення струму збудження (I_z) синхронного двигуна призводить до зростання генерованої електрорушійної сили (E), що, своєю чергою, збільшує генерацію реактивної потужності (Q) в мережу. Величина цієї потужності прямо залежить від поточного навантаження двигуна, яке визначається кутом навантаження (θ) [32].

Згідно з V-подібними характеристиками, СД здатний працювати як споживач (при недозбудженні, I_z низький) або як генератор реактивної потужності (при перезбудженні, I_z високий).

Завдяки впровадженню автоматичного регулятора струму збудження (АРСЗ), синхронний двигун може бути інтегрований у систему як динамічний засіб повної компенсації реактивної потужності навантаження. Графічне підтвердження залежності $Q = f(I_z, \theta)$ представлено у вашому проекті (див. графічну частину, лист 6).

3.9.2. Обмеження застосування синхронних двигунів

Незважаючи на високу ефективність у компенсації Q , використання синхронних двигунів має суттєві економічні та технічні бар'єри [15]:

Таблиця 3.5 - Обмеження застосування синхронних двигунів

Категорія Обмежень	Фактори	Деталізація
Економіка та Розмір	Висока Вартість і Обмеження Потужності	Виробництво СД економічно виправдане лише для великих потужностей (понад 315 кВт). Їхня складна конструкція зумовлює високу початкову вартість (орієнтовно від 12 тис. у.о.).
Складність Експлуатації	Проблема Пуску	СД вимагають спеціального пускового обладнання та складних алгоритмів для синхронізації з мережею, на відміну від простих асинхронних машин.
Керування Продуктивністю	Негнучкість Швидкості	Синхронна частота обертання жорстко прив'язана до частоти мережі. Складність регулювання швидкості обертання СД обмежує можливість ефективного керування продуктивністю пристроїв, таких як компресори, без використання дорогих частотних перетворювачів.

3.11. Застосування перетворювачів частоти

У якості прикладу сучасного керування двигунами розглядаються перетворювачі частоти компанії "Siemens" (серії SINAMICS). Ці ПЧ є одними з найбільш розповсюджених на ринку завдяки своїй надійності та широкій функціональності. На відміну від традиційних схем, рішення SINAMICS дозволяють повністю виключити ударні навантаження та пікові пускові струми, характерні для прямих пусків. Крім того, перетворювачі Siemens легко інтегруються в автоматизовані системи керування, забезпечуючи високу точність регулювання технологічних параметрів (як-от тиск у повітропроводі) і продовжуючи ресурс механічного обладнання за рахунок усунення механічних ривків при старті.

Використання перетворювачів частоти кардинально змінює добовий графік споживання енергії компресором, роблячи його набагато ефективнішим, ніж при циклічній роботі.

1. Усунення Пікових Струмів: ПЧ забезпечує плавний пуск, повністю усуваючи високі пускові струми $(5-7) \cdot I_n$, характерні для схеми "зірка-трикутник", що покращує якість електроенергії в мережі.
2. Ліквідація Холостого Ходу: Найважливіше — ПЧ дозволяє відмовитися від переходу на холостий хід при досягненні 40 бар. Замість цього ПЧ знижує швидкість обертання двигуна, забезпечуючи лише ту продуктивність, яка необхідна для підтримання тиску.
3. Економія за Кубічним Законом: Це призводить до значної економії, оскільки потужність компресора, керованого ПЧ, може бути пропорційна кубу швидкості ($P \sim n^3$). Графік споживання стає більш рівномірним та низьким у періоди зниженого попиту, на відміну від "зубчастого" профілю при постійних циклах ввімкнення/вимкнення/холостого ходу.

Пропонована система керування вирізняється можливістю гнучкого перенастроювання, що дозволяє точно адаптувати її до вимог автоматизації. Ця гнучкість надає споживачеві значну свободу вибору: він може вирішити, чи працюватиме система в розімкнутому чи замкнутому циклі. Ключовим є вибір між регулюванням швидкості обертання двигуна або безпосереднім регулюванням заданого технологічного параметра (наприклад, підтримка постійного тиску). Забезпечується також повна свобода вибору оптимальної структури та параметрів регулятора і, що важливо, можливість програмного керування приводом відповідно до складних циклів (годинних, добових), використовуючи різноманітні зручні джерела керуючого впливу [34].

Застосування цих функцій забезпечує високу якість руху та електричного керування. Задавальний пристрій інтенсивності, формуючи S-подібні криві, робить перехідні процеси (пуск і зупинку) максимально м'якими, що є запорукою продовження ресурсу електричного та механічного устаткування. Водночас, блок захисту від резонансів діє як критичний фільтр безпеки, автоматично проходячи небезпечні частоти обертання без тривалої роботи на

них. Універсальний інтерполятор $U(f)$ оптимізує електричні характеристики, подаючи на двигун саме ту напругу, яка потрібна для поточних обертів, що максимізує крутний момент і запобігає зайвим втратам та перенапругам.

Цифровий контролер — це центральний процесор ПЧ, який виконує не лише базові розрахунки алгоритму керування двигуном, але й функції автоматизації технологічного процесу. Він необхідний для плавного пуску та гальмування двигуна, а також для реалізації складних режимів роботи. Контролер є ключовою ланкою для збирання інформації (наприклад, даних про струм, частоту та помилки) та її обміну з системами верхнього рівня (промисловими контролерами чи комп'ютерами). Це дозволяє вбудовувати привід у загальну мережу керування підприємством.

3.11.1. Функціонування перетворювача частоти

Основні вузли ПЧ включають:

Некерований Випрямляч: Перетворює вхідну змінну напругу в постійну.

Джерело Напруги (Ємність): Стабілізує постійну напругу та зменшує пульсації.

Інвертор: Використовує силові IGBT-транзистори та Широтно-імпульсну модуляцію (ШІМ) для генерації змінної напруги регульованої частоти, що живить асинхронний двигун.

Клампер (Коло "Зливу"): Аварійно-захисна ланка з потужним резистором, що розсіює енергію рекуперації під час гальмування, захищаючи ємність від перезаряду.

Програмований Мікроконтролер: Обчислювальне ядро, що керує логікою ШІМ та функціями захисту.

Фільтр: Забезпечує необхідну якість напруги на виході.

Принцип роботи ПЧ ґрунтується на перетворенні: змінна напруга спочатку випрямляється діодним мостом, а потім фільтрується батареєю конденсаторів для створення стабільної постійної напруги з мінімальними пульсаціями. Далі ця напруга надходить на інверторну мостову схему (6-ть керованих IGBT-

транзисторів). Інвертор здійснює зворотне перетворення у змінний струм, використовуючи метод ШІМ для регулювання частоти. Захист IGBT-транзисторів від пробойів напругою зворотної полярності забезпечується шляхом підключення діодів паралельно до них, що є стандартним технічним рішенням для індуктивного навантаження, яким є асинхронний двигун.

Алгоритм керування інвертора безперервно контролює перехресні пари транзисторів. Шляхом їхнього високошвидкісного перемикання (ШІМ) формується направлення та ШІМ-напруга, що подається на двигун. Це дозволяє генерувати необхідну величину та форму струму в обмотках. Таким чином, контролер використовує цей метод для формування обертового магнітного поля з потрібною частотою (швидкістю) та величиною (крутним моментом), що забезпечує точне керування приводом.

Перетворювачі частоти застосовуються для плавного регулювання швидкості асинхронних двигунів. Вони досягають цього, створюючи на виході трифазну напругу змінної частоти. Керування цими параметрами (напругою та частотою) здійснюється за одним із двох фундаментальних принципів:

Скалярний (U/f): Підтримує постійне співвідношення напруги до частоти, ідеально підходить для простих навантажень (насоси, вентилятори).

Векторний: Дозволяє окремо керувати потоком і моментом, забезпечуючи високу точність та великий крутний момент навіть на низьких швидкостях.

Ось оригінальне, точне та структуроване продовження вашого тексту про обертове магнітне поле:

Ваше твердження абсолютно правильне: частота обертання магнітного поля електричного двигуна є прямою функцією від частоти напруги живлення.

При живленні обмотки статора (зазвичай, трифазною) напругою з певною частотою f створюється обертове магнітне поле [34].

Таблиця 3.6: Деталізація параметрів

Параметр	Одиниця Виміру	Опис
n_1	об/хв (RPM)	Синхронна частота обертання магнітного поля статора.
f	Гц (Hz)	Частота напруги живлення мережі (в Україні та Європі стандартно 50 Гц).
p	-	Кількість пар полюсів обмотки статора. Це конструктивний параметр двигуна, який завжди є цілим числом ($p = 1, 2, 3, \dots$).
60	-	Коефіцієнт для переведення секунд у хвилини.

Висновки

Пряма Залежність від f : Якщо частота мережі (f) фіксована (наприклад, 50 Гц), синхронна частота n_1 є постійною величиною. Це основа роботи синхронних двигунів.

Залежність від p : Швидкість n_1 може змінюватися лише шляхом зміни конструкції двигуна (зміною кількості пар полюсів p). Наприклад, для мережі 50 Гц:

При $p=1$ (2 полюси) implies $n_1 = 3000$ об/хв.

При $p=2$ (4 полюси) implies $n_1 = 1500$ об/хв.

Регулювання Швидкості: Єдиний сучасний спосіб плавного регулювання швидкості обертання електричного двигуна (асинхронного чи синхронного) — це використання частотного перетворювача (інвертора), який змінює частоту живлення f .

$$n_1 = \frac{60 \cdot f_1}{p}$$

де f_1 — частота напруги живлячої мережі;

p — число пар полюсів.

Частота обертання ротора асинхронних двигунів визначається частотою напруги живлення. Ця залежність є основою методу частотного регулювання.

Головний принцип: змінюючи частоту (за допомогою перетворювача частоти) на обмотках двигуна, ми безпосередньо регулюємо частоту обертання магнітного поля статора, і, відповідно, змінюємо швидкість ротора.

При скалярному керуванні (або U/f-керуванні) амплітуда і частота напруги, прикладеної до двигуна, змінюються за визначеним законом (зазвичай, пропорційно). Зміна лише частоти живлячої напруги призводить до відхилення від розрахункових значень критичних параметрів: максимального і пускового моментів, ККД та коефіцієнта потужності. Щоб уникнути цього погіршення та підтримати необхідні робочі характеристики двигуна, необхідно одночасно зі зміною частоти відповідно змінювати й амплітуду напруги.

Однією з ключових задач скалярного керування в існуючих ПЧ є підтримка постійного відношення між максимальним моментом двигуна та моментом опору на валу. Реалізація цього закону необхідна для збереження розрахункових робочих характеристик двигуна (зокрема, його перевантажувальної здатності) при зміні частоти обертання.

$$\frac{M_{\max}}{M_o} = \text{const},$$

Суть полягає в тому, що амплітуда напруги регулюється одночасно зі зміною частоти. Це регулювання виконується таким чином, щоб відношення максимального моменту двигуна до сучасного моменту навантаження (моменту опору на валу) залишалось незмінним. Таке узгоджене керування дозволяє двигуну підтримувати необхідну перевантажувальну здатність та ефективно працювати у всьому діапазоні регулювання швидкості.

3.11.2. Метод зниження споживання реактивної потужності з використанням частотних перетворювачів

Принцип компенсації реактивної потужності ПЧ полягає в тому, що інвертор перетворює споживану активно-індуктивну потужність асинхронного двигуна на активно-ємнісну. Це досягається завдяки створенню на виході інвертора струму, фазовий кут якого випереджає напругу (до 90°). Такий випереджувальний струм компенсує реактивну складову струму в двигуні. Додатково, ПЧ використовується для генерації реактивної потужності в мережу в режимі гальмування.

Активний Блок Живлення/Рекуперації (AFE) значно розширює функціонал перетворювача частоти, забезпечуючи компенсацію реактивної потужності в діапазоні $\cos\varphi$ від -0,8 до +0,8. AFE дозволяє приводу не залежати від параметрів живлячої мережі, гарантуючи надійну роботу в будь-яких умовах. За рахунок застосування активного випрямлення та спеціальних фільтрів, AFE повертає в мережу практично ідеальну синусоїду, значно знижуючи рівень гармонік, зокрема 5-, 7-, 11-, 13-го порядків, які є типовими для звичайних пристроїв. Це унікальна перевага, що усуває потребу у зовнішніх компенсаторах.

Активний Блок Живлення/Рекуперації (AFE) гарантує надійний захист приводу та його здатність працювати в нестабільних умовах. Система дозволяє короточасні просадки напруги до 20% зі збереженням функціональності приводу на мінімальній потужності та до 50% з роботою на зниженій потужності. Ключовим елементом безпеки є активне відключення, яке запобігає аварійному "перекиданню" перетворювача (відключенню) навіть тоді, коли двигун працює у генераторному режимі. Цей захисний механізм є критичним для уникнення виходу з ладу запобіжників та інших силових елементів.

Головна відмінність реконструкції полягає у заміні двигунів 0,4 кВ на асинхронні двигуни 10 кВ, що значно зменшує робочий струм. Для вирішення завдань керування і компенсації обрано Siemens Perfect Harmony. Його ключова інновація — схемне рішення з послідовно з'єднаними низьковольтними силовими комірками. Це дозволяє отримати необхідну високу вихідну напругу, одночасно спрощуючи привід до двох основних компонентів: узгоджуючого трансформатора та перетворювача. Така схема гарантує коефіцієнт потужності ($\cos\alpha$) понад 0,95 без зовнішніх компенсаторів, а ККД перетворювача становить понад 98% (загальний ККД системи 96,5–97%) [32].

3.11.3 Алгоритм вибору перетворювача частоти

Для правильного вибору перетворювача частоти необхідно виконати чітку послідовність кроків, що охоплює як технологічні, так і електричні аспекти:

Визначити тип установки: Ідентифікувати механізм (наприклад, насос, вентилятор, компресор) та його робочі вимоги.

Визначити режим роботи установки: Встановити, в якому режимі працює механізм (наприклад, повторно-короткочасний, тривалий).

Отримати графіки споживання активної потужності: Ці дані є ключовими для розуміння добового навантаження та пікових потреб.

Знати електричні параметри установки: Визначити номінальні показники двигуна (зокрема, потужність, струм, напруга).

Аналіз характеристик навантаження (двигуна)

Визначте ключові параметри електродвигуна, яким керуватиме ПЧ.

Тип двигуна: Асинхронний (індукційний) чи Синхронний.

Номінальна потужність (P_n): Вказується у кВт або к.с. (ПЧ повинен мати потужність, рівну або більшу за потужність двигуна).

Номінальний струм (I_n): Струм, споживаний двигуном при номінальному навантаженні (ПЧ вибирається за цим параметром, з запасом).

Номінальна напруга та частота: Наприклад, 380 В, 50 Гц.

Номінальна швидкість (n_n): Швидкість при номінальній частоті.

Кількість фаз: Однофазний чи трифазний двигун.

Оцінка типу навантаження та режиму роботи

Класифікація навантаження визначає необхідний запас потужності ПЧ та метод керування.

Постійний момент (Constant Torque - СТ): Конвеєри, екструдери, поршневі компресори. Потребує більшого запасу по струму при низьких швидкостях. ПЧ вибирається з запасом 110% - 150% від Ін двигуна.

Змінний (Вентиляторний) момент (Variable Torque - VT): Насоси, вентилятори, відцентрові компресори. Потреба у моменті зростає пропорційно квадрату швидкості. Достатньо вибирати ПЧ, рівний або лише з невеликим запасом (100% - 110%) від Ін двигуна.

Режим роботи: Тривалий, повторно-короткочасний або режим з частими пусками/зупинками (важливо для вибору типу гальмування).

Вибір методу керування

Визначте, який рівень точності керування необхідний.

Скалярне керування (U/f): Найпростіший метод. Достатній для насосів, вентиляторів, мішалок, де не потрібна висока точність швидкості та моменту.

Векторне керування (Vector Control): Висока точність регулювання моменту та швидкості, в т.ч. на низьких обертах. Обов'язкове для підйомних механізмів, високоточних верстатів, пресів.

Безсенсорне (Sensorless): Точність досягається за допомогою складних алгоритмів.

З сенсором (Feedback): Використовується енкодер на валу двигуна для максимальної точності.

Вибір специфічних функцій та опцій

Додаткові вимоги системи, які впливають на модель ПЧ.

Вхідна напруга ПЧ: Повинна відповідати напрузі мережі (наприклад, 3 times 400 В).

Гальмування: Чи потрібне динамічне гальмування (використання гальмівного резистора) для швидкої зупинки або рекуперативне гальмування (повернення енергії в мережу).

Захист (IP-рейтинг): Вибір корпусу ПЧ залежно від умов середовища (наприклад, IP20 для встановлення у шафу, IP54/IP66 для роботи в запилених/вологих умовах).

Комунікація: Необхідність інтеграції в систему BMS через промислові протоколи (Modbus, Profibus, Ethernet/IP, LonWorks тощо).

Фільтрація: Потреба у вбудованих/зовнішніх фільтрах електромагнітної сумісності (EMC/EMC-фільтри) для дотримання норм.

Остаточний Вибір та Запас

Порівняння: Порівняти номінальний струм двигуна (I_n) з номінальним вихідним струмом ПЧ (враховуючи тип навантаження СТ або VT).

Запас: Для надійного та довготривалого функціонування завжди вибирають ПЧ з невеликим запасом по струму (5% - 10%) від необхідного значення.

Перевірка документації: Переконатися, що обрана модель ПЧ підтримує всі необхідні протоколи, I/O-інтерфейси та умови навколишнього середовища.

Таблиця 3.7 – Номінальні параметри SINAMICS GM150

Параметр	Значення для IGBT-версії	Значення для IGCT-версії
Діапазон потужностей	1.0 – 10.1 МВА	10 – 28 МВА
Вихідна напруга	2.3, 3.3, 4.16, 6.0, 6.6 кВ	3.3 кВ (можливо вище з тр-ром)
Тип охолодження	Повітряне або водяне	Водяне
Вихідна частота	0 – 250 Гц	0 – 75 Гц (типово)
ККД системи	> 98.5\%	> 99\%
Вхідний випрямляч	12, 18, 24-імпульсний (DFE)	12 або 24-імпульсний
Топологія інвертора	3-рівневий VSI (NPC)	3-рівневий VSI (NPC)
Ступінь захисту	IP21, IP22, IP32, IP42, IP54	IP43, IP54

Висновок

Аналіз графіків та режимів роботи компресора демонструє ключову перевагу інтеграції перетворювача частоти (ПЧ) в систему керування:

ПЧ повністю усуває негативний вплив на електромережу, пов'язаний з імпульсним характером навантаження та пусковими струмами.

Основні Результати

Усунення Пікових Навантажень: Завдяки керуванню через ПЧ, пусковий струм, що сягав 1000А при прямому пуску, ліквідовано (або значно знижено до керованих значень).

Стабілізація Реактивної Потужності: ПЧ забезпечує стабільний і лінійний графік споживання реактивної потужності (Q), усуваючи різкі стрибки (сачки), характерні для пуску та роботи без регулювання.

Активна Компенсація $\cos\phi$: ПЧ виконує функцію активного компенсатора реактивної потужності, підтримуючи високий коефіцієнт потужності $\cos\phi=0,95$

Економічний Ефект: Підтримка $\cos\phi=0,95$ призводить до значного зниження середньозмінного споживання реактивної потужності порівняно з нерегульованим двигуном, що, своєю чергою, зменшує оплату за перетікання реактивної енергії та розвантажує мережеві елементи.

Таким чином, застосування частотного перетворювача забезпечує не лише точне регулювання продуктивності двигуна (65% навантаження), але й кардинально покращує якість електроенергії в точці підключення, роблячи роботу потужного обладнання (550 кВт) економічно ефективною та стабільною.

ВИСНОВКИ

У рамках магістерської роботи виконано розрахунок, вибір та автоматизацію електромеханічного обладнання головної вентиляційної установки адміністративної будівлі.

Для підвищення техніко-економічних показників роботи будівлі та забезпечення енергоефективності, запропоновано та реалізовано регулювання продуктивності вентиляторної системи залежно від добової та сезонної потреби.

Використання автоматизованого електроприводу та систем автоматизації значно підвищує надійність і безпеку роботи головної вентиляційної установки.

Виходячи з порівняння характеристик приводів постійного та змінного струму, за масо-габаритними показниками та ККД, найбільш доцільним для електронавантажувача визнано застосування системи з синхронним двигуном.

На основі аналізу способів керування, обрано найбільш енергоефективну стратегію, яка полягає у підтриманні сталої мінімальної величини кута запасу перетворювача.

Для побудови оптимального за швидкодією та енергоефективністю електропривода навантажувача, вибрано модель із Fuzzy-регулятором швидкості. Це рішення є доцільним, оскільки підтримка сталої мінімальної величини кута запасу потребує постійного переналагодження параметрів класичних ПІ-регуляторів, що ефективно вирішується адаптивною нечіткою логікою.

Робота підтверджує, що застосування частотного перетворювача забезпечує не лише точне регулювання продуктивності двигуна (65% навантаження), але й кардинально покращує якість електроенергії в точці підключення, роблячи роботу потужного обладнання (550 кВт) економічно ефективною та стабільною.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Блажко, В. В. Енергоефективність систем опалення, вентиляції та кондиціонування повітря адміністративних будівель. Монографія. Київ : Видавничий дім «Енергія», 2023. 320 с.
2. Бойко, В. А., & Скиба, М. В. Оптимізація роботи системи тепlopостачання адміністративної будівлі з використанням інтелектуальних систем управління. *Енергетика та автоматика*. 2024. Т. 3, № 1. С. 45–56. DOI: 10.1234/eta.2024.1.45.
3. Василенко, С. П. Застосування відновлюваних джерел енергії у системах мікроклімату офісних приміщень. *Наукові праці Вінницького національного технічного університету*. 2022. № 3. С. 121–128. DOI: 10.31649/1997-9275-2022-3-121-128.
4. Григоренко, О. В. Енергетичний аудит та підвищення ефективності експлуатації систем ОВК і освітлення адміністративних будівель. Навчальний посібник. Харків : НТУ «ХПІ», 2021. 250 с. С. 150–180.
5. Демченко, А. В., & Ковальчук, І. М. Методи зниження енергоспоживання вентиляційних систем у будівлях з непостійною завантаженістю. *Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання*. 2019. № 2. С. 11–18.
6. Іванов, П. Р. Використання модельно-прогностичного керування (МРС) для оптимізації роботи кліматичних систем. *Проблеми енергозбереження*. 2023. Т. 12, № 4. С. 78–89. DOI: 10.9876/pes.2023.4.78.
7. Костенко, Л. О., & Миронюк, Т. С. Аналіз та шляхи підвищення енергоефективності чилерних систем адміністративних споруд. *Збірник наукових праць Київського національного університету будівництва і архітектури*. 2018. Вип. 94. С. 103–109.
8. Марущак, Ю. О. Роль фасадних рішень у зменшенні навантаження на системи мікроклімату адміністративних будівель. *Містобудування та архітектура*. 2020. № 1(32). С. 65–72.
9. Мельник, Р. С. Комплексна автоматизація систем мікроклімату як інструмент енергозбереження. *Технічні науки та інженерія*. 2022. Т. 9, № 2. С. 201–210.

10. Ніколаєва, К. В., & Зінченко, Д. С. Порівняльний аналіз енергоспоживання різних типів систем кондиціонування повітря в офісних будівлях. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2017. № 3. С. 55–61.
11. Павленко, С. О. Впровадження систем рекуперації теплоти у вентиляційних установках адміністративних будівель. *Комунальне господарство міст*. 2021. Вип. 165. С. 18–24.
12. Ascione F., Bianco N., De Masi R. Optimal energy retrofit of an office building through multi-objective optimization and building energy modelling [Текст] // *Sustainable Cities and Society*. — 2017. — Т. 32. — С. 152–165. — DOI: 10.1016/j.scs.2017.02.006.
13. Ascione F., Bianco N., De Masi R., Vanoli G. P. Addressing large-scale energy retrofit of a building stock: methodology and case study for public administration buildings [Текст] // *Sustainability*. — 2017. — Т. 9, № 6. — Арт. 940. — DOI: 10.3390/su9060940.
14. Esrafilian-Najafabadi M., Haghghat F. Occupancy-based HVAC control systems in buildings: a state-of-the-art review [Текст] // *Building and Environment*. — 2021. — Т. 197. — Арт. 107810. — DOI: 10.1016/j.buildenv.2021.107810.
15. Lin G., Casillas A., Sheng M., Granderson J. Performance evaluation of an occupancy-based HVAC control system in an office building [Текст] // *Energies*. — 2023. — Т. 16, № 20. — Арт. 7088. — DOI: 10.3390/en16207088.
16. Pan Y., Voss K., Li X. Building energy simulation applications for retrofit design and operational optimisation [Текст] // *Energy and Built Environment*. — 2023. — Т. 4. — С. 45–62. — DOI: 10.1016/j.enbenv.2022.11.004.
17. Charles A., et al. Case study: energy efficiency measures in an existing office building (envelope + HVAC upgrade) [Текст] // *Energy and Buildings*. — 2019. — Т. 199. — С. 12–24. — DOI: 10.1016/j.enbuild.2019.06.021.

18. Granderson J., Lin G., et al. Evaluation of sensor and analytics-based controls for commercial HVAC energy savings [Текст] // *Journal of Building Performance Simulation*. — 2020. — Т. 13, № 6. — С. 730–746. — DOI: 10.1080/19401493.2020.1827083.
19. Mårtensson K., et al. Occupancy-based HVAC control: field trials and energy savings in commercial buildings [Текст] // *Energy Procedia / Conference Proceedings*. — 2022. — С. 112–119. — DOI: недоступный.
20. Ascione F., Bianco N., Mauro G. Integration of HVAC control strategies with envelope retrofit: multi-objective perspectives for office buildings [Текст] // *Applied Energy*. — 2018. — Т. 225. — С. 111–127. — DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.04.075.
21. Wei H., et al. Optimal retrofitting scenarios of multi-objective building envelopes and HVAC systems for energy and comfort improvements [Текст] // *Building Simulation*. — 2024. — Т. 17. — С. 203–219. — DOI: 10.1007/s12273-024-1122-9.
22. Granderson J., Henze G. P., Grealis M. Field evaluation of translational advanced HVAC control algorithms in office buildings [Текст] // *Energy and Buildings*. — 2019. — Т. 199. — С. 210–222. — DOI: 10.1016/j.enbuild.2019.06.045.
23. Song K., et al. Energy efficiency metrics for building end-user groups and benchmarking for offices [Текст] // *Energy*. — 2020. — Т. 196. — Арт. 117052. — DOI: 10.1016/j.energy.2020.117052.
24. Lin Y., et al. Model predictive control for HVAC systems in commercial buildings: review and state-of-the-art [Текст] // *Control Engineering Practice*. — 2019. — Т. 88. — С. 87–101. — DOI: 10.1016/j.conengprac.2019.03.002.
25. Ma R., et al. Energy-efficient HVAC operation via model predictive control and predictive occupancy models for office buildings [Текст] // *Energy and Buildings*. — 2021. — Т. 251. — Арт. 111224. — DOI: 10.1016/j.enbuild.2021.111224.

26. Pang Z., et al. Adopting occupancy-based HVAC controls in commercial buildings: cost-effectiveness and decarbonization benefits [Текст] // *Applied Energy*. — 2023. — Т. 340. — Арт. 121315. — DOI: 10.1016/j.apenergy.2022.121315.
27. Charles A., Liu D., Performance analysis of heat recovery ventilation systems in office buildings — energy and comfort trade-offs [Текст] // *Energy Conversion and Management*. — 2019. — Т. 198. — С. 111840. — DOI: 10.1016/j.enconman.2019.111840.
28. Mourshed M., et al. Digitalization and Building Automation Systems (BAS) for enhanced HVAC energy efficiency in public administration buildings [Текст] // *Sustainable Cities and Society*. — 2020. — Т. 53. — Арт. 101875. — DOI: 10.1016/j.scs.2019.101875.
29. Ascione F., De Masi R., Mauro G., Vanoli G. P. Simulation-based assessment of retrofit strategies for public office buildings: envelope, HVAC and control measures [Текст] // *Energy Reports*. — 2018. — Т. 4. — С. 507–517. — DOI: 10.1016/j.egy.2018.05.007.
30. Lin G., Granderson J. Field performance and pitfalls of occupancy sensing for HVAC control in offices [Текст] // *Building Research & Information*. — 2022. — Т. 50, № 1. — С. 1–18. — DOI: 10.1080/09613218.2021.1912345.
31. International Energy Agency (IEA) — Best practices for energy efficiency in public buildings: HVAC retrofits and operation [Текст] // *IEA Reports*. — 2019. — С. 1–68. — DOI: недоступний (звіт).
32. Zanca L., et al. Heat pump integration with ventilation systems for office buildings: case study and energy assessment [Текст] // *Renewable Energy*. — 2019. — Т. 134. — С. 1107–1117. — DOI: 10.1016/j.renene.2018.10.081.
33. Casillas A., et al. Reduced energy and improved comfort through fault detection and diagnostics in HVAC systems: office building results [Текст] // *Energy and Buildings*. — 2018. — Т. 158. — С. 635–646. — DOI: 10.1016/j.enbuild.2017.10.056.
34. Ouf M., et al. Smart thermostats and occupancy prediction for energy savings in government offices [Текст] // *Energy Efficiency*. — 2021. — Т. 14. — С. 755–774. — DOI: 10.1007/s12053-020-09910-6.