МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

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

Кафедра електричної інженерії та кіберфізичних систем

Пояснювальна записка

до магістерської роботи

рівень вищої освіти другий (магістерський) рівень

на тему Удосконалення системи вентиляції будівлі за критерієм енергоефективності

Виконав: студент 2 курсу, групи 8.1413
Папіровський М.С.
(прізвище та ініціали) (підпис)

спеціальності
141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(шифр і назва)

спеціалізація
(шифр і назва)

освітньо-професійна програма
141.00.11 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(шифр і назва)

Керівник Артемчук В.В.
(прізвище та ініціали) (підпис)

Запоріжжя

2025 рік

Запорізький національний університет

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

(повне найменування вищого навчального закладу)

Кафедра електричної інженерії та кіберфізичних систем

(повна назва кафедри)

Рівень вищої освіти другий (магістерський) рівень

(повна назва кафедри)

Спеціальність 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

(шифр і назва)

Спеціалізація

(шифр і назва)

Освітньо-професійна програма 141.00.11 Електроенергетика, електротехніка

(шифр і назва)

та електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

д.т.н., доц. В.Л. Коваленко

“_12_” __лютого__2025 року

З А В Д А Н Н Я

на кваліфікаційну роботу студенту

Папіровський Микола Сергійович

1. Тема роботи: Удосконалення системи вентиляції будівлі за критерієм енергоефективності

Керівник роботи: Артемчук В.В.

затверджені наказом ЗНУ від «_01_»_травня__2024__року №_361-с___

2. Строк подання студентом роботи: 01 лютого 2025 року

3. Вихідні дані до роботи: тиск в пневмосистемі до 100 Па; продуктивність вентиляційної установки до 5 $м^3/с$; номінальне навантаження 50 А; стійкість до коротких замикань 6 кА.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які рекомендовано розробити): вступ; 1) аналіз існуючих вентиляційних установок; 2) аналіз енергетичних показників в електроприводі вентиляційних установок; 3) покращення енергетичних якостей вентиляційних установок

5. Перелік графічного матеріалу: 1) титульна сторінка; 2) типи вентиляційних установок; 3) типи вентиляційних установок за структурою; 4) функціональна схема вентиляційних установок; 5) баланс енергії при використанні вентиляційних установок

6. Консультанти розділів дипломної роботи

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

7. Дата видачі завдання 01.06.2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів магістерської роботи	Примітка
1	Аналіз існуючих вентиляторих установок	01.10.2024	
2	Оцінка енергетичної ефективності вентиляційних систем	01.11.2024	
3	Покращення енергетичних якостей вентиляційних установок	01.12.2024	

Студент _____ Папіровський М.С.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник дипломної роботи _____ Артемчук В.В.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Нормоконтролер _____ Коваленко І.І.
(підпис) (прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Магістерська робота присвячена дослідженню питання підвищення енергетичної ефективності системи вентиляції будівлі як важливого напряму сучасного енергозбереження. Проаналізовано конструктивні особливості вентиляційних установок, основні режими їх роботи та енергетичні показники, що впливають на загальні витрати енергії у будівлі. Значну увагу приділено методам оцінки енергоефективності вентиляційних систем, зокрема порівнянню прямих, непрямих та інструментальних методів. У роботі обґрунтовано доцільність впровадження комплексного підходу, який включає технічну модернізацію, автоматизацію, частотне регулювання, впровадження систем моніторингу споживання енергії, а також організаційні заходи, такі як навчання персоналу й періодичні енергоаудити.

Ключові слова: енергоефективність, вентиляційна система, автоматизація, частотне регулювання, енергомоніторинг, енергоаудит, інтелектуальне керування, повітрообмін.

ABSTRACT

The master's thesis is devoted to the study of the issue of increasing the energy efficiency of the building's ventilation system as an important direction of modern energy saving. The design features of ventilation units, the main modes of their operation and energy indicators that affect the total energy consumption in the building are analyzed. Considerable attention is paid to methods for assessing the energy efficiency of ventilation systems, in particular, a comparison of direct, indirect and instrumental methods. The work substantiates the feasibility of implementing an integrated approach, which includes technical modernization, automation, frequency control, implementation of energy consumption monitoring systems, as well as organizational measures, such as personnel training and periodic energy audits.

Keywords: energy efficiency, ventilation system, automation, frequency control, energy monitoring, energy audit, intelligent control, air exchange

ЗМІСТ

Вступ 6
1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ВЕНТИЛЯТОРИХ УСТАНОВОК 8
1.1 Класифікація вентиляторних установок 8
1.2 Основні елементи устаткування системи вентиляції 22
1.3 Вимоги до вентиляторних установок 27
2 ОЦІНКА ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ВЕНТИЛЯЦІЙНИХ СИСТЕМ 33
2.1 Основні енергетичні показники вентиляційних систем 33
2.2 Режими роботи вентиляційних систем 38
2.3 Методи оцінки енергетичної ефективності вентиляційних систем 47
3 3 ПОКРАЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ЯКОСТЕЙ ВЕНТИЛЯЦІЙНИХ УСТАНОВОК
3.1 Автоматизація вентиляційних систем 56
3.2 Використання частотних перетворювачів 66
3.3 Організаційно-експлуатаційні заходи з підвищення енергоефективності 71
Висновки 76
Список використаних джерел 78
Додатки 80

ВСТУП

У сучасних умовах зростаючої вартості енергоносіїв, переходу до принципів сталого розвитку та впровадження міжнародних стандартів енергоефективності особливого значення набуває раціональне використання енергоресурсів у будівлях. Одним із ключових енергоспоживаючих елементів у більшості громадських, адміністративних та виробничих об’єктів є система вентиляції, яка виконує важливу функцію забезпечення нормативного повітрообміну, теплового комфорту та безпеки. Водночас саме вентиляційне обладнання часто характеризується значним рівнем енергетичних втрат, застарілими схемами управління або неадаптивною роботою, що зумовлює високі експлуатаційні витрати.

Удосконалення систем вентиляції за критерієм енергоефективності передбачає комплекс заходів, спрямованих на зменшення споживання електроенергії при збереженні (або навіть покращенні) параметрів мікроклімату. До таких заходів належать: впровадження інтелектуального керування на базі сучасних засобів автоматизації, використання частотно-регульованих електроприводів, оптимізація повітропроводів, організація ефективного енергомоніторингу та регулярний технічний супровід. Окреме значення має модернізація обладнання з урахуванням режимів реального навантаження, а також аналіз режимів роботи та методів оцінки енергоефективності на основі інструментальних, прямих і непрямих методів.

Метою цієї магістерської роботи є дослідження можливостей підвищення енергетичних характеристик системи вентиляції будівлі шляхом технічної оптимізації, впровадження автоматизованого керування та частотного регулювання, а також розробка рекомендацій з організаційно-експлуатаційного вдосконалення системи на основі аналізу її поточного стану.

У першому розділі роботи здійснено аналіз існуючих вентиляторних установок, їх класифікацію, конструктивні особливості та нормативні вимоги. У другому розділі розглянуто методи оцінки енергетичної ефективності

вентиляційних систем, зокрема основні енергетичні показники, режими роботи та методики їх дослідження. Третій розділ присвячено практичним заходам щодо підвищення енергоефективності за рахунок впровадження автоматизації, частотного регулювання, систем моніторингу та організаційним аспектам, зокрема обслуговуванню та навчанню персоналу.

Результати роботи мають як теоретичне, так і прикладне значення, та можуть бути використані для модернізації систем вентиляції у реальних об’єктах будівництва, експлуатації та реконструкції.

1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ВЕНТИЛЯТОРИХ УСТАНОВОК

1.1 Класифікація вентиляторних установок

Вентиляційні установки є ключовим елементом інженерних систем будівель, що забезпечують подачу, очищення та циркуляцію повітря. Вони відіграють критичну роль у підтриманні мікроклімату приміщень, збереженні енергоефективності та забезпеченні комфортних умов для людей. Різноманітність вентиляційних установок обумовлена різними вимогами до продуктивності, конструктивними особливостями, умовами експлуатації та принципами роботи.

Вентиляторні установки можна класифікувати за такими критеріями:

- за функціональним призначенням;
- конструктивними особливостями;
- способом подачі повітря;
- типом приводу;
- енергоефективністю та сферою застосування.

Розглянемо це більш детально (рис. 1.1 – 1.6).

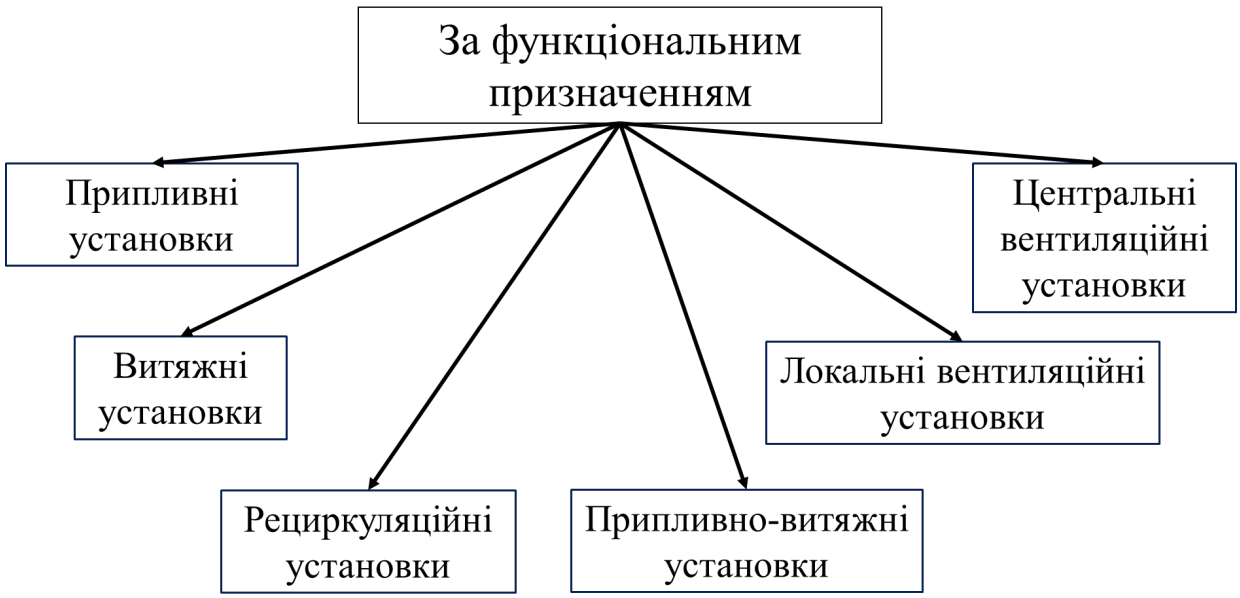


Рисунок 1.1 – Установки за функціональним призначенням

Вентиляторні установки поділяються на кілька основних груп залежно від їх функціонального призначення (рис. 1.1). Припливні установки забезпечують подачу свіжого повітря в приміщення. Часто комплектуються фільтрами, нагрівачами, зволожувачами. Витяжні установки видаляють відпрацьоване повітря, забруднення, вологу або шкідливі гази з приміщення. Припливно-витяжні установки поєднують функції подачі та видалення повітря, часто використовують рекуперацію тепла. Рециркуляційні установки забезпечують часткове або повне повернення відпрацьованого повітря після його очищення. Локальні вентиляційні установки обслуговують конкретні зони або окремі робочі місця. Центральні вентиляційні установки обслуговують всю будівлю або комплекс приміщень [1].

Класифікація за конструктивними особливостями (рис. 1.2).

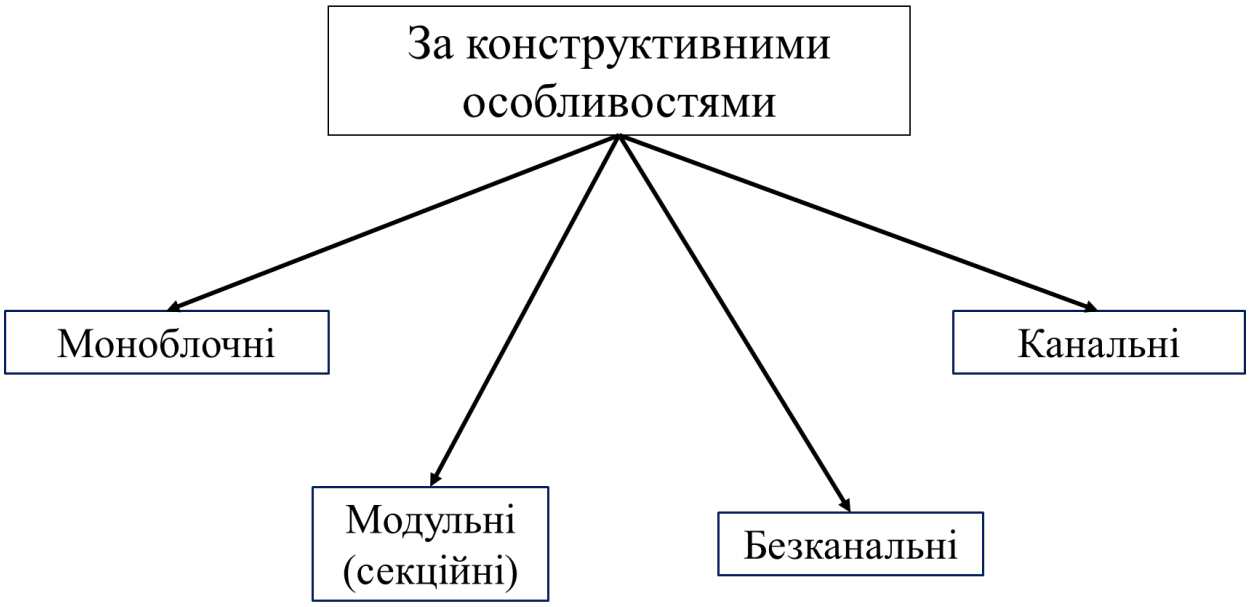


Рисунок 1.2 – Установки за конструктивними особливостями

Залежно від конструкції вентиляторні установки можуть бути (рис. 1.2):

- моноблочні, коли усі компоненти (вентилятор, фільтр, нагрівач, рекуператор) зібрані в одному корпусі. Переваги: компактність, простота монтажу;

- модульні (секційні) складаються з окремих функціональних модулів, що дозволяє налаштовувати систему під конкретні потреби;
- канальні інтегруються у вентиляційні канали і можуть працювати в складі великих систем;
- безканальні забезпечують циркуляцію повітря у приміщенні без підключення до системи повітроводів.

За способом подачі повітря (рис. 1.3) [2].

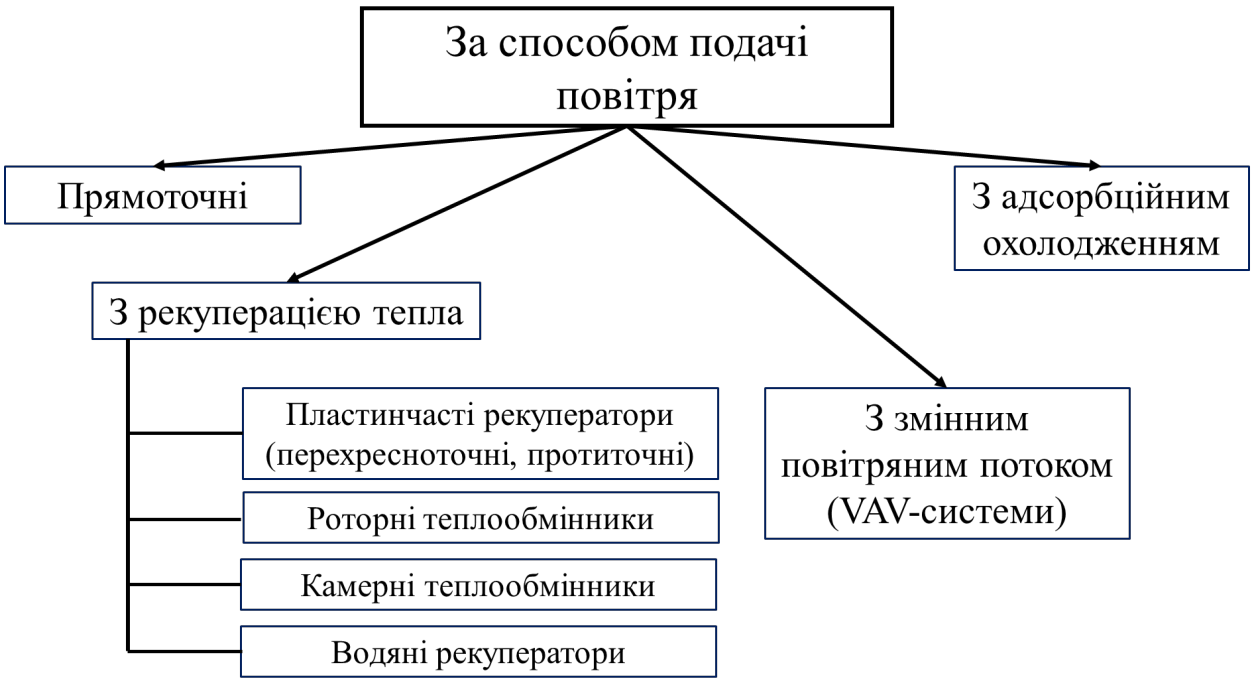


Рисунок 1.3 – Установки за способом подачі повітря

Залежно від способу переміщення повітря вентиляторні установки поділяються на (рис. 1.3):

- прямоточні забезпечують подачу або відведення повітря без його рекуперації;
- з рекуперацією тепла використовують тепло відпрацьованого повітря для нагріву припливного, що значно знижує енергоспоживання. Види рекуператорів:

    а) пластинчасті рекуператори (перехресноточні, протиточні);

    б) роторні теплообмінники;

в) камерні теплообмінники;

г) водяні рекуператори.

- з адсорбційним охолодженням забезпечують кондиціонування повітря за рахунок використання вологопоглинаючих матеріалів;

- з змінним повітряним потоком (VAV-системи) автоматично регулюють витрату повітря в залежності від потреб.

Класифікація за типом приводу вентилятора (рис. 1.4).

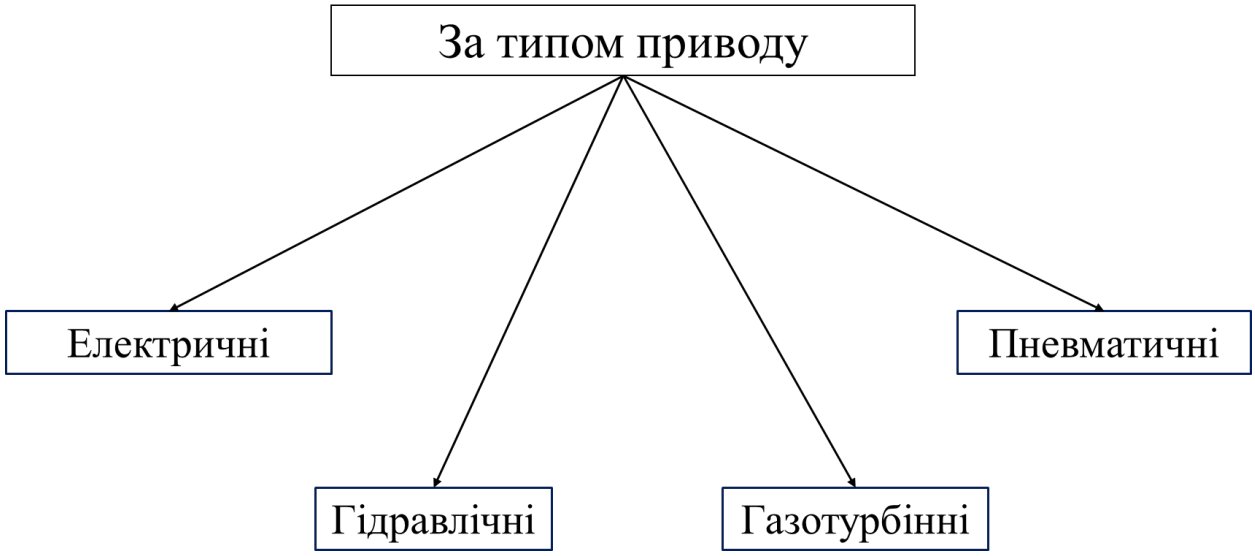


Рисунок 1.4 – Класифікація за типом приводу

Найбільш поширеним типом є електричні приводи. Вони використовують електродвигуни змінного чи постійного струму. Гідравлічні приводи застосовуються у промислових установках з великими об’ємами повітря. Пневматичні приводи рідко використовуються, переважно у вибухонебезпечних середовищах. Газотурбінні приводи застосовуються у спеціалізованих системах, де потрібно переміщати великі обсяги повітря на далекі відстані [3 – 5].

Класифікація за енергоефективністю (рис. 1.5).

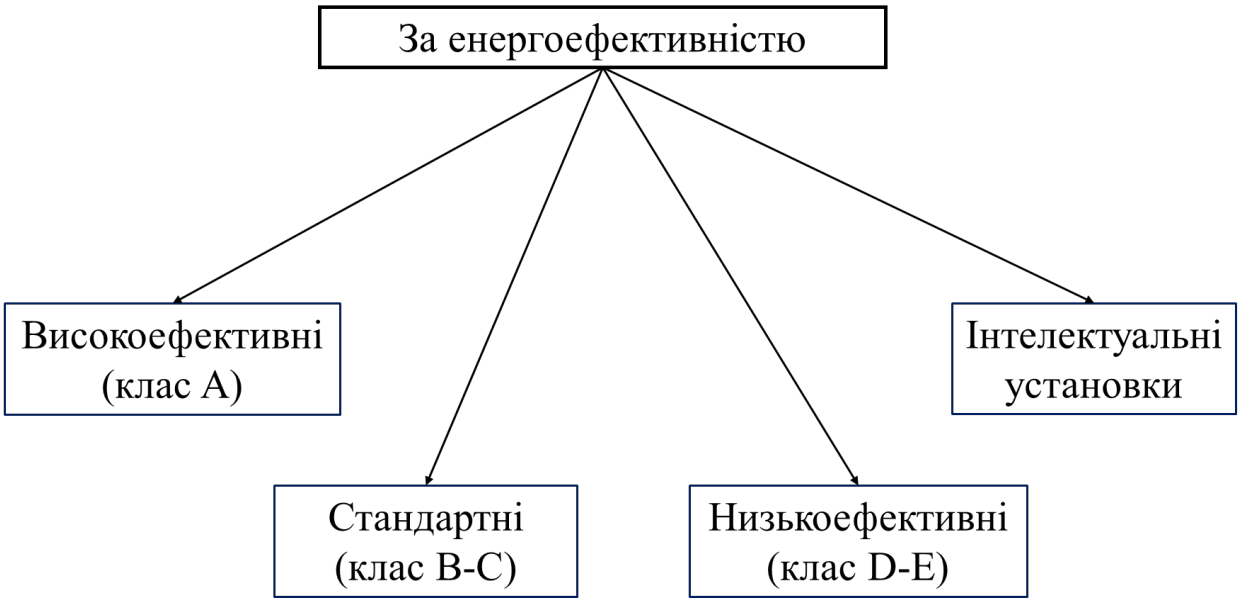


Рисунок 1.5 – Установки за енергоефективностю

Сучасні вентиляційні установки розрізняються за рівнем енергоспоживання та ефективності роботи (рис. 1.5):

- високоефективні установки (клас А) мають низьке енергоспоживання, використовують рекуперацію, інтелектуальні системи керування;
- стандартні установки (клас В-С) характеризуються середнім рівнем ефективності, поширені у побутовому та комерційному секторі;
- низькоефективні установки (клас D-E) застарілі моделі або дешеві рішення без енергоощадних технологій;
- інтелектуальні установки використовують датчики CO_2, температури, вологості, контролюють повітряний потік та регулюють роботу залежно від потреб приміщення.

Класифікація за сферою застосування (рис. 1.6).

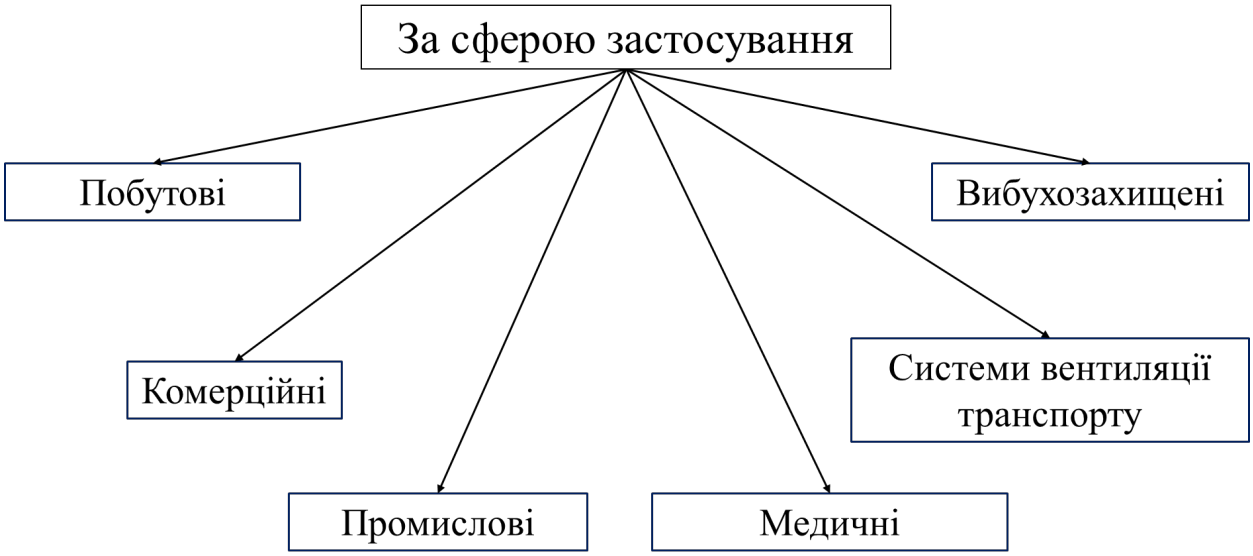


Рисунок 1.6 – Установки за сферою застосування

Вентиляційні установки застосовуються в різних галузях, що визначає їхні технічні характеристики (рис. 1.6):

- побутові використовуються у житлових будинках, квартирах, котеджах;
- комерційні застосовуються в офісних центрах, торгових комплексах, готелях;
- промислові використовуються в заводах, фабриках, нафтопереробних підприємствах;
- медичні являють собою спеціальні системи вентиляції для лікарень, лабораторій (HEPA-фільтрація, контроль стерильності);
- вибухозахищені є спеціалізованими системами для шахт, хімічної промисловості, об'єктів з підвищеною пожежонебезпекою;
- системи вентиляції транспорту використовуються в літаках, потягах, кораблях, автомобілях.

Вентиляторні установки є невід'ємною частиною інженерних систем будівель та промислових об'єктів. Вибір конкретного типу установки залежить від багатьох чинників: від необхідного рівня повітрообміну до економічної ефективності та енергоспоживання [6, 7].

З урахуванням сучасних тенденцій, найбільш актуальними напрямками розвитку вентиляторних установок є:

- використання рекуперації тепла для зниження витрат енергії;
- впровадження інтелектуальних систем керування для оптимізації роботи;
- застосування енергоефективних двигунів і технологій для зменшення експлуатаційних витрат.

Раціональний вибір вентиляційної установки дозволяє значно покращити якість повітря, зменшити енергоспоживання та підвищити комфорт у приміщеннях.

Крім того, існує також класифікація за такими ознаками [8 – 10].

1) Природна вентиляція.

В системах природної вентиляції повітря переміщується через такі фактори, як аепація (зміна температури зовнішнього повітря та повітря в приміщенні), тиск «повітряного стовпа» між обслуговуючим приміщенням і витяжним пристроєм (дефлектором) на покрівлі будинку та вітровий тиск.

У приміщеннях із надлишковим теплом повітря завжди тепліше, ніж на вулиці. Більш важке зовнішнє повітря витісняє менш щільне тепле повітря з будинку. Вентилятор також викликає циркуляцію повітря в замкненому просторі.

Вплив вітрового тиску проявляється у створенні підвищеного тиску на навітряних (звернених до вітру) сторонах будинку та зниженому тиску на підвітряних сторонах, а іноді й на покрівлі.

Природні системи вентиляції прості не вимагають дорогого устаткування та електричної енергії. Тим не менш, цих систем не вистачає для вирішення всіх складних і різноманітних завдань вентиляційних систем, оскільки їх ефективність залежить від змінних факторів, таких як температура повітря, напрямок і швидкість вітру, а також невеликого тиску.

2) Механічна вентиляція

Механічні системи вентиляції використовують устаткування та прилади, які можуть переміщувати повітря на великі відстані, такі як вентилатори, електродвигуни, повітронагрівники, пиловловлювачі та автоматика. Їх робота може призвести до значних витрат електроенергії. Незалежно від умов повітряного середовища такі системи можуть подавати і видаляти повітря в необхідній кількості з локальних зон приміщення. Повітря піддається різним типам обробки, як-от очищенню, нагріванню, зволоженню та іншим, що практично неможливо при природній вентиляції. Необхідно зазначити, що в реальному житті часто використовується так звана змішана вентиляція, що означає використання як природної, так і механічної вентиляції одночасно. У кожному конкретному проєкті визначається тип вентиляції, який є найбільш санітарно-гігієнічним, економічним і технічно ефективним.

3) Припливна і витяжна вентиляція.

Припливні системи подають чисте повітря у вентильовані приміщення замість видаленого. Припливне повітря піддається спеціальному обробленню (очищенню, нагріванню, зволоженню тощо) у випадках, коли це необхідно. Витяжна вентиляція видаляє забруднене або нагріте відпрацьоване повітря з приміщення (цеху, корпусу).

У приміщенні зазвичай є як припливні, так і витяжні системи. Їхня продуктивність повинна бути збалансована з можливістю надходження повітря в сусідні або прилеглі приміщення. У приміщеннях також можуть бути витяжні чи припливні системи. У цьому випадку повітря надходить або з даного приміщення зовні через спеціальні прорізи, або виходить з цього приміщення або переходить у суміжні приміщення. Можна встановити місцеву (припливну) або загальнообмінну (витяжну) вентиляцію на робочому місці.

У загальнообмінній вентиляції існує чотири основні схеми організації повітрообміну: зверху вниз, зверху вверх, знизу вверх і знизу вниз (рис. 1.7).

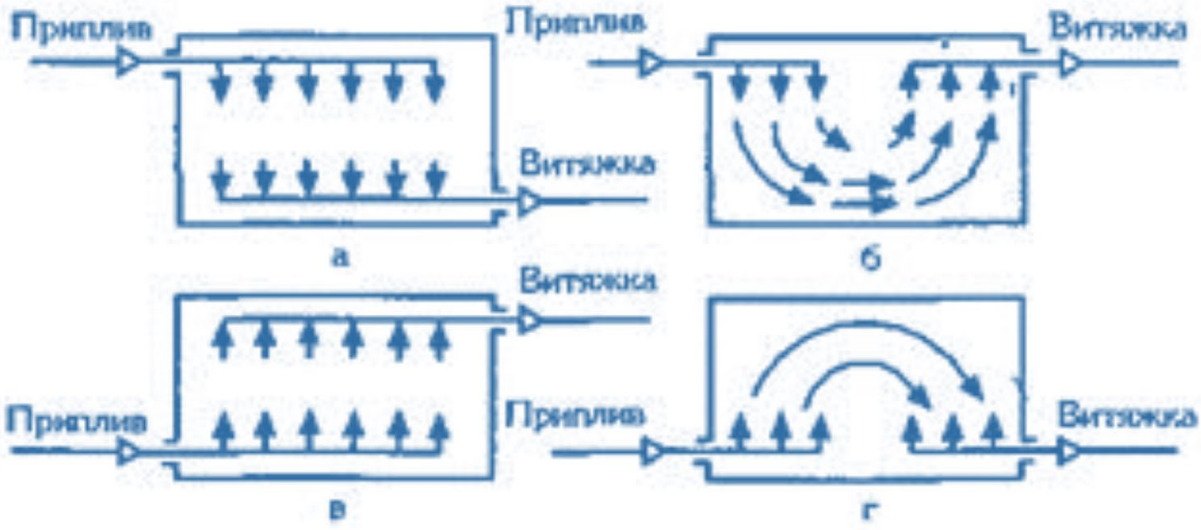


Рисунок 1.7 – Повітрообмін при загальнообмінній вентиляції [11]

Коли припливне повітря має температуру нижчу температури приміщення в холодний період року, схеми зверху вниз (рис. 1.7, а) і зверху вверх (рис. 1.7, б) є оптимальними [1 - 3]. Повітря в приміщенні нагріває припливне повітря до того, як воно досягає робочої зони. Рекомендується використовувати додаткові дві схеми (рис. 1.7, в та 1.7, г) тоді, коли припливне повітря підігрівається в холодний період року і його температура вища температури внутрішнього повітря.

Загальнообмінна вентиляція повинна видаляти 60% повітря з нижньої зони приміщення та 40% з верхньої, якщо у виробничих приміщеннях виділяються гази та пари з густиною, що перевищує густину повітря, наприклад пари кислот, бензину та гасу [4]. Якщо густина газів менша за густину повітря, забруднене повітря видаляється у верхній частині.

Схема припливної механічної вентиляції зображено на рисунку 1.8.



Рисунок 1.8 – Схема припливної вентиляції [11]:
1 – повітрозабірний пристрій; 2 – фільтр для очищенні повітря; 3 – повітронагрівач; 4 – мережа повітроводів; 5 – вентилятор; 6 – припливні патрубки з насадками; 7 – обвідний канал

Повітрозабірні пристрої повинні бути розташовані в місцях, щоб пил і гази не забруднювали повітря. Вони повинні бути нижче 2 м від рівня землі та не ближче 25 м від горизонтальних і вертикальних каналів витяжної вентиляції. У більшості випадків припливне повітря подається в приміщення розсіяним потоком, для чого використовуються спеціальні насадки.

Схема витяжної та припливно-витяжної вентиляції наведено на рисунку 1.9. Після очищення повітря необхідно викинути на висоті 1 м над гребенем даху. Не можна використовувати викидні отвори безпосередньо у вікнах [5].

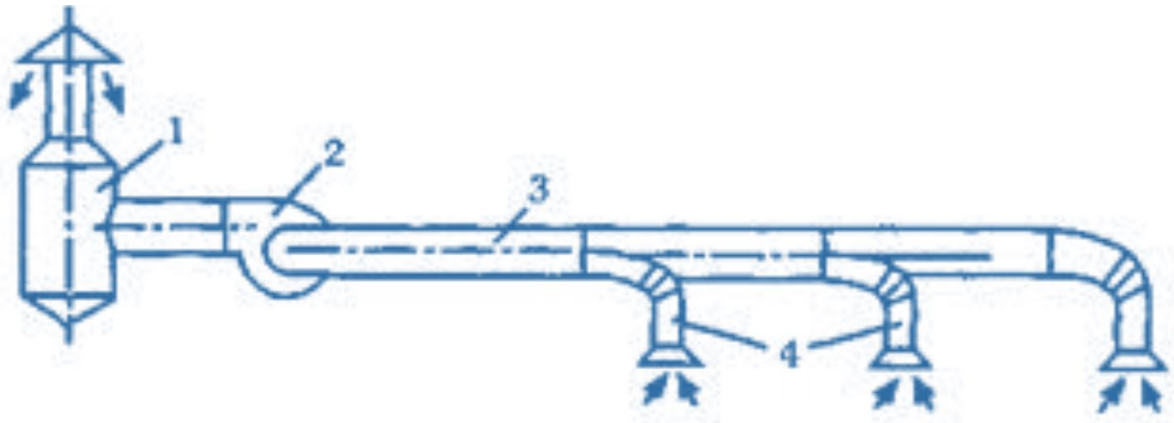


Рисунок 1.9 – Схема витяжної вентиляції [11]:
1 – очисний пристрій; 2 – вентилятор; 3 – центральний повтропровід; 4 – відсмоктуючий повітропровід

В умовах промислового виробництва найбільш поширеною системою вентиляції є припливно-витяжна, яка включає загальний приплив у робочу зону та місцеву витяжку шкідливих речовин безпосередньо з їхніх місць утворення.

Якщо в виробничих приміщеннях виділяється значна кількість шкідливих газів, парів і пилу, витяжка [6] повинна бути на десять відсотків більшою, ніж приплив. Це запобігає тому, що шкідливі речовини витісняються в більш безпечні приміщення.

Після очищення система припливно-витяжної вентиляції може використовувати не тільки зовнішнє повітря, але й повітря самих приміщень. Рециркуляція – це процес повторного використання повітря в приміщенні. Це робиться в холодний період року, щоб зменшити кількість тепла, витраченого на підігрівання припливного повітря. Тим не менш, рециркуляція неможлива через низку санітарних і протипожежних вимог.

4) Місцева вентиляція.

Ми використовуємо місцеву вентиляцію, коли повітря подається на певні місця (місцева припливна вентиляція) і забруднене повітря видаляється лише з місць утворення шкідливих виділень (місцева витяжна вентиляція).

Повітряні душі, або підвищена локальна подача повітря, є прикладом місцевої припливної вентиляції. На постійних робочих місцях вони повинні надавати чисте повітря, щоб знизити температуру оточуючого повітря та обдувати працівників, які часто піддаються сильному тепловому опроміненню.

Місцева припливна вентиляція також використовується як повітряні завіси, які працюють як повітряні перегородки або змінюють напрямок потоку повітря. Загальнообмінна вентиляція коштує дорожче, ніж місцева. У виробничих приміщеннях часто використовується змішана система вентиляції, яка є загальною для усунення шкідливих викидів у всьому приміщенні та для обслуговування робочих місць [12].

Місцева витяжна вентиляція використовується, якщо шкідливі виділення в приміщенні локалізовані та неможливо їх поширити по всьому приміщенню. Місцева витяжна вентиляція використовується у виробничих приміщеннях для

вловлювання та видалення шкідливих виділень, таких як гази, дим і пил, а також частково від устаткування, що виділяє тепло. Місцеві відсмоктувачі (наприклад, завіси, бортові відсмоктувачі, парасолі, шафи та кожухи верстатів) використовуються для видалення шкідливих речовин (рис. 1.10) [11].

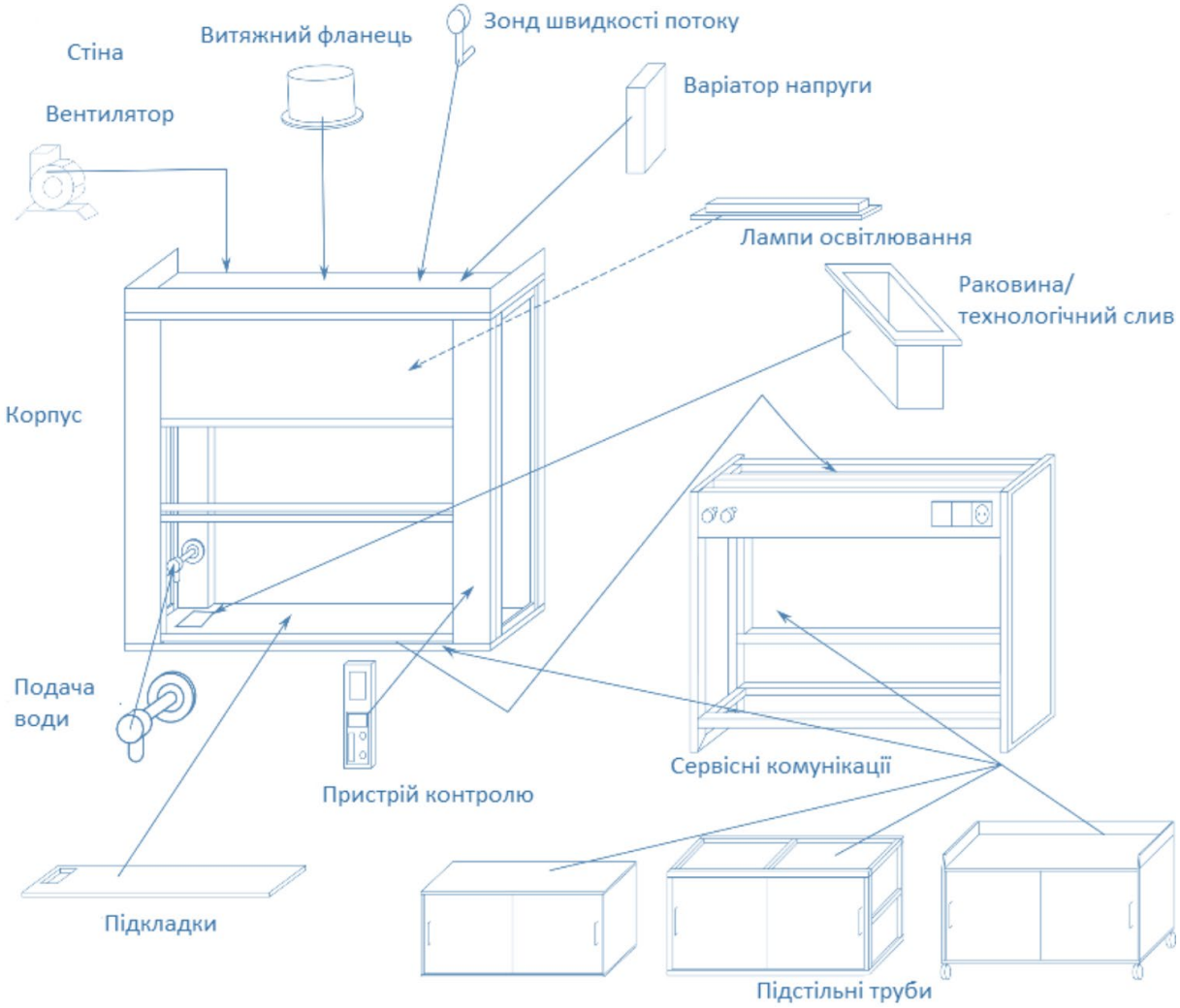


Рисунок 1.10 – Схема побудови витяжного шкафа

Основні вимоги, які вони повинні задовольнити: місце утворення шкідливих виділень повинно бути повністю видалене; конструкція місцевого відсмоктувача повинна бути такою, щоб вона не заважала нормальній роботі та не знижувала продуктивність роботи; і шкідливі виділення повинні бути видалені природним шляхом: гарячі гази та пар повинні бути видалені нагору, а холодні важкі гази та пил потрапляють униз. Місцеві відсмоктувачі

відносяться до двох категорій: відкритого типу (бортові відсмоктувачі) і напіввідчиненого типу (витяжні шафи та парасолі).

Місцеві відсмоктувачі, мережа повітропроводів, вентилятор (відцентровий або осьовий) і витяжна шахта є основними компонентами такої системи. Найбільш складні витяжні системи потребують послідовного встановлення двох або навіть трьох пиловловлювачів (фільтрів), щоб забезпечити дуже високий рівень очищення повітря від пилу. У більшості випадків місцеві витяжні системи є надзвичайно ефективними, оскільки вони дозволяють видаляти шкідливі речовини безпосередньо від місця їх утворення або виділення, не дозволяючи їм поширюватися по приміщенню [13 – 16].

Вибір типу місцевої витяжки залежить від таких факторів, як температура, густина парів, токсичність шкідливих виділень, положення працівника під час виконання роботи, особливості технологічного процесу та устаткування. Місцеву витяжну вентиляцію можна створити за допомогою витяжних шаф, кожухів і вітринних відсмоктувачів у випадках, коли джерело виробничих шкідливостей можна розмістити всередині простору, обмеженого стінками. Якщо джерело шкідливостей не можна ізолювати за умовами технології або обслуговування, встановлюють витяжний зонт або всмоктувальну панель. У цьому випадку зона дихання працівника не повинна стикатися з потоком повітря, що видаляється.

Бортові відсмоктувачі, які використовуються для обладнання ванн (гальванічних, травильних) чи інших ємкостей з токсичними рідинами, є додатковим прикладом місцевої витяжної вентиляції. Ці відсмоктувачі необхідні для завантаження підіймально-транспортного обладнання, що унеможливлює використання витяжних зонтів і всмоктувальних панелей. У [6 - 8] У ваннах шириною більше одного метра потрібно встановити бортовий відсмоктувач з передувом, який забезпечує відсмоктування повітря з одного боку ванни, а нагнітання повітря з іншого. Коли це відбувається, здається, що рухоме повітря покриває поверхню випаровування токсичних рідких продуктів.

5) Загальнообмінна вентиляція.

Загальнообмінні системи вентиляції, як припливні, так і витяжні, призначені для вентиляції всього або значної частини приміщення. Коли ці витяжні системи видаляють повітря з усього приміщення, що обслуговується, загальнообмінні припливні системи подають повітря та розподіляють його по всьому об’єму приміщення, що обслуговується.

Загальнообмінна припливна вентиляція використовується для видалення надлишкового тепла та вологи, зниження шкідливих концентрацій парів і газів, які не видаляються загальнообмінною і місцевою витяжною вентиляцією, і забезпечення санітарно-гігієнічних норм і вільного дихання для людей на робочому місці.

Загальнообмінну припливну вентиляцію встановлюють механічним примусом і підігрівають увесь об’єм припливного повітря, коли є негативний тепловий баланс, тобто коли немає тепла. Перед подачею повітря зазвичай очищають від пилу.

Якщо шкідливі виділення потрапляють у приміщення, кількість припливного повітря повинна повністю компенсувати місцеву і загальнообмінну витяжну вентиляцію.

Найпростішим типом загальнообмінної витяжної вентиляції є окремий вентилятор осьового типу з електродвигуном на одній оси, який розташований у вікні або в отвір стіни. Така установка використовує лише загальний повітрообмін, видаляючи повітря з найближчої зони приміщення до вентилятора. Витяжні повітропроводи прокладаються по підлозі цеху або у вигляді каналів під підлогою, коли в цеху немає теплоутворення від устаткування та є важкі гази чи пил як шкідливі виділення.

У промислових будинках використовуються загальнообмінні витяжні системи для обробки шкідливих виділень [17]. Ці витяжні системи обробляють різні види шкідливих виділень, такі як теплота, волога, гази, пар і пил, а їх надходження в приміщення відбувається в різних умовах, таких як розосереджування, локалізація та різні рівні.

Канальна та безканальна вентиляція відрізняються тим, що або має розгалужену мережу повітропроводів для переміщення повітря (канальні системи), або канали (повітропроводи) можуть бути відсутніми (безканальні системи), наприклад, коли вентилятори розташовані в стіні, перекритті або за природною вентиляцією.

1.2 Основні елементи устаткування системи вентиляції

Системи вентиляції включають різноманітне устаткування, зокрема вентилятори та вентиляційні установки. Додатковим обладнанням є шумоглушники, повітряні фільтри, електричні та водяні нагрівники, повітророзподільні регулювальні пристрої та так далі.

Вентилятор – це механічний пристрій, призначений для переміщення повітря повітропроводами систем вентиляції та кондиціонування, а також для прямої подачі повітря в приміщення або з нього, створюючи необхідний перепад тиску на вході та виході вентилятора.

Вентилятори класифікуються відповідно до створюваного тиску [8]:

- низького тиску (до 1 кПа);
- середнього тиску (до 3 кПа);
- високого тиску (до 12 кПа).

Також вентилятори класифікуються відповідно до складу переміщуваного повітря та умов експлуатації. Звичайний вентилятор працює з повітрям (газами) з температурою до 80 °С; корозійностійкий вентилятор працює з корозійними середовищами; термостійкий вентилятор працює з повітрям з температурою вище 80°С; вибухонебезпечний вентилятор працює з вибухонебезпечними середовищами; і пиловий вентилятор працює з запиленим повітрям.

Вентилятори можуть мати три різні способи з’єднання крильчатки з електродвигуном. Вони можуть бути з’єднані з еластичною муфтою, з клинопасовою передачею або з регулювальною вісеступінчастою передачею.

Вентилятори поділяються залежно від того, де вони встановлюються. Звичайні вентилятори встановлені на спеціальних опорах (пам’ях, фундаментах тощо); канальні встановлені безпосередньо в повітропроводи; і дахові встановлені на покрівлі.

Вентилятори мають такі основні характеристики [12]:

- подача повітря, $м^3$/год;
- повний тиск, Па;
- частота обертання, об/хв;
- споживана потужність, затрачувана на привод, кВт;
- коефіцієнт корисної дії;
- рівень звукового тиску, дБ.

За способом роботи вентилятори діляться на:

- осьові (аксіальні);
- радіальні (відцентрові);
- діаметральні (відцентрові).

Вентилятор і електродвигун встановлюють у спеціальний корпус. Крім того, вони можуть використовуватися в кондиціонерах, повітряних завісах, повітроочисниках, фанкойлах, сплітсистемах, шафових кондиціонерах та інших типах вентиляційних установок.

Зниження шуму вентилятора можливо завдяки зниженню швидкості обертання робочого колеса, підвищенню ККД вентилятора та покращенню аеродинамічних характеристик повітропроводів. Для зменшення шуму, що потрапляє в мережу повітропроводів, можливе облицювання вентиляторів звукоізоляційними матеріалами або розміщення вентилятора в спеціальному звукоізолювальному кожусі.

Вентиляторний агрегат – це тип пристрою, у якому вентилятори з електродвигуном змонтовані на одній рамі, і вони зазвичай оснащені віброізоляторами. Вентиляторні агрегати включають дахові та канальні вентилятори.

Канальні вентилятори встановлюються безпосередньо в вентиляційну мережу круглого чи прямокутного перерізу. Канальні вентилятори невеликі, тому їх можна вбудовувати в канальні системи вентиляції та кондиціонування повітря або ховати за підшивною стелею чи в спеціальних вертикальних технологічних шафах. Під час встановлення вентилятора можна поставити в горизонтальне, вертикальне або похиле положення. Канальний вентилятор має велику перевагу через те, що він компактний при високих витратах повітря.

Витяжні вентилятори або дахові вентилятори, встановлювані на покрівлях для витяжних систем вентиляції. Такі агрегати використовують осьові вентилятори, зазвичай багатолопатеві, або радіальні вентилятори однобічного або двобічного всмоктування.

Дахові вентилятори легко монтуються на покрівлі будинків завдяки своїй простій і легкій конструкції. Заощадження площі будинку можна досягти за допомогою установки дахових вентиляторів на покрівлі будинку.

Припливні вентиляційні установки, витяжні установки, припливно-витяжні установки та повітряно-теплові завіси – це категорії вентиляційних установок за призначенням, складом і конструктивним виконанням. У холодний період року припливні установки фільтрують свіже повітря, нагрівають його, а потім подають у систему повітропроводів для подальшого розподілу в приміщеннях.

Припливні вентиляційні установки складаються з корпусу, у якому змонтовані наступні компоненти [18]:

- звукоізоляційний матеріал;
- система автоматики;
- водяний електричний калорифер;
- вентилятор;
- фільтр.

Припливні установки можна умовно класифікувати за різними критеріями, включаючи тип нагрівника (електричний або водяний калорифер),

витрату повітря (від 4 м^3/год до 200 – 3000 м^3/год) і конструкцію (універсальні, вертикальні або горизонтальні).

У системах вентиляції з припливними установками можуть використовуватися такі додаткові компоненти [15]:

- повітрозабірні решітки;
- шумоглушники;
- клапан на припливне повітря, який може працювати з електроприводом чи ручним приводом;
- пристрої для регулювання витрат повітря в приміщеннях;
- пристрої розподілу повітря, такі як дифузори, ґратки та плафони.

Визначення конкретної моделі припливної вентиляційної установки визначається зазвичай величиною подачі (витрат) і напору. Це дозволяє подолати опір мережі повітропроводів і повітророзподільних пристроїв. Витяжні установки балансують кількість повітря, що надходить і виходить з приміщення. Види витяжних установок включають автономні осьові вентилятори, дахові вентилятори, відцентрові вентилятори, канальні вентилятори в коробках у формі кола або коробки.

Системи приливно-витяжної вентиляції ефективні з економічної точки зору, оскільки вони утилізують тепло та значно зменшують витрати на опалення. Рекуператори – це спеціальні теплообмінники, які використовують тепло, видалене з приміщення повітря, для підігрівання припливного повітря. У системах вентиляції та кондиціонування повітря використовується велика кількість повітропроводів і конструкційних компонентів, виготовлених з різних матеріалів [16].

Повітропроводи та фасонні частини можуть мати круглу або прямокутну форму. Повітропроводи поділяються на металеві, металопластикові та неметалеві залежно від матеріалу, з якого вони виготовлені. Повітропроводи поділяються на прямошовні та спіральні за формою. Крім того, повітропроводи поділяються за способом з’єднання на фланцеві, безфланцеві та зварні. Крім

перерахованих модифікацій повітропроводи також можуть бути звукопоглинальними, теплоізольованими, напівгнучкими та гнучкими.

Для багатоповерхових громадських і адміністративних будинків повітропроводи проектуються з горизонтальними колекторами, які поєднують поверхові повітропроводи. Не може бути більше п’яти поверхів.

На даний час широке застоування мають повітряні завіси, які призначені для розділення зон із різною температурою по різні боки просторів. Високошвидкісний повітряний поток утворює так звану завісу, що перешкоджає витоку теплого потоку назовні. Це дозволяє підтримувати внутрішню температуру, запобігати протягам, знизити тепловтрати. При цьому, при закритих воротах або дверях повітряна завіса може працювати як тепловентилятор і її продуктивність може автоматично зменшуватись, а при відкритті отворів (дверей) продуктивність теплової завіси автоматично виходить на робочий режим роботи. У той же час, в районах із теплим кліматом повітряна завіса забезпечує значне зниження витрат на кондиціонування приміщень, у тому числі на підтримку низької температури в холодильних камерах.

Повітряні завіси можуть використовуватися [14, 15]:

- в постійно відкритих отворах, зовнішніх стінах приміщення, воріт і прийомів, які не мають тамбурів, при розрахунковій температурі зовнішнього повітря не нижче 15 градусів Цельсія;
- в вестибюлях, зовнішніх дверях і адміністративно-побутових будинках;
- у зовнішніх дверях будинків, якщо до вестибюля примикають приміщення з кондиціонуванням повітря;
- у зовнішніх дверях приміщень із підвищеною вологістю;
- у прорізах, внутрішніх стінах і перегородках виробничих приміщень, щоб запобігти переміщенню повітря з одного приміщення в інше;
- у воротах, дверях і прорізах приміщень із кондиціонуванням повітря.

Додатковим позитивним ефектом від використання завіси є ізоляція приміщень від вихлопних газів і пилу. І при цьому повітряний бар'єр є повністю прозорим і не створює перешкод для транспортних засобів. У більш дорогих конструкціях використовують повітряний фільтр. Як правило, повітряні завіси встановлюють у приміщенні над входом або над входом і з боків. Але при наявності великих отворів, наприклад воріт локомотивних депо, встановлюють поруч кілька завіс, створюючи суцільну повітряну завісу.

Теплові завіси розподіляють таким чином:

- за довжиною завісою (від 0,6 м до 2,5 м);
- за продуктивністю (від сотень до тисяч $м^3$/год);
- за потужністю обігріву (від одиниць до десятків кВт);
- за типом використовуваного підігрівника (з електрокалорифером, із водяним калорифером).

1.3 Вимоги до вентиляторних установок

В загальному сенсі вимоги до вентиляторних установок зручно розділити за певними ознаками в окремі групи (рис. 1.11).

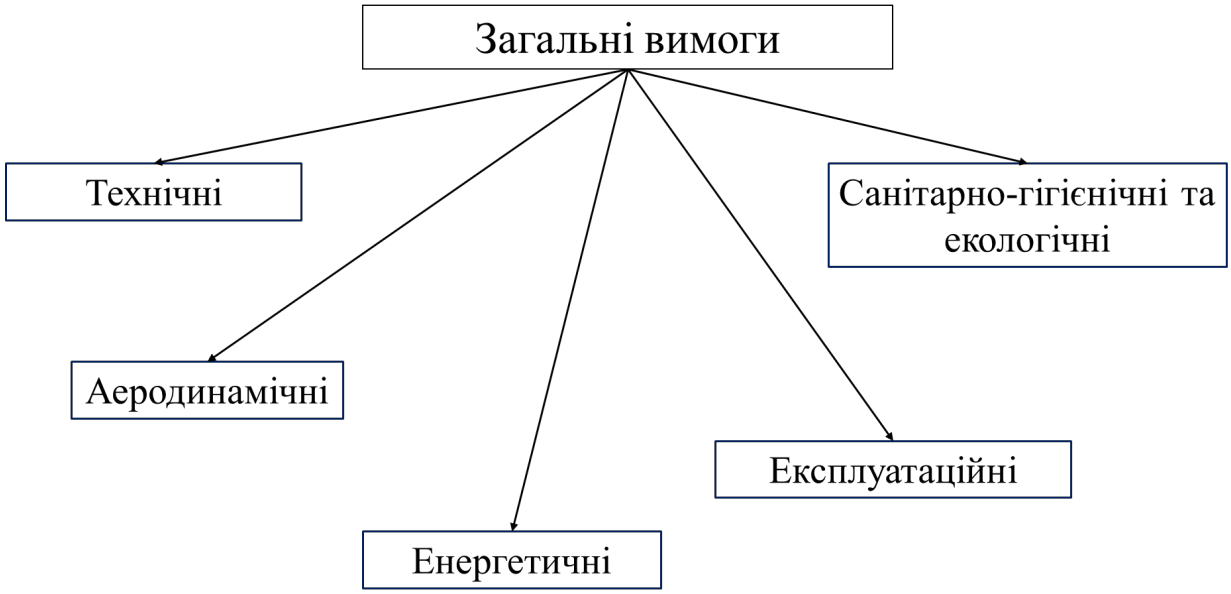


Рисунок 1.11 – Загальні вимоги до вентиляторних установок

До технічних вимог відносять:

- надійність і довговічність;
- механічна міцність;
- температурна стійкість;
- корозійна стійкість.

Надійність і довговічність означає, що вентиляторні установки повинні стабільно працювати впродовж усього розрахункового терміну експлуатації з мінімальними витратами на обслуговування. Визначення цих параметрів відбувається ще на етапі проектування об’єктів, але в процесі експлуатації може проводитися модернізація установок під час регламентних робіт дозволяє подовжити їх довговічність.

Механічна міцність також визначається на етапі проєктування. Усі конструктивні елементи повинні витримувати статичні та динамічні навантаження, вібрацію та гідродинамічні сили. У порівнянні з роботою аналогічних за конструкцією рідинних насосів, у вентиляторних установок відсутня кавітація. Проте в процесі експлуатації вентиляторні установки можуть стикатися з такими труднощами, як взаємодія елементів установок з твердими частинками. Мова йде не лише про обертову частину вентилятора, а і всю систему, включаючи арматуру. Для прикладу наведемо конкретний приклад, коли в локомотивному депо Придніпровської залізниці на ділянці технічного обслуговування необхідно було з сушілної камери транспортувати пісок в спеціальні бункери для подальшого засипання піску у відповідні ємності локомотивів. Лопаті вентиляторів беспосередньо з піском не контактували, проте перегонні труби у певних місцях (місцях згину) регулярно виходили з ладу. Навіть враховуючи, що труби були товстостінними, проте такі технічні проблеми виникали достатньо часто. Після удосконалення конструкції вдалося цю проблему вирішити. Також слід враховувати, що і безпосередньо лопаті вентиляторів і корпус можуть бути під впливом дії твердих часток. Особливо це чутливо для лопатей, оскільки може впливати на центровку вентилятора і викликати вібрації.

Температурна стійкість: обладнання повинно забезпечувати ефективну роботу в заданому діапазоні температур (як внутрішнього, так і зовнішнього повітря).

Іншою технічною потребою є забезпечення корозійної стійкості, особливо для систем, що працюють у вологих або агресивних середовищах.

Аеродинамічні вимоги включають такі параметри [5]:

- продуктивніть та тиск повітря;
- стабільність характеристик;
- рівень турбулентності.

Необхідна продуктивність повинна забезпечуватися установкою при заданому статичному та повному тиску.

При цьому вентилятор повинен працювати із стабільними характеристиками, без зриву потоку або коливань продуктивності.

Рівень турбулентності має бути мінімізований для зменшення шуму та підвищення ефективності повітропроводів.

Енергетичні вимоги [5]:

- високий ККД;
- можливість регулювання;
- сумісність з системами рекуперації.

Це означає, що конструкція вентилятора та двигуна повинна бути енергоефективною з мінімальними втратами потужності. Має бути можливість регулювання, тобто установка повинна допускати зміну продуктивності (частотне або ступінчасте регулювання) з метою зменшення енерговитрат при змінному навантаженні.

Для зниження енергоспоживання повинна передбачатися можливість інтеграції з системами рекуперації, наприклад, теплообмінниками чи рекуператорами.

Експлуатаційні вимоги передбачають такі пункти:

- простота обслуговування;
- модульність конструкції;

- автоматизація.

Простота обслуговування означає забезпечення легкості доступу до основних вузлів для огляду, очищення та заміна фільтрів або лопаток вентилятора.

За можливості конструкція вентиляторних установок має бути модульною, тобто установка має складатись із окремих блоків, що полегшує ремонт або модернізацію.

Також системи керування мають забезпечувати моніторинг, сигналізацію відмов, регулювання параметрів потоку залежно від умов у приміщенні.

Санітарно-гігієнічні та екологічні вимоги можуть містити:

- шумові характеристики;
- чистота повітря;
- екологічна безпека.

Рівень шуму не повинен перевищувати нормативних значень згідно з ДСТУ/ISO або СНиП. Установки вимагають звукоізоляції або шумоглушників.

Фільтраційні елементи мають ефективно очищувати повітря від пилу, шкідливих домішок та мікроорганізмів. Також при експлуатації не повинно утворюватися шкідливих викидів; при утилізації – мінімізований вплив на навколишнє середовище.

Відповідність нормам енергоефективності має відповідати діючим стандартами (наприклад, ERP, EN 12599, EN 308).

У той же час зазначимо, що вимоги до вентиляторних установок істотно залежать від галузі застосування. У промисловості домінують критерії надійності та витривалості; у житловому секторі – комфорт і екологічність; у спеціалізованих зонах – фокус на безпеку, фільтрацію і контроль параметрів повітря. Відповідність цим вимогам є запорукою ефективності вентиляційної системи, її безпеки та довговічності.

Так, для промислових об’єктів специфічні вимоги до вентиляторних установок, зокрема, на підприємствах, де вентиляція виконує не лише санітарну, а й технологічну функцію (видалення тепла, вологи, пилу, парів,

шкідливих газів), вимоги є такими: вентиляційна установка повинна забезпечувати великі витрати повітря при високому тиску; необхідне використання антикорозійних матеріалів, жаростійких або кислотостійких елементів; відповідність категоріям вибухонебезпечності (наприклад, ATEX, IECEx); можливість безперервної роботи в екстремальних умовах (висока температура, пил, волога), інтеграція з технологічною автоматикою – керування вентилятором у складі SCADA/PLC-систем, контроль рівня токсичних газів або тиску.

Для житлових та громадських будівель, де головним завданням вентиляції є створення комфортного та безпечного мікроклімату для людей, важливі такі параметри [20]:

- низький рівень шуму (≤ 35…40 дБ) для житлових зон, що вимагає шумоізоляції та використання шумоглушників;
- високий клас енергоефективності для мінімізація споживання енергії;
- вбудовані фільтри очищення повітря (пилові, вугільні або HEPA-фільтри для забезпечення якості повітря);
- автоматичне регулювання продуктивності (за показниками CO_2, вологості, присутності людей (на базі датчиків));

- естетичне виконання та компактність (особливо в квартирних і офісних системах (стельові, настінні варіанти)).

Для clean-room-зон (медичні заклади, фармацевтика, електроніка) критично важлива:

- глибока фільтрація повітря (застосування HEPA/ULPA-фільтрів, класів H13–U17);
- герметичність корпусів вентилятора для запобігання вторинному забрудненню або втратам тиску;
- контроль турбулентності потоку. Згідно стандарту ISO 14644 необхідно забезпечувати ламінарний рух повітря;
- низькі вібрації і відсутність частинок викиду необхідне для безпечного використання в зонах стерильного виробництва;

- можливість роботи у надлишковому або вакуумному тиску (залежно від класу чистоти).

Для вибухонебезпечних об’єктів та пожежонебезпечних зон, де є ризик займання газів, пилу або парів:

- вентилятори у вибухозахищеному виконанні з маркуванням Ex, згідно з директивою ATEX або іншими національними нормами;
- іскробезпечна конструкція, де корпус і робочі елементи виготовляються з матеріалів, що не утворюють іскор (наприклад, бронза, алюміній);
- температурна класифікація, де враховується Т-клас середовища (наприклад, Т3 або Т4);
- обов’язкова сертифікація вентиляційного обладнання щодо відповідності вимогам пожежної та техногенної безпеки.

2 ОЦІНКА ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ВЕНТИЛЯЦІЙНИХ СИСТЕМ

2.1 Основні енергетичні показники вентиляційних систем

Енергетична ефективність вентиляційної системи є одним із ключових критеріїв її техніко-економічної доцільності, особливо в умовах підвищених вимог до енергоощадності в будівлях та технологічних установках. Оцінка ефективності вентиляції базується на низці кількісних показників, які відображають як безпосередні витрати енергії, так і ступінь її раціонального використання. У цьому підрозділі розглянуто основні енергетичні показники, які характеризують роботу вентиляційних систем та можуть бути використані для порівняльного аналізу, аудиту, модернізації або проєктування нових систем.

Питомі енерговитрати вентиляційної системи.

Одним з базових показників є питома витрата електричної енергії на переміщення одиниці об’єму повітря [11]:

$$w = W/V$$

де:

w – питома витрата енергії, кВт·год/м³

W – загальна спожита енергія вентиляційною установкою за певний період, кВт·год

V – об’єм переміщеного повітря за той самий період, м³.

Цей параметр дозволяє оцінити ефективність системи незалежно від її масштабу та продуктивності. Чим менше значення w, тим більш енергоефективною є система.

Коефіцієнт корисної дії (ККД) вентилятора.

Як відомо, ККД вентилятора є ключовим технічним показником, що характеризує співвідношення корисної роботи з переміщення повітря до спожитої електричної енергії:

$$\eta = P_1/P_2$$

де:

η – ККД вентилятора;

P_1 – потужність, що витрачається на переміщення повітря (гідравлічна потужність);

P_2 – спожита електрична потужність електродвигуна.

Високий ККД вказує на менші втрати енергії у вигляді тепла, шуму або вібрації, а також на більшу ефективність перетворення енергії.

Показник SFP (Specific Fan Power).

Один із найважливіших сучасних індикаторів енергоефективності вентиляційних установок – SFP (питома потужність вентилятора), що визначає, скільки електроенергії потрібно для переміщення одиниці об'єму повітря [13]:

$$SFP = P_{ел}/q_v, \text{ Вт/(л·с) або кВт/(м}^3\text{/с)}$$

де:

$P_{ел}$ – споживана електрична потужність, Вт

q_v – витрата повітря, м³/с.

Низьке значення *SFP* означає, що система працює енергоефективно. У практиці енергоаудиту цей показник часто використовується для порівняння різних вентиляційних систем або обґрунтування доцільності їх модернізації.

Рівень рекуперації тепла.

У припливно-витяжних системах, обладнаних рекуператорами, важливим показником є коефіцієнт рекуперації тепла, що визначається як:

$$\eta_{\text{рек}} = \frac{t_{\text{вих}} - t_{\text{зовн}}}{t_{\text{вит}} - t_{\text{зовн}}} \times 100\%$$

де:

$\eta_{\text{рек}}$ – ефективність рекуперації тепла, %;

$t_{\text{вих}}$ – температура повітря після теплообмінника;

$t_{\text{зовн}}$ – температура зовнішнього повітря;

$t_{\text{вит}}$ – температура витяжного повітря.

Цей коефіцієнт показує, яку частку теплової енергії вдалося повернути у припливне повітря завдяки рекуперації. Ефективність сучасних рекуператорів може сягати 75…90 %.

Енергетичний клас вентиляційного обладнання.

Згідно з директивами ЄС та стандартами (наприклад, ErP), вентиляційне обладнання класифікується за енергетичними класами (A–G або A+++–D), що враховують не лише споживання енергії, а й рівень шуму, ККД та наявність систем керування. Високий клас енергоефективності свідчить про мінімальні втрати електроенергії при збереженні заданих функціональних параметрів.

Інтегральна енергоефективність системи.

Для оцінки ефективності всієї системи вентиляції доцільно використовувати інтегральні енергетичні показники, які охоплюють:

- сумарне споживання електроенергії всіма компонентами системи (вентилятор, автоматика, приводи заслінок, обігрів, охолодження);
- енергетичний ефект від рекуперації;
- втрати у повітропроводах (гідравлічні, теплові).

Загальна оцінка інтегральної ефективності дозволяє зробити висновки щодо оптимальності конструкції системи вентиляції та визначити точки можливого вдосконалення.

Згідно з [12] вентилятори споживають близько 10 % від усієї згенерованої в Україні енергії. У тому ж джерелі [12] зазначається, що ККД більшості вентиляторних установок, наприклад, шахт значно нижчий від норми (0,6, а іноді 0,3 – 0,4). Лише двадцять два відсотка вентиляторів працюють в зоні економічного використання. Фактично питома витрата потужності перевищує норму в 1,5 – 2 рази, а приводи головних вентиляторів витрачають четверту частину загальної електроенергії за один рік.

Це пов’язано з тим, що більшість вентиляторів використовується поза зоною економічної роботи. У результаті режим роботи вентиляторів не відповідає параметрам вентиляційних мереж, таким як: обладнання вентиляторів з нерегульованим приводом; невідповідність фактичних значень еквівалентних отворів вентиляційних напрямків шахт їх проєктним значенням; і зона обвалювання та надшахтні споруди [12].

У процесі розроблення шахтного поля змінний аеродинамічний опір мережі є причиною низьких енергетичних показників вентиляторів. Через кілька років роботи вентилятор досягає свого максимального тиску та подачі. Отже, вентилятор працює в режимі, відмінному від розрахункового. Це пов’язано з тим, що реальні параметри вентиляції, такі як кількість метану, довжина і переріз виробок, витоки повітря тощо, значно відрізняються від розрахункових, що призводить до того, що реальний режим роботи вентилятора значно відрізняється від розрахункового. Це включає зміни природної тяги, які залежать від температури повітря на поверхні протягом року.

Експериментально було виявлено, що на деяких шахтах коливання опору мережі між лютим і вереснем становлять 20 мм вод. ст. за зміни витрати повітря понад 12 %. Природна тяга має значні коливання протягом усього року, а іноді й протягом доби.

Методи зменшення споживання електроенергії вентиляторами включають адаптацію режиму роботи вентилятора до характеристик вентиляційної мережі; підвищення ККД вентиляційної мережі; підвищення

експлуатаційної ККД вентиляторних установок; і контроль продуктивності вентиляторних установок.

Робоча точка вентилятора – це точка, де напірна характеристика вентилятора стикається з характеристикою вентиляційної мережі. Вона повинна знаходитися на стійкій частині характеристики вентилятора і якнайближче до точки максимального к. к. д. вентилятора. Якщо вентилятор працює неефективно, можна перенести робочу точку в зону економічної роботи, змінивши робочі параметри вентилятора та змінивши характеристики вентиляційної мережі. При уточненні параметрів вентиляційної системи необхідно регулярно визначати робочу точку вентилятора.

Зменшення підсмоктувань (витоків) повітря через надшахтні споруди та канали вентиляторів, а також зниження опору вентиляційної мережі призводить до підвищення ККД вентиляційної мережі.

Для оцінки стану змінюваної шахтної вентиляційної мережі необхідні депресивні зйомки вентиляційних мереж. Ці зйомки дають загальну картину розподілу загальношахтної депресії та виділяють місця значного збільшення аеродинамічних опорів.

Потужність двигуна вентиляторної установки визначаємо за формулою [16]:

$$P = \frac{H \cdot Q \cdot 10^{-3}}{\eta_B \cdot \eta_{ДВ}},$$

де:

Q – подача, м3/с;

H – опір мережі, м;

η_B – к. к. д. вентилятора;

$\eta_{ДВ}$ – к. к. д. електричного двигуна.

Удосконалення експлуатаційного ККД вентиляторних установок досягається за допомогою таких факторів, як перевернуте колесо осьового

вентилятора, дотримання стандартних зазорів робочого колеса, наявності обтічника перед входом робочого колеса осьового вентилятора, дотримання стандартних параметрів дифузора на виході осьового вентилятора, точної установки лопаток напрямного апарата та експлуатаційних змін параметрів робочого колеса слабозавантажених двоступеневих осьових вентиляторів.

Таким чном, основні енергетичні показники вентиляційних систем дозволяють комплексно оцінити ефективність використання енергії в процесі вентиляції. Ретельний аналіз таких параметрів, як питома енерговитрата, ККД вентилятора, *SFP*, ефективність рекуперації та клас енергоефективності, дає змогу обґрунтовано підходити до вибору, модернізації або проєктування вентиляційних установок із мінімальним рівнем енергоспоживання.

2.2 Режими роботи вентиляційних систем

Режим роботи вентиляційної системи визначає спосіб її функціонування у часі, залежно від призначення приміщення, виробничого навантаження, метеоумов та специфіки процесів, що відбуваються у зоні обслуговування. Правильний вибір та організація режимів роботи вентиляції мають безпосередній вплив на енергоспоживання, ефективність повітрообміну, комфорт у приміщенні та загальну екологічну безпеку. Залежно від потреб користувача та системи керування, вентиляційні системи можуть працювати у статичних, динамічних, регульованих або автоматизованих режимах.

Часові режими роботи вентиляційних систем представлено на рисунку 2.1.

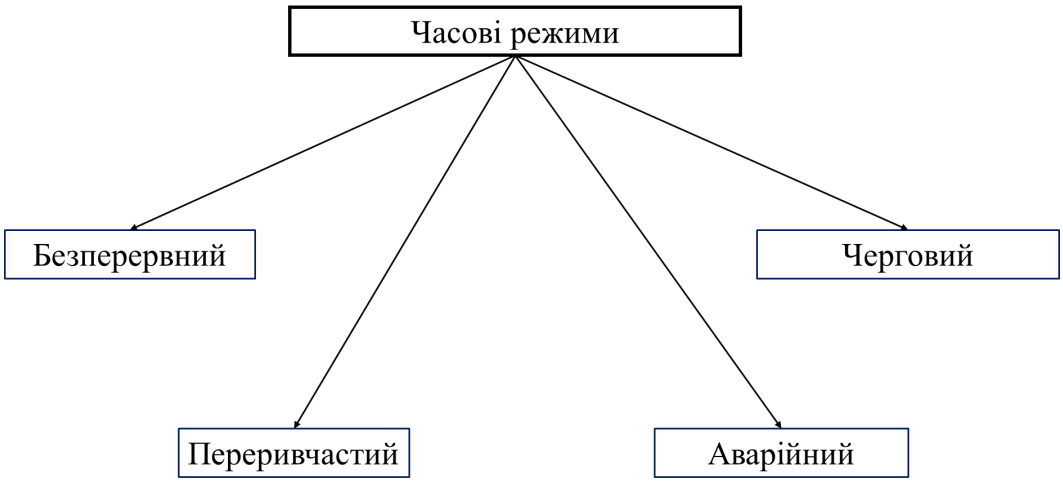


Рисунок 2.1 – Часові режими роботи вентиляційних систем

Розглянемо ці часові режими більш детально.

Безперервний режим роботи є найбільш поширеним режимом у промислових, медичних, комерційних та інфраструктурних об’єктах. Вентиляційна система працює цілодобово або у фіксовані тривалі періоди без зупинки. Основна мета – постійне підтримання допустимого рівня температури, вологості, чистоти повітря або вмісту шкідливих речовин. Такий режим характерний для:

- лікарень, лабораторій, фармацевтичного виробництва;
- харчової промисловості;
- серверних кімнат;
- житлових та офісних будівель з централізованою вентиляцією.

Перевагою такого режиму є стабільність параметрів мікроклімату, а недоліками – високе енергоспоживання, потреба в надійній автоматиці для аварійних режимів.

Переривчастий режим (інтервальний). У такому режимі система вмикається тільки у визначені проміжки часу або за командою зовнішнього контролера. Це може бути пов'язано з графіком роботи об’єкта або наявністю людей у приміщенні.

Такий режим часто використовується у:

- навчальних закладах;

- спортивних залах;
- виробничих зонах з змінним навантаженням;
- адміністративних будівлях.

Переваги даного режиму:

- зниження споживання енергії;
- довший термін служби обладнання.

Недоліки:

- інерційність запуску;
- ризик порушення мікроклімату при неправильному налаштуванні.

У аварійному режимі система активується або переходить в особливий стан у разі надзвичайної ситуації: пожежа, витік газу, перевищення вмісту шкідливих речовин. Вентиляція або інтенсивно видаляє повітря з приміщення, або ізолює зону, запобігаючи поширенню забруднень. Системи працюють у зв’язці з датчиками диму, CO_2, CO, температури.

Черговий режим – це скорочений або економний режим, коли система підтримує лише мінімально необхідний повітрообмін. Застосовується вночі або у неробочий час, щоб запобігти повній зупинці вентиляції (наприклад, для уникнення накопичення вологи, затхлості чи грибку).

Класифікація режимів роботи вентиляційних систем за типом керування наведено на рисунку 2.2.

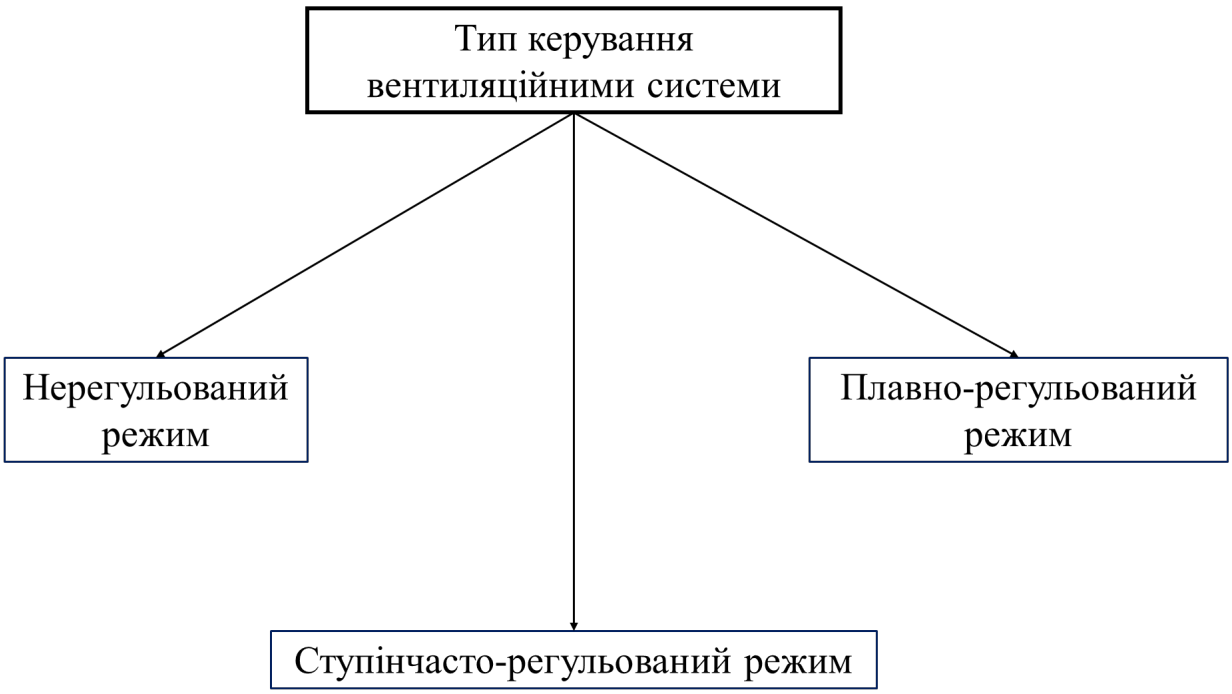


Рисунок 2.2 – Типи керування вентиляційними системами

Нерегульований режим.

Вентиляційна система працює з постійною продуктивністю незалежно від реальних потреб. Характерно для застарілих або найпростіших систем. Вентилятори мають фіксовану швидкість, заслінки статичні, немає зворотного зв’язку від датчиків.

Недоліки:

- перевитрати енергії при зниженому навантаженні;
- погіршення комфорту у приміщенні;
- вища зношуваність.

Ступінчасто-регульований режим.

Реалізується шляхом перемикання між заздалегідь заданими рівнями продуктивності (наприклад, триступінчасті вентилятори). Користувач або автоматика вибирає режим залежно від умов (день/ніч, присутність людей тощо).

Плавно-регульований режим.

Найбільш енергоефективний. Використовуються частотні перетворювачі, які змінюють швидкість обертання вентилятора залежно від потреби. Регулювання базується на сигналах з:

- датчиків температури;
- датчиків вологості;
- датчиків CO_2;
- таймерів або сценаріїв управління (BMS/Smart Home).

Переваги:

- точне підтримання мікроклімату;
- мінімізація споживання енергії;
- збільшення ресурсу обладнання.

Режим роботи вентиляційної системи є критичним чинником її енергетичної ефективності. Дослідження показують, що системи з плавним регулюванням швидкості можуть зменшити споживання електроенергії до 30…50 % порівняно з нерегульованими. Використання датчиків присутності та автоматичного управління дозволяє додатково скоротити витрати енергії у режимах часткового навантаження.

Водночас, неправильно обраний режим роботи може призвести до перевитрат енергії, небалансу повітрообміну, зниження ККД рекуператорів, а в окремих випадках – до збоїв технологічного процесу або погіршення умов праці.

Одним із найбільш відповідальних і найбільш енергоємних агрегатів шахти є вентиляційні системи головного провітрювання. Багато факторів впливають на різні режими роботи вентилятора. У зв’язку з тим, що показники витрати та депресії змінюються на достатню величину, необхідно створити можливо більш широкий діапазон економічних режимів.

Коли ви обираєте найкращий спосіб і діапазон регулювання швидкості електропривода, ви повинні враховувати наступне: сезонні коливання тиску та температури впливають на продуктивність на 10 – 15 %; під час експлуатації шахти продуктивність може зрости в 1,5 – 2 рази; зміна добового ритму

гірничих робіт (підривні роботи наприкінці змін) може підвищити продуктивність на 15–20 %; і в святкові та ремонтні дні продуктивність може зрости на 30 [17].

Для регулювання аеродинаміки можна використовувати дроселювання, поворот лопаток напрямного апарата, поворот лопаток робочого колеса або поворот закрилок для осьових вентиляторів.

Через те, що він не економний, перший метод не використовується. Напрямний апарат є найпоширенішим типом регулювання. Але за такого підходу економічне регулювання мало. Крім того, відбуваються пульсації потоку та надмірна вібрація. Оскільки крива економічної роботи більш полога (похила), найбільш ефективним є застосування цього методу за підтримки постійної продуктивності.

Третій метод є більш економічним, але через складність і невпевненість конструкції його застосовують мало. Регулювання зміни швидкості обертання робочого колеса є найбільш перспективним. Закони пропорційності, також відомі як закони експлуатації турбомашин, складаються таким чином: коли змінюється частота обертання робочого колеса турбомашини за постійні характеристики зовнішньої мережі, подача змінюється пропорційно першому ступеню, напір змінюється пропорційно квадрату, а споживана потужність змінюється пропорційно кубу частоти обертання:

$$Q_1 = Q \cdot \frac{n_1}{n},$$

$$H_1 = H \cdot \left(\frac{n_1}{n} \right)^2,$$

$$P_1 = P \cdot \left(\frac{n_1}{n} \right)^3,$$

$$H_1 = H \cdot \left(\frac{Q_1}{Q} \right)^2,$$

$$P_1 = P \cdot \left(\frac{Q_1}{Q} \right)^3.$$

Останні два рівняння, квадратичні та кубічні параболи, є геометричними місцями точок, координати яких визначають подібні режими турбомашини за зміною частоти обертання.

Графіки потужності під час регулювання відцентрового вентилятора напрямним апаратом і зміною швидкості наведені на рисунку 2.3 [13].

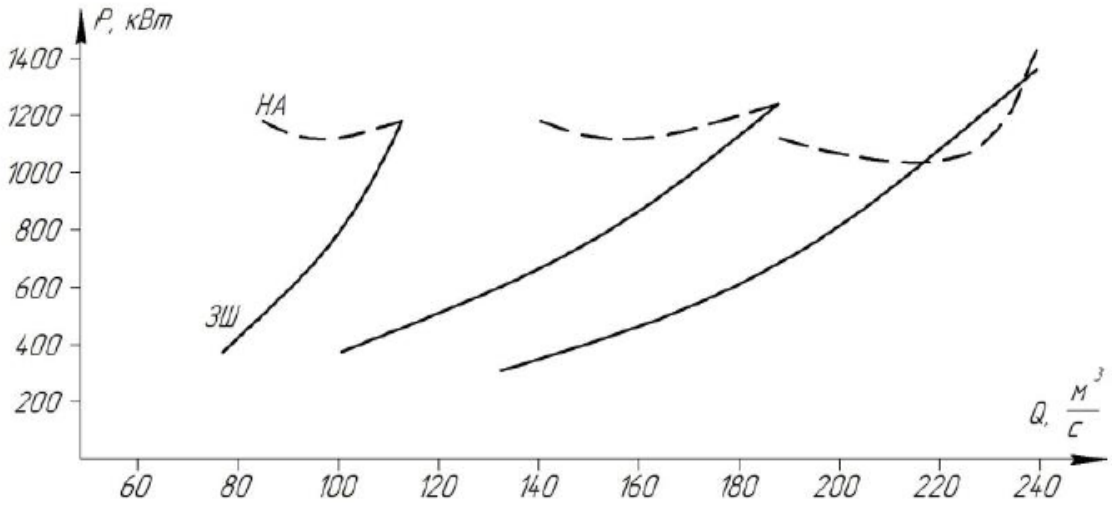


Рисунок 2.3 – Залежність потужності відцентрового вентилятора від регулювання напрямним апаратом і зміни швидкості [13]:
НА – напрямний апарат; ЗШ – зміна швидкості

Аналіз характеристик показує, що економічність обох методів однакова за невеликої глибини регулювання в області малих і середніх витрат. Однак ефективність регулювання значно збільшується зі збільшенням глибини зміни витрат. Рисунок 3.3 показує області економічної роботи відцентрових і осьових вентиляторів залежно від способу регулювання.

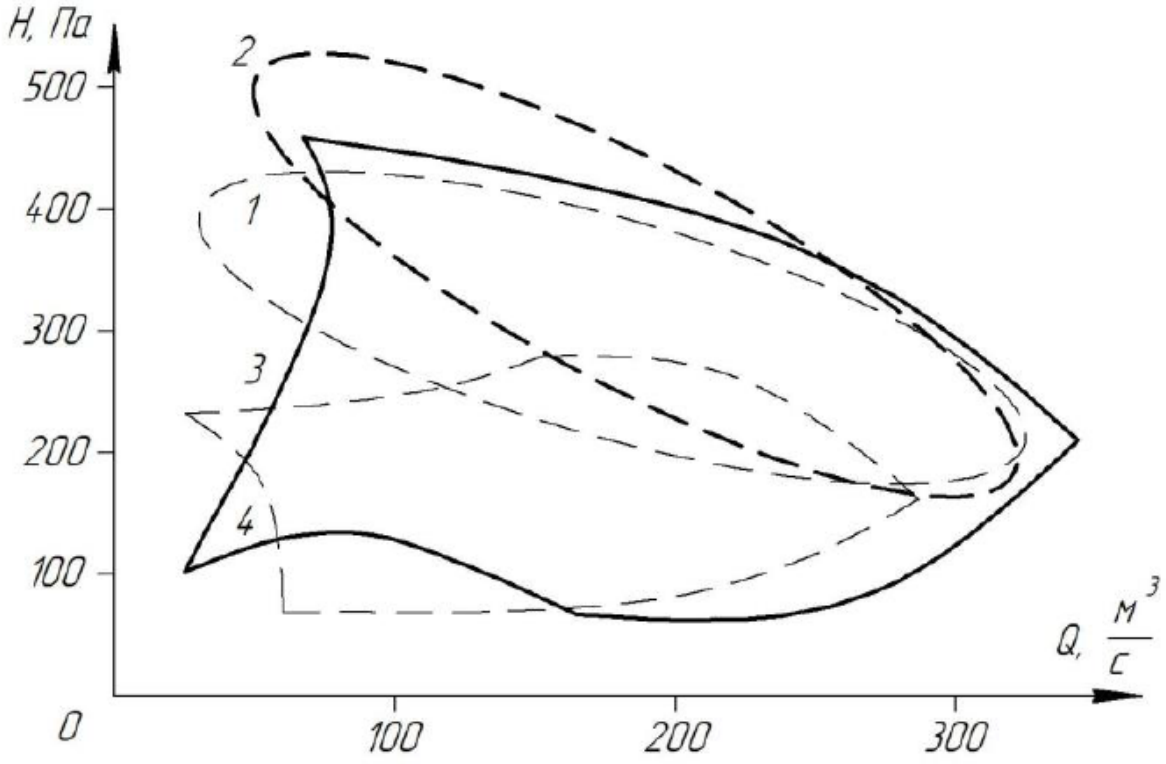


Рисунок 2.3 – Зони ефективності роботи відцентрових і осьових вентиляторів: 1 – ВЦД-3,5 і 2 – ВЦД-32 – регулювання напрямним апаратом; 3 – ВЦД-30 – регулювання напрямним апаратом і поворот лопаток колеса; 4 – ВЦД-32 – регулювання швидкості обертання за допомогою регульованого електропривода

Як показав аналіз кривих, зміна швидкості обертання є найбільш економічним способом регулювання подачі вентиляторів головного провітрювання, тоді як дросельне регулювання є найменш економічним. Як показали розрахунки, регульований привод може значно скоротити витрату електроенергії до 40%. Багато грошей заощаджується в неробочі дні, коли подача вентилятора може бути зменшена до п’ятдесяти відсотків граничного значення. Розширення зони економічної роботи збільшує ймовірність забезпечення економічності проєктованої установки чи підвищення ККД діючої установки.

Рисунок 2.4 показує криві, які показують ефективність регулювання вентиляторних установок різними способами.

Переваги методу регулювання частоти обертання включають:

1) низьку вартість роботи;
2) постійний ККД вентилятора під час регулювання з постійним отвором;
3) проста конструкція вентилятора, оскільки немає поворотних і прямих пристроїв;
4) збільшення зони економічної роботи та споживання енергії.

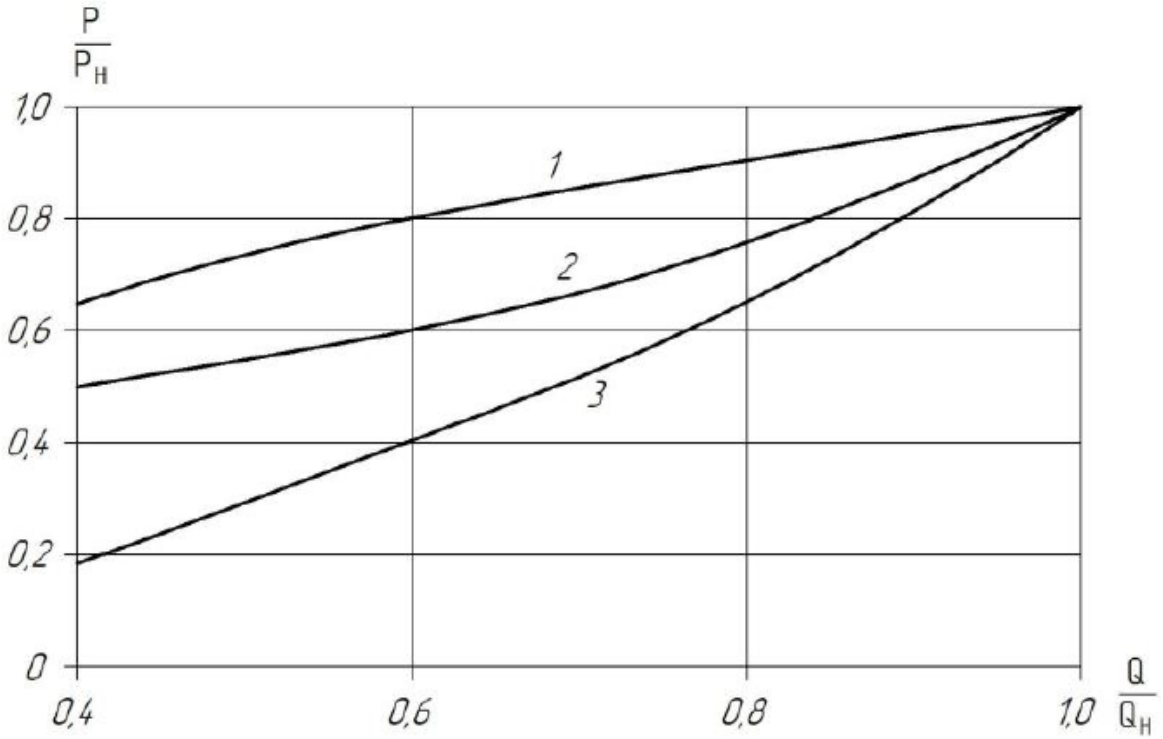


Рисунок 2.4 – Способи регулювання вентиляторних установок [15]:
1 – дросельне регулювання; 2 – регулювання напрямним апаратом;
3 – регулювання муфтами ковзання

Регулювання швидкості обертання відбувається під час обертання двигуна. Це дозволяє перевести вентилятор на потрібний режим роботи. Схеми автоматизації та автоматичного регулювання провітрювання найкраще поєднуються з регульованим електроприводом. Порівняно з розрахунковою

продуктивністю вентиляційних установок існує практична можливість їх тривалої роботи з меншою ефективністю.

Зменшення впливу газового фактору на технологічний процес видобування дозволяє використовувати регульований електропривод, що означає, що об’єкт може працювати ефективніше з меншою кількістю устаткування та меншими витратами. Це також означає, що вентилятори працюють більш економічно, що призводить до зменшення кількості типорозмірів вентиляторів, підвищення серійності та зниження вартості вентиляторів, а також до збільшення терміну служби вентилятора.

Отже, режими роботи вентиляційних систем формують основу їх енергоспоживання, надійності та функціональності. Оптимальний вибір режиму, з урахуванням специфіки об’єкта, дозволяє забезпечити належну якість повітря при мінімальних енерговитратах. У сучасних умовах ключовим трендом є впровадження інтелектуальних систем управління вентиляцією, що забезпечують адаптивну роботу з урахуванням реального навантаження і змін зовнішніх умов.

2.3 Методи оцінки енергетичної ефективності вентиляційних систем

Оцінка енергетичної ефективності вентиляційних систем є важливою складовою як проєктування, так і експлуатаційного контролю інженерних мереж будівлі. У сучасних умовах зростаючих цін на енергоносії, необхідності декарбонізації промисловості та запровадження стандартів енергоефективності (наприклад, ISO 50001, ErP), обґрунтоване та точне визначення фактичного рівня енергоспоживання вентиляцій є ключовим завданням енергоменеджменту.

Залежно від цілей аналізу, доступності вимірювального обладнання, умов експлуатації та глибини дослідження, можуть застосовуватися три основні методи оцінки енергоефективності вентиляційних систем: прямий, непрямий та

інструментальний. Кожен із них має свої переваги, обмеження та сфери застосування.

Прямий метод оцінки.

Прямий метод базується на вимірюванні обсягу спожитої електроенергії вентиляційною установкою протягом певного періоду часу, з подальшим співвіднесенням цієї енергії до об'єму переміщеного повітря. Метод дає змогу оперативно оцінити питому енерговитрату (наприклад, у кВт·год/м³), не вдаючись до глибокого аналізу аеродинамічних характеристик або технічних параметрів системи.

Переваги прямого методу:

1) простота реалізації;
2) доступність: не потребує складного обладнання, достатньо лише лічильника електроенергії та витратоміра;
3) можливість швидкого порівняння декількох установок або режимів роботи.

Недоліки:

1) не враховує теплові процеси (наприклад, рекуперацію);
2) не дозволяє оцінити втрати у вентиляційних каналах;
3) дає усереднене уявлення про ефективність, без деталізації причин втрат.

Даний метод є сенс застосовувати у таких випадках:

- початковий енергоаудит;
- контроль енергоспоживання за місяць/рік;
- порівняння фактичних даних із паспортними.

Непрямий метод оцінки.

Непрямий метод ґрунтується на розрахунковому аналізі параметрів вентиляційної системи: типу обладнання, аеродинамічних характеристик, довжини повітропроводів, втрат тиску, ККД вентилятора, типу керування тощо. Метод дозволяє оцінити енергоефективність ще на стадії проєктування або при технічному аудиті, без потреби у натурних вимірюваннях.

Переваги непрямого методу:

1) можливість оцінки ще до встановлення обладнання;
2) підходить для варіантного аналізу (порівняння різних схем або типів вентиляторів);
3) дає змогу моделювати зміни системи (наприклад, встановлення частотного регулятора).

Недоліки:

1) грунтується на паспортних або довідкових даних, які можуть не відповідати реальним умовам;
2) не враховує забруднення фільтрів, зношення обладнання або похибки монтажу;
3) може потребувати складних розрахунків із використанням спеціалізованих програм (наприклад, Duct Designer, MagiCAD, Revit MEP).

Застосування:

- проєктування вентиляційних систем;
- техніко-економічне обґрунтування модернізації;
- підготовка енергетичних паспортів та звітів.

Інструментальний метод оцінки.

Цей метод є найбільш точним і комплексним. Він базується на фактичному вимірюванні параметрів роботи вентиляційної системи у режимі реального часу за допомогою спеціалізованого обладнання: анемометрів, манометрів, диференційних датчиків тиску, вимірювачів електричних параметрів (струм, напруга, потужність), логерів даних тощо.

Переваги інструментального методу:

1) висока точність і достовірність результатів;
2) можливість комплексної діагностики (аеродинаміка, електроспоживання, шум, вібрації);
3) дає змогу виявити приховані проблеми: розбалансування повітропотоку, надмірні втрати тиску, зниження ККД вентилятора.

Недоліки:

1) необхідність наявності дорогого вимірювального обладнання;
2) потреба у кваліфікованих фахівцях для проведення вимірювань та інтерпретації результатів;
3) трудомісткість та тривалість процедур, особливо при оцінці великої системи.

Застосування:

- детальний енергоаудит;
- верифікація розрахункових моделей;
- підготовка звітів для сертифікації за стандартами енергоефективності;
- виявлення «вузьких місць» у роботі системи.

Порівняння методів оцінки наведено у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Порівняння методів оцінки енергетичної ефективності вентиляційних систем

Критерій	Прямий метод	Непрямий метод	Інструментальний метод
Точність	Середня	Умовна	Висока
Потреба у вимірювальному обладнанні	Мінімальна	Відсутня	Висока
Залежність від умов експлуатації	Висока	Низька	Мінімальна
Застосування на стадії проєкту	Обмежене	Так	Ні
Вартість реалізації	Низька	Низька	Висока
Здатність виявляти дефекти	Низька	Низька	Висока

Різні методи оцінки енергетичної ефективності вентиляційних систем мають свою специфіку та застосовуються залежно від цілей дослідження. Прямий метод є швидким і доступним, непрямий – зручним на етапі проєктування, а інструментальний – найточнішим та найбільш інформативним для детального аналізу в умовах реальної експлуатації. У сучасній практиці оптимальним є комбінований підхід, при якому розрахункові дані перевіряються та коригуються на основі інструментальних вимірювань.

Комбінований підхід у практиці енергоаудиту

На практиці часто застосовується поєднання прямих, непрямих і інструментальних методів для досягнення максимальної об'єктивності результатів. Наприклад, на першому етапі виконується непрямий розрахунок на основі проєктної документації (вибір устаткування, довжина повітроводів, попередній розрахунок втрат тиску). Далі проводиться пряме вимірювання загального енергоспоживання за допомогою лічильника, а після цього – інструментальне обстеження з використанням анемометрів, манометрів, термодатчиків для оцінки реального стану системи.

Такий підхід дозволяє:

- виявити розбіжності між проєктними і фактичними параметрами;
- уточнити коефіцієнт втрат на фільтрах або заслінках;
- оцінити ефективність системи керування;
- надати обґрунтовані рекомендації щодо модернізації.

Інтеграція з цифровими системами моніторингу.

У сучасних вентиляційних системах усе ширше застосовуються автоматизовані системи енергетичного моніторингу (EMS), які дозволяють у реальному часі збирати дані про:

- споживання електроенергії;
- об’єм поданого повітря;
- температуру, вологість, вміст CO_2;
- сигнали тривоги про перевищення допустимих меж.

Ці дані можуть автоматично оброблятися, що дозволяє будувати динамічні графіки ефективності, виявляти пікові навантаження, аналізувати добові й сезонні коливання у споживанні енергії. Таким чином, інструментальний метод переходить на новий рівень – цифрового енергоаудиту.

Приклад використання трьох методів на одному об’єкті.

У типовій ситуації на промисловому об’єкті застосування трьох методів може виглядати так:

1) Непрямий метод, коли аналіз проєктної документації показав, що витрата повітря – 10000 м³/год, електродвигун – 5,5 кВт, рекуператор – 75%.
2) Прямий метод, за допомогою лічильника зафіксовано 330 кВт·год за добу – питома витрата становить 0,033 кВт·год/м³.
3) Інструментальний метод, вимірювання показали падіння тиску через засмічений фільтр, підвищення споживання до 6,2 кВт – ККД фактично знизився на 12% порівняно з проєктним. Це дозволило виявити неочевидне джерело втрат енергії та запланувати заміщення фільтрів + оновлення автоматики, що, в свою чергу, дало змогу знизити щоденне споживання на 15 %.

Методи оцінки енергоефективності вентиляційних систем не є взаємовиключними – правильно скомбіновані, вони забезпечують повноцінне бачення ситуації: від розрахункових допущень до фактичного стану об'єкта. Зокрема, у сучасній практиці рекомендується інтегрувати інструментальні вимірювання з цифровим моніторингом та моделюванням на основі нормативної документації.

Порівняння методів оцінки енергоефективності вентиляційних систем наведено на рисунку 2.5.

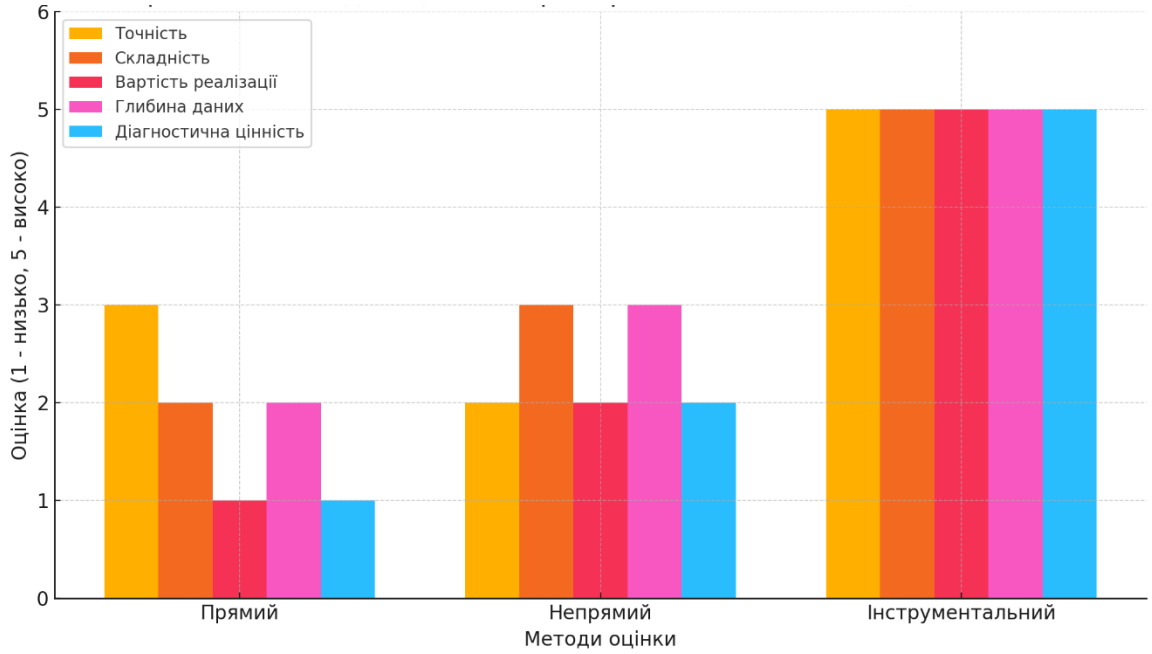


Рисунок 2.5 – Порівняння методів оцінки енергоефективності вентиляційних систем

Як видно з графіку (рис. 2.5), який порівнює три основні методи оцінки енергоефективності вентиляційних систем за ключовими критеріями:

- інструментальний метод є найбільш точним;
- складність реалізації – зростає від прямого до інструментального;
- вартість реалізації: мінімальна для прямого методу, найвища – для інструментального;
- глибина отриманих даних: найбільшу аналітичну глибину дає інструментальний підхід;
- діагностична цінність: лише інструментальний метод дозволяє виявити приховані проблеми.

Розглянемо порівняння методів оцінки енергоефективності вентиляційної системи на прикладі адміністративної будівлі.

Вихідні дані об’єкта:

- триповерхова адміністративна будівля загальною площею 4200 м²;
- встановлена припливно-витяжна система з рекуператором;
- сумарна проектна витрата повітря – 16000 м³/год;

- вентиляційна установка працює 12 год/день, 5 днів на тиждень.

Метод 1: Прямий.

Було встановлено окремий лічильник електроенергії на вентиляційну установку. За тиждень споживання склало 690 кВт·год.

Тоді

$$w_{\text{пит}} = 690 / (16\,000 \cdot 5 \cdot 12/1000) = 0{,}72 \text{ кВт год}/1000 \text{ м}^3$$

Отже, проста оцінка підтвердила перевищення очікуваного енергоспоживання на 18 % порівняно з паспортними даними.

Метод 2: Непрямий.

На основі проекту та специфікації були виконані розрахунки:

- ККД вентилятора – 65 %;
- сумарні втрати тиску – 850 Па;
- середня витрата повітря – 4,4 м³/с;

Розрахунок потужності вентилятора:

$$P = \frac{q \cdot \Delta p}{\eta \cdot 3600}$$

$$\text{P} = \frac{4{,}4 \cdot 850}{0{,}65 \cdot 3600} \approx 1{,}65$$

Прогнозне споживання за тиждень складає 1,6 · 12 · 5 = 96 кВт·год, тобто значно нижче від виміряного. Отже, наявна значна розбіжність між розрахунком і фактом, що вказує на приховані втрати або неефективність.

Метод 3: Інструментальний.

Проведені вимірювання:

- витрата повітря – 3,8 м³/с (на 14% менше за розрахункову);
- тиск до і після фільтра – перепад 280 Па (фільтр засмічений);
- споживана потужність вентилятора – 2,1 кВт;
- коливання напруги на двигуні ±15 В – ймовірна проблема з частотним перетворювачем.

Отже, реальна продуктивність занижена, фільтри потребують заміни, а налаштування ПЧ – коригування. Споживання можна зменшити щонайменше на 25 %.

Загальний підсумок розглянутого кейсу на ведено у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Порівняльний аналіз якісних характеристик методів оцінки енергоефективності вентиляційних систем

Метод	Висновки	Рекомендації
Прямий	Завищене споживання	Перевірити фактичний стан установки
Непрямий	Теоретично низьке споживання	Не відповідає реальності
Інструментальний	Виявлені реальні проблеми	Замінити фільтри, налаштувати автоматику

3 ПОКРАЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ЯКОСТЕЙ ВЕНТИЛЯЦІЙНИХ УСТАНОВОК

3.1 Автоматизація вентиляційних систем

Автоматизоване керування вентиляційними системами (СКВ – система керування вентиляцією) забезпечує раціональне використання енергетичних ресурсів, стабільність параметрів мікроклімату та підвищення надійності роботи обладнання. У сучасних умовах, коли енергоефективність стала ключовим критерієм експлуатації інженерних систем, автоматизація вентиляції набуває особливої ваги [18].

Головна мета автоматизованого керування полягає в тому, щоб:

- забезпечити потрібний рівень повітрообміну згідно з динамічними змінами навантаження (наприклад, зміна кількості людей у приміщенні, зміна вмісту CO_2, вологи, температури тощо);
- мінімізувати споживання енергії, забезпечуючи роботу системи лише за потребою;
- запобігати порушенням нормативних вимог до мікроклімату, гігієни та безпеки;
- забезпечити безперебійну роботу вентиляційних установок та діагностувати можливі відмови;
- інтегрувати систему вентиляції в загальну систему автоматизації будівлі (BMS – Building Management System) для координації з іншими інженерними мережами.

Принцип зворотного зв’язку. Основним принципом автоматизованого керування є регулювання за зворотним зв’язком, коли датчики в режимі реального часу передають значення контрольованих параметрів (температура, вологість, CO_2, тиск), а система приймає рішення про зміну режиму роботи. Це дозволяє адаптувати продуктивність вентиляції до поточних потреб [20].

Принцип пропорційності та адаптивності. Системи керування, особливо з використанням частотних перетворювачів, працюють за пропорційно-інтегрально-диференційними алгоритмами (PID-регулювання). Це забезпечує плавне, точне регулювання витрати повітря без перевищення чи інерційності. У сучасних системах також застосовуються адаптивні алгоритми, що самостійно підлаштовуються до змін у навантаженні.

Принцип модульності та ієрархії. Автоматизовані системи вентиляції зазвичай мають ієрархічну структуру: локальні контролери керують окремими вузлами (вентилятори, заслінки, нагрівачі), а центральний контролер або BMS координує роботу всієї системи. Такий підхід забезпечує гнучкість, масштабованість і швидке реагування на локальні зміни.

Принцип зонального керування. Особливо актуально для будівель із багатьма приміщеннями різного призначення. Суть полягає в тому, що кожна зона має власний набір датчиків і регуляторів, які автономно визначають необхідну інтенсивність вентиляції. Наприклад, у залі з великою кількістю людей витрата повітря буде більшою, ніж у малому кабінеті без відвідувачів.

Принцип енергетичної доцільності. Автоматизоване керування передбачає мінімізацію енерговитрат без шкоди для мікроклімату. Це досягається через:

- регулювання обертів вентилятора;
- автоматичне відключення вентиляції у відсутності людей;
- динамічне керування температурою припливного повітря на основі зовнішніх умов;
- використання режимів нічного охолодження або чергового вентилювання.

Принцип інтеграції з іншими системами будівлі. СКВ може бути пов’язана з системами освітлення, опалення, кондиціювання, охорони. Наприклад, під час відкриття вікон система припиняє приплив, або при виявленні пожежі активує димовидалення. Така інтеграція підвищує як енергоефективність, так і загальну безпеку об’єкта.

У сучасних вентиляційних системах використовуються різні рівні автоматизації, які відрізняються між собою за масштабом дії, ступенем інтеграції, можливістю керування та обробки інформації. Вибір типу автоматики залежить від розміру об’єкта, кількості контрольованих зон, специфіки експлуатації, а також вимог до енергоефективності, комфорту та безпеки.

Умовно можна виділити три основні рівні автоматизації вентиляційних установок: локальна, зональна та централізована (BMS – Building Management System). Кожен із них має свої переваги, обмеження та сфери застосування.

Локальна автоматика – це найпростіша форма керування, яка охоплює одну установку або окремий вузол вентиляційної системи. Вона не взаємодіє з іншими частинами будівлі та функціонує автономно. Зазвичай це вбудовані контролери у вентиляційних агрегатах, які керують [17]:

- вмиканням/вимиканням вентилятора;
- температурою припливного повітря;
- роботою електричного або водяного нагрівача;
- таймером або графіком увімкнення.

У деяких випадках локальна автоматика може використовувати прості сенсори (CO_2, температури, вологості) для запуску або зміни режиму роботи.

Переваги локальної автоматики:

1) низька вартість впровадження;
2) простота налаштування та експлуатації;
3) незалежність від зовнішніх систем.

Недоліки:

1) відсутність можливості централізованого моніторингу;
2) неоптимальна координація з іншими зонами або системами (наприклад, опаленням);
3) обмежені можливості для глибокої енергооптимізації.

Сфера можливого застосування:

- невеликі офіси або житлові приміщення;

- індивідуальні припливно-витяжні установки;
- тимчасові об'єкти або окремі кімнати.

Зональна автоматика охоплює групу приміщень або частину будівлі, які мають спільну вентиляційну установку, але різні експлуатаційні умови. У кожній зоні встановлюється власний набір сенсорів (CO_2, вологість, присутність), а центральний контролер приймає рішення щодо регулювання повітропотоку, температури або часу роботи для кожної зони окремо.

Зазвичай зональне керування реалізується за допомогою:

- VAV-клапанів (variable air volume) з індивідуальним приводом;
- моторизованих заслінок;
- локальних термостатів або сенсорних панелей;
- цифрових контролерів з мережевим інтерфейсом (Modbus, BACnet).

Переваги зональної автоматики:

1) гнучкість у керуванні різними зонами без потреби дублювати всю систему;
2) підвищення комфорту за рахунок точнішого мікроклімату;
3) зниження енергоспоживання завдяки режиму "вентиляція за потребою" у кожній зоні.

Недоліки:

1) складність у налаштуванні й балансуванні системи;
2) підвищена вартість обладнання та монтажу порівняно з локальним керуванням.

Сфера можливого застосування:

- багатозональні офісні приміщення;
- торгові центри;
- навчальні заклади;
- виробничі зони з поділом на цехи/ділянки.

BMS (Building Management System) – це інтегрована система управління інженерною інфраструктурою будівлі, у яку входить вентиляція, кондиціонування, опалення, освітлення, безпека, енергомоніторинг тощо. У

такій системі вентиляційні установки є частиною єдиного цифрового середовища, де обмін інформацією між підсистемами дозволяє досягти максимальної енергоефективності та автоматизації управлінських рішень.

Функції BMS щодо вентиляції можуть включати [19]:

- комплексне керування всіма вентиляційними установками будівлі;
- оптимізацію вентиляції відповідно до графіків використання приміщень;
- динамічне керування у зв’язку з погодними умовами (наприклад, нічне провітрювання влітку);
- координацію з системами опалення та охолодження для уникнення конфліктів (наприклад, одночасного обігріву й охолодження);
- формування звітів про споживання енергії та стан обладнання.

Переваги BMS:

1) найвищий рівень контролю та енергоефективності;
2) централізований моніторинг, аварійне реагування, діагностика;
3) можливість інтеграції аналітики та штучного інтелекту (AI-базовані алгоритми оптимізації).

Недоліки:

1) висока початкова вартість впровадження;
2) потреба у висококваліфікованому обслуговуванні;
3) залежність від цілісності мережевої інфраструктури.

Сфера можливого застосування:

- великі комерційні, бізнес- та логістичні центри;
- лікарні, аеропорти, готелі;
- енергоефективні та «розумні» будівлі (smart buildings);
- об'єкти, що проходять сертифікацію за LEED, BREEAM, DGNB тощо.

Кожен тип автоматики – локальна, зональна чи центральна мають своє місце в системі вентиляції залежно від масштабу об’єкта, технічних завдань і бюджету. Найпростіші системи забезпечують базове керування, тоді як зональна і центральна автоматика відкривають можливості для

інтелектуального, адаптивного і енергозберігаючого управління, особливо в умовах змінного навантаження. Найбільш ефективною є інтеграція вентиляційних установок у загальну систему BMS, що дозволяє приймати рішення на основі аналізу даних у реальному часі та взаємодії між усіма інженерними системами будівлі.

Сучасні системи автоматизованого керування вентиляцією базуються на принципі регулювання за поточним станом повітряного середовища. Основним джерелом інформації для прийняття керуючих рішень є сигнали від датчиків, які вимірюють фізичні параметри повітря у приміщенні. Завдяки цим пристроям система може адаптувати режим роботи до реальних потреб, зменшуючи надлишкову вентиляцію та оптимізуючи споживання енергії.

Серед найбільш важливих параметрів, що контролюються в системах вентиляції, виділяють: датчики вмісту вуглекислого газу (CO_2), датчики температури, датчики вологості, датчики присутності.

Датчики вмісту вуглекислого газу (CO_2). Призначення: визначають концентрацію вуглекислого газу в повітрі як індикатор якості вентиляції та присутності людей.

У стандартних умовах комфортним рівнем є менше або дорівнює 1000 ppm. Перевищення 1200 – 1500 ppm сигналізує про недостатню вентиляцію. Часто використовуються в офісах, класах, конференц-залах. Найпоширенішими є NDIR-датчики (нерозсіювальна інфрачервона спектроскопія), які забезпечують високу точність та довговічність.

До їх переваг відносять:

1) пряме виявлення «потреби» у вентиляції;
2) дає змогу реалізувати «вентиляцію за запитом» (Demand Controlled Ventilation, DCV);
3) зменшує споживання енергії у непікові періоди.

Датчики температури мають призначення – відстеження поточної температури повітря для:

- забезпечення комфортного мікроклімату;

- регулювання роботи підігрівачів або охолоджувачів у вентиляційних установках;
- оптимізації теплової взаємодії між вентиляцією та системами опалення/кондиціювання.

Серед типів можна виділити такі:

- контактні (терморезистори, термопари) – для каналів і технічних вузлів;
- безконтактні (ІЧ-датчики) – у зонах комфорту;
- інтелектуальні датчики – з можливістю калібрування, самодіагностики та інтеграції в цифрові мережі (BACnet, Modbus).

При застосуванні температура є ключовим параметром у системах рекуперації тепла, де точність контролю впливає на ефективність енергозбереження.

Призначенням датчиків вологості є контроль відносної вологості повітря у приміщеннях. Надмірна вологість може спричинити:

- утворення конденсату у вентиляційних каналах;
- розвиток грибків і бактерій;
- дискомфорт користувачів.

Оптимальні значення вологості:

а) для житлових і офісних приміщень – 40…60 %;

б) у зимовий період допускається зниження до 30…40 %.

Ємнісні датчики вологості найбільш поширеніші в системах HVAC, характеризуються високою точністю та швидкою реакцією на зміни умов.

У комплексних системах вологості використовується сумісне керування вентиляцією і зволожувачами/осушувачами, що дозволяє уникнути надмірної вентиляції при досягненні комфортного рівня.

Датчики присутності призначені для виявлення наявності або руху людей у приміщенні і дозволяють вмикати/вимикати вентиляцію або змінювати її інтенсивність.

Типи датчиків:

- ІЧ-пасивні (PIR) реагують на зміну теплового випромінювання;
- ультразвукові/мікрохвильові виявляють рух за зміною частот;
- оптичні або комбіновані слугують для більш точного контролю.

Застосування таких дотчиків:

- офіси, аудиторії, готельні номери, санвузли, конференц-зали;
- дозволяють зменшити споживання енергії вночі, на вихідних або при відсутності персоналу.

Переваги:

1) миттєве реагування;
2) простота інтеграції;
3) висока енергетична ефективність у поєднанні з таймерами.

Системна взаємодія датчиків. У сучасних вентиляційних установках часто використовується комбінація декількох типів датчиків, що дозволяє враховувати не лише факт присутності людей, а й реальні параметри повітряного середовища. Наприклад:

1) CO_2 + присутність дозволяє швидко виявити навантаження і визначити необхідний повітрообмін;
2) температура + вологість застосовується для керування рекуператором і уникнення точки роси;
3) CO_2 + температура + графік часу слугує для реалізації гнучких алгоритмів енергозбереження.

Ці інтегровані підходи реалізуються за допомогою цифрових контролерів, які обробляють сигнали з датчиків і формують керуючі впливи на вентилятори, заслінки, нагрівачі тощо.

Використання датчиків у системах автоматизації вентиляції дозволяє забезпечити адаптивне, ефективне і гнучке керування мікрокліматом. Завдяки постійному моніторингу ключових параметрів CO_2, температури, вологості, присутності — система може динамічно регулювати продуктивність вентиляції, мінімізуючи енергетичні витрати без шкоди для комфорту та безпеки. Саме такі

рішення лежать в основі концепції «розумного вентилювання», що є сучасним стандартом енергоефективності.

Вентиляційні системи споживають значну частину електроенергії будівлі, особливо при безперервній роботі на повну потужність. Автоматичне перемикання режимів дозволяє оптимізувати роботу системи відповідно до часу доби, навантаження, присутності людей та зовнішніх кліматичних умов, що є надзвичайно ефективним з точки зору енергозбереження.

Цей підхід базується на ідеї, що необов’язково постійно подавати максимальний об’єм повітря, а достатньо адаптувати продуктивність системи до актуальної потреби. Це дозволяє: знизити енергоспоживання на 20…60 %, зменшити зношування обладнання, підтримувати стабільний мікроклімат, скоротити експлуатаційні витрати.

Основні режими вентиляції наведені на рисунку 3.1.

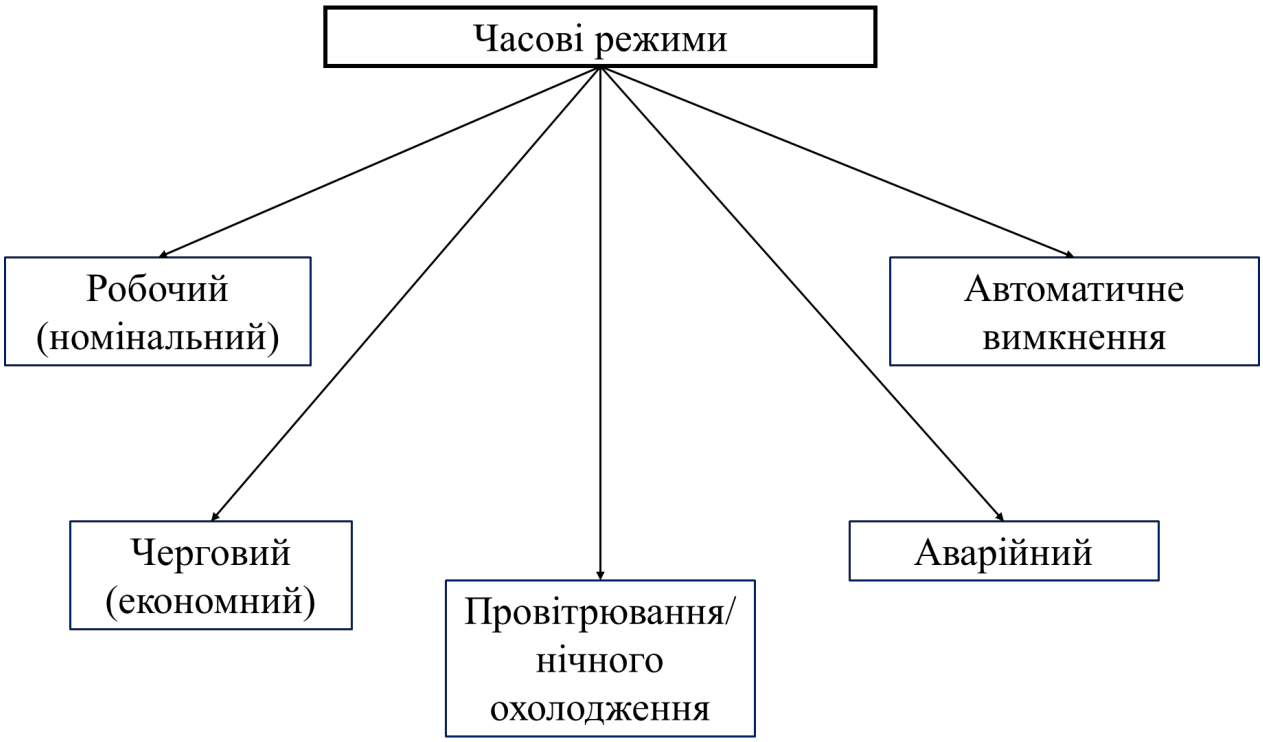


Рисунок 3.1 – Основні режими роботи вентиляції

Робочий режим (номінальний) активується у періоди максимальної зайнятості або при перевищенні порогових значень CO_2/температури. Встановлюється максимальна або близька до неї витрата повітря, що відповідає нормативам.

Черговий (економний) режим використовується вночі, на вихідних, у періоди тимчасової відсутності персоналу. Цей режим мінімізує повітрообмін до базового рівня, необхідного для запобігання застою повітря або вологонакопичення.

Автоматичне вимкнення вентиляції застосовується у приміщеннях з непостійним навантаженням (наприклад, переговорні, зали очікування), коли після певного періоду відсутності людей система повністю зупиняється.

Режим провітрювання/нічного охолодження працює у період міжсезоння або влітку використовується для охолодження будівлі вночі за рахунок прохолодного зовнішнього повітря без включення систем кондиціювання.

Аварійний режим активується за сигналами з пожежної системи, датчиків диму або газу, передбачає посилене видалення повітря або відключення вентиляторів для запобігання поширенню диму.

Автоматичне перемикання реалізується за допомогою:

- таймерів (годинникові програми, тижневі графіки);
- сигналів від датчиків (CO_2, температура, присутність, вологість);
- інтеграції з системою контролю доступу (BMS виявляє присутність за картками/сенсорами);
- аналітики попередніх циклів роботи (у розумних системах).

У найефективніших варіантах перемикання режимів координується з:

- освітленням (вентиляція активна, поки працює освітлення);
- опаленням та охолодженням (щоб уникнути одночасної подачі теплого повітря та роботи кондиціонера);
- автоматикою відкриття вікон (при провітрюванні вручну система припиняє подачу повітря).

На етапі тестування систем автоматизації всі підсистеми та компоненти, від яких залежить безаварійне ведення технологічного процесу, мають бути повністю включені. Тут основна функція людини, яка настроює, полягає в тому, щоб переконатися, що технологічне устаткування працює правильно і що засіб автоматизації не вийде з звичайного режиму роботи, коли він вмикається. Щоб увімкнути систему автоматизації, необхідно встановити корпуси всіх приладів і інших засобів автоматизації; забезпечити живлення розподільних пристроїв системи автоматизації за постійною схемою; перевірити, чи місця установки приладів, щитів і пультів відповідають умовам довкілля, таким як температура, вологість і склад; встановити запобіжники; виробити установку автоматичних вимикачів і налаштувати додаткові запобіжники.

Запуск систем автоматизації починається з підключення всіх первинних і вторинних приладів. Відповідно до правил, викладених в інструкціях по монтажу та експлуатації, пристрої та первинні прилади вимірюються. При цьому органи можуть контролювати нульові показники, якщо це потрібно. Перед запуском приладів для безпосереднього вимірювання необхідно переконатися, що параметри реального середовища (температура, тиск, вологість тощо) відповідають проектним. Після цього перевіряються різні функції систем автоматизації. У цьому випадку оператори технологічного устаткування або технології працюють над зміною технологічних режимів. Якщо система виходить з будинку під час пуску або випробування, несправності усувають і елементи знову перевіряють перед повторним включенням.

3.2 Використання частотних перетворювачів

Одним з найбільш ефективних способів зниження енергоспоживання вентиляційних систем є використання частотних перетворювачів (ЧП), або частотно-регульованих приводів (VFD – Variable Frequency Drive). Вони забезпечують плавне регулювання обертів електродвигуна вентилятора

залежно від поточних потреб у повітрообміні. Це дає змогу не лише оптимізувати енерговитрати, але й покращити комфорт, надійність та керованість системи.

Частотний перетворювач змінює частоту та амплітуду змінного струму, що подається на електродвигун вентилятора. Оскільки швидкість обертання двигуна прямо пропорційна частоті живлення, це дозволяє:

- зменшити або збільшити подачу повітря без зміни конфігурації системи;
- уникнути пускових струмів при запуску вентилятора;
- забезпечити гнучке керування у відповідь на сигнали з датчиків (CO_2, температура, тиск тощо).

Згідно з законом кубічної залежності для вентиляторів, зменшення швидкості обертання вентилятора на 20 % дозволяє знизити споживання електроенергії приблизно на 50 %. Це пояснюється тим, що

$$P \propto n^3$$

де:

P – споживана потужність,

n – частота обертання вентилятора.

Отже, навіть незначне зменшення обертів призводить до суттєвого зниження енерговитрат.

До переваг використання частотних перетворювачів у вентиляційних системах можна віднести такі:

1) значне енергозбереження за рахунок зниженого навантаження (ніч, міжсезоння, часткова заповненість приміщень), що дозволяє економити до 30…60 % економії енергії порівняно з нерегульованим приводом;

2) підвищення ресурсу обладнання дозволяє знизити знос підшипників і елементів вентилятора. М’який запуск та зупинка відбуваються без гідроударів, ривків, пікових навантажень;

3) покращення якості повітря та мікроклімату через точне дотримання заданих параметрів (температури, CO_2) через можливість плавного регулювання потоку повітря в реальному часі;

4) зниження рівня шуму. При зменшених обертах вентилятора знижується турбулентність і аеродинамічний шум;

5) інтеграція в системи автоматизації. VFD легко вбудовуються в BMS (Building Management System) або локальні контролери і можуть керуватися через цифрові протоколи (Modbus, BACnet).

Типові режими керування з використанням частотних перетворювачів включають [7]:

- постійне значення параметра (наприклад, підтримання тиску в повітропроводі);
- керування за датчиком CO_2 збільшення обертів при зростанні концентрації вуглекислого газу;
- температурне регулювання, тобто балансування роботи вентиляції в режимах охолодження або нагріву;
- графік часу, коли нічне зниження продуктивності або черговий режим.

У той же час, хоча частотні перетворювачі і дають істотний ефект, їх використання потребує:

а) точного налаштування алгоритмів регулювання (щоб уникнути коливань і нестабільності);

б) дотримання вимог електромагнітної сумісності (EMC);

в) захисту двигунів від перенапруг і перегріву;

г) термічної стабільності у разі зниження обертів (особливо для двигунів, що охолоджуються самостійно).

Таким чином, використання частотних перетворювачів у вентиляторних системах є одним із найефективніших методів підвищення енергетичних

якостей вентиляції. Завдяки можливості плавного регулювання продуктивності, VFD дозволяють не лише суттєво зменшити енергоспоживання, але й підвищити адаптивність та надійність системи в цілому. Це робить їх незамінним компонентом сучасної автоматизованої вентиляції, орієнтованої на сталий розвиток та енергоефективність.

Наявність частотного перетворювача створює технічну можливість змінювати швидкість обертання вентилятора. Проте, ефективність такої системи значною мірою визначається алгоритмом керування, який аналізує вхідні параметри (CO_2, тиск, температура, присутність) і приймає рішення про зміну частоти живлення електродвигуна. Раціонально обраний алгоритм дозволяє забезпечити стабільні параметри мікроклімату, мінімізувати енергоспоживання, уникнути нестабільності та затримок у реагуванні системи, продовжити строк служби обладнання за рахунок плавності переходів.

Типові алгоритми керування включають [21]:

1. Пропорційне керування (P).

В основі пропорційного керування є зміна частоти обертання вентилятора пропорційно відхиленню параметра від заданого значення. Наприклад, чим більше CO_2 у приміщенні, тим швидше працює вентилятор.

До переваг відносять простоту та швидке реагування.

До недоліків відносять можливі перерегулювання (перевищення параметра), нестабільність при малих відхиленнях.

2. Пропорційно-інтегральне керування (PI).

До пропорційної дії додається інтегральна складова, яка враховує накопичену помилку у часі. Система не тільки реагує на відхилення, але й поступово підлаштовується, щоб стабілізувати параметр. Це особливо важливо для керування температурою, де інерція велика.

3. PID-контроль (пропорційно-інтегрально-диференційне керування).

Найбільш точний алгоритм, який враховує не лише величину та тривалість відхилення, а й темп змін параметра. Застосовується у складних вентиляційних системах, де необхідна стабільна, точна та адаптивна реакція.

Недоліком є потреба в тонкому налаштуванні коефіцієнтів (P, I, D).

4. Керування за сценаріями (таймери, добові графіки).

Частота обертів змінюється відповідно до розкладу, наприклад, збільшується у робочі години, зменшується вночі і підходить для об’єктів із стабільним графіком (офіси, школи). Таке керування може комбінуватись із іншими методами (наприклад, Р-контроль у робочі години, нічне провітрювання за таймером).

5. Керування за кількома параметрами (мультикритеріальне).

Частотний привід регулюється на основі кількох сигналів одночасно, наприклад:

- CO_2 + температура;
- CO_2 + присутність;
- тиск у повітропроводі + вологість.

Система самостійно визначає пріоритет сигналів або використовує логіку нечітких множин (fuzzy logic). Найбільш гнучкий та «інтелектуальний» підхід.

Алгоритми з компенсацією змінних умов.

У практиці енергозбереження особливу увагу приділяють адаптивним алгоритмам, які враховують зовнішні температурні умови (наприклад, взимку вентиляція працює з нижчою продуктивністю через втрати тепла), зайнятість приміщень у режимі реального часу, історію змін параметрів для прогнозування навантаження. Такі системи мають навчальну здатність, тобто з часом самостійно коригують поведінку для досягнення максимального ефекту.

Отже, алгоритми керування у системах вентиляції з частотним приводом відіграють вирішальну роль у досягненні енергетичної оптимізації без втрати якості повітря. Від простого пропорційного регулювання до адаптивних сценаріїв із самонавчанням ефективність залежить від точності налаштувань, адекватності вибраного методу до умов об'єкта та якості сигналів від сенсорної мережі. Сучасні алгоритми відкривають шлях до впровадження інтелектуальної вентиляції нового покоління, що поєднує комфорт, енергоощадність і сталий розвиток.

3.3 Організаційно-експлуатаційні заходи з підвищення енергоефективності

Навіть найсучасніше вентиляційне обладнання втрачає ефективність у разі відсутності належного обслуговування. Зниження продуктивності, підвищення електроспоживання, нестабільна робота та порушення мікроклімату усе це є наслідками недостатнього технічного контролю. Регулярне обслуговування систем вентиляції є не лише умовою безперебійної роботи, а й одним із ключових організаційних інструментів енергозбереження.

Найбільш критичні зони втрат енергії відбуваються через недостатнє обслуговування фільтрів, несправних або неправильно відкаліброваних датчиків, порушення герметичності повітроводів, зношення елементів привіодів, недостатнє змащення рухомих елементів.

Розглянемо коротко ці питання. Засмічені фільтри приводять до зростання аеродинамічного опору, що підвищує навантаження на вентилятори. Несправні або неправильно відкалібровані датчики видають помилкові сигнали, а значить і до помилкового регулювання. Порушення герметичності повітроводів викликає втрати повітря та зниження тиску. Зношення ременевих передач, підшипників, двигунів призводить до перевитрати енергії, підвищення шуму, ризик аварій. Недостатнє змащення або зношення рухомих елементів збільшують тертя та енергоспоживання.

Типовий перелік регламентних робіт включає очищення або заміну фільтрів (повітряних, жирових, вугільних). Як правило, рекомендована періодичність регламентних робіт складає кожні 1…3 місяці. Досвід показує, що забруднені фільтри можуть збільшити споживання електроенергії на 20…30 %. Стан вентиляційного обладнання включає перевірку крильчатки вентилятора, корпусу, підшипників, двигуна. Перевіряють наявність сторонніх вібрацій, шумів, перекосів.

Стан електрообладнання передбачає перевірку цілісності кабелів, затягування клем, стан контактів. Діагностика частотних перетворювачів

мусить виявляти помилки, режими роботи та температури. Огляд та герметизація повітроводів: перевірка ущільнень, швів, стиків; усунення протікання та несанкціонованих витоків повітря. Калібрування та тестування датчиків: CO_2, температура, вологість, тиск; особливо важливо для систем з автоматичним регулюванням. Технічна діагностика рекуператорів: очищення теплообмінника; перевірка приводу ротора або байпасу; стан дренажних систем (для конденсату). Обслуговування вентиляційних систем повинно проводитись згідно з проектною документацією та паспортами обладнання, нормативами ДСТУ, ДБН, EN (наприклад, EN 12599, ISO 16890); вимогами виробника, особливо щодо частотних приводів і систем рекуперації.

У сучасній практиці управління енергоресурсами дедалі більше поширення отримують системи енергетичного моніторингу (Energy Monitoring Systems, EMS), які дозволяють відстежувати, аналізувати та оптимізувати споживання електроенергії вентиляційним обладнанням у режимі реального часу. Ці системи виступають основою для прийняття обґрунтованих рішень щодо покращення енергоефективності, а також є необхідною частиною комплексних підходів до енергоменеджменту згідно з вимогами ISO 50001.

Вимірювальні прилади включають електролічильники, витратоміри повітря, датчики тиску та температури. Комунікаційні шлюзи мають пристрої збору даних із передачі по протоколах Modbus, BACnet, KNX. Програмне забезпечення серед інших можуть включати платформи для візуалізації, зберігання та аналізу (наприклад, Siemens Desigo, Schneider EcoStruxure, Elmeasure). Інтерфейс користувача – веб-панелі або мобільні додатки з доступом до статистики.

Системи енергетичного моніторингу є невід’ємною складовою сучасного управління вентиляційними установками. Вони дозволяють не лише контролювати витрати енергії, а й активно впливати на ефективність роботи за рахунок гнучкого керування, раннього виявлення нераціонального використання ресурсів та аналітики динаміки споживання. Інтеграція EMS у

структуру вентиляційної системи є високоокупним організаційним заходом, який створює базу для сталого зниження енергетичних витрат.

Незважаючи на високий рівень автоматизації сучасних вентиляційних систем, ефективність їх експлуатації значною мірою залежить від кваліфікації та свідомості обслуговуючого персоналу. Неправильне втручання, несвоєчасне обслуговування, відсутність контролю або банальне нерозуміння принципів роботи системи можуть звести нанівець технічні зусилля з підвищення енергоефективності.

Професійна підготовка персоналу та формування відповідального ставлення до споживання енергії – це організаційно простий, але стратегічно ефективний інструмент зниження витрат.

Типові проблеми через низьку енергоосвіченість персоналу:

1) використання системи вентиляції в постійному максимальному режимі через страх «задухи» або просто незнання;
2) самостійне відключення автоматики у разі «збоїв», без аналізу причин;
3) ігнорування сигналів про засмічення фільтрів або несправність датчиків;
4) несвоєчасна заміна витратних елементів або порушення регламентів;
5) відсутність аналізу звітів із систем моніторингу (якщо такі є).

До ключових напрямків підвищення кваліфікації персоналу можна віднести навчання технічного персоналу, проведення інструктажів і майстер-класів, розробку інструкцій і настанов, формування енергоорієнтованої культури.

Навчання технічного персоналу може включати вивчення принципів роботи вентиляційних систем, налаштування й обслуговування частотних приводів, датчиків, рекуператорів; роботи з системами автоматизації та моніторингу.

Проведення інструктажів і майстер-класів: практичне вивчення алгоритмів перемикання режимів; типові помилки та способи їх уникнення; інтерпретація графіків енергоспоживання.

Розробка інструкцій і настанов серед інших може містити чек-листи обслуговування, візуальні інструкції для критичних ситуацій, рекомендації щодо реакцій на сигнали системи (помилки, перевищення, аварії).

Формування енергоорієнтованої культури також може містити різноманітні елементи, наприклад, введення KPI для енерговитрат на рівні обслуговуючого персоналу, заохочення ініціатив щодо зниження витрат, донесення важливості впливу щоденних рішень на загальний результат.

Серед практичних ефектів від навчання персоналу можуть бути зменшення кількості збоїв у роботі вентиляції, своєчасне виявлення проблем і профілактика аварій, раціональні рішення у позаштатних ситуаціях, реалізація простих заходів без інвестицій, наприклад, зменшення витрати повітря у неробочий час, ручне переключення режимів у разі поломки автоматики, перевірка роботи рекуператора.

Таким чином, підвищення кваліфікації обслуговуючого персоналу є базовим організаційним ресурсом для підвищення енергоефективності вентиляційних систем. Без залучення людського чинника навіть найдосконаліша автоматика буде працювати неефективно. Навчання, інформування та мотивація персоналу – це недорогі, але стратегічно важливі інвестиції, що забезпечують стабільну, надійну й економічну роботу вентиляційних установок.

Системне зниження енергоспоживання неможливе без точного вимірювання, реєстрації та аналізу фактичного використання енергії. Впровадження локальних або централізованих систем моніторингу енергоспоживання у вентиляційних установках дає змогу визначити реальні точки втрат енергії, оперативно виявляти відхилення від нормального режиму роботи, порівнювати ефективність різних періодів, режимів, технічних рішень, планувати та перевіряти ефективність впроваджених заходів.

Такі системи можуть інтегруватися у BMS або працювати автономно з передачею даних на ПК або хмарний сервер. Вони фіксують споживану електроенергію по кожному двигуну, тривалість роботи в певному режимі,

температуру, тиск, витрати повітря за годинами/добами; стан фільтрів, рекуператорів, автоматики.

Окрім постійного моніторингу, важливо проводити поглиблений періодичний аналіз енергоаудит, який передбачає:

- перевірку фактичної відповідності витрат енергії проєктним розрахункам;
- оцінку загальної енергоефективності вентиляційної системи (з урахуванням ККД, втрат у повітропроводах, стану обладнання тощо);
- виявлення резервів для зменшення споживання та розробку конкретних заходів;
- складання енергетичного паспорта вентиляційної установки або всієї будівлі.

Енергоаудит доцільно проводити при введенні системи в експлуатацію, щонайменше раз на 3 роки у діючих будівлях; після реалізації технічних або організаційних змін (наприклад, після встановлення VFD, автоматизації, заміни фільтрів, зонування).

Зниження загального електроспоживання вентиляційною системою на 10…25 %, а своєчасне виявлення прихованих дефектів – забруднення фільтрів, перегрівів, невідповідності режимів. Формування енергетичного профілю вентиляції є важливою частиною для прийняття інвестиційних рішень. Підвищення дисципліни обслуговування, відповідальності персоналу та ефективності технічних заходів.

Таким чином, систематичний моніторинг енергоспоживання та періодичні енергоаудити є невід’ємною частиною ефективного енергоменеджменту вентиляційних систем. Вони дозволяють перейти від реактивної моделі обслуговування до проактивної, коли рішення приймаються на основі даних, а не лише інтуїції або скарг користувачів. Це забезпечує неперервний цикл оптимізації, у якому кожен технічний або організаційний захід базується на фактах, вимірюваннях і обґрунтованій аналітиці.

ВИСНОВКИ

Покращення енергетичних якостей вентиляційних установок потребує цілісного підходу, що включає технічну модернізацію, цифрову трансформацію управління та організаційні дії. У межах цього розділу було розглянуто п’ять ключових напрямків енергоефективного вдосконалення.

По-перше, автоматизація вентиляційних систем дозволяє реалізувати інтелектуальне керування на основі сигналів від датчиків (CO_2, температура, вологість, присутність). Завдяки цьому досягається точне регулювання повітрообміну відповідно до реальних потреб користувачів, що знижує енергоспоживання без втрати комфорту.

По-друге, використання частотних перетворювачів у поєднанні з PID-алгоритмами та сценаріями управління забезпечує плавну зміну продуктивності вентиляторів. Це дозволяє уникнути перевентиляції, зменшити пікові навантаження і адаптувати систему до змінних умов експлуатації, що особливо актуально у будівлях з нерівномірним графіком роботи.

По-третє, організаційно-експлуатаційні заходи, зокрема регулярне обслуговування обладнання, перевірка технічного стану вузлів і правильна робота з автоматикою, суттєво впливають на збереження енергоефективності впродовж усього життєвого циклу системи.

Крім того, впровадження систем моніторингу енергоспоживання та періодичне проведення енергоаудитів створюють основу для прийняття обґрунтованих управлінських рішень. Постійний доступ до даних дозволяє своєчасно виявляти втрати енергії, аналізувати ефективність режимів роботи, оцінювати результативність технічних заходів і формувати прозорий енергетичний профіль об’єкта.

І нарешті, підвищення кваліфікації персоналу та формування енергоорієнтованої культури експлуатації є важливою умовою збереження досягнутого рівня енергоефективності. Людський чинник є важливим елементом, що може як посилити, так і нівелювати ефект від технічних рішень.

Узагальнюючи, впровадження технічних, цифрових і організаційних рішень у вентиляційних системах дозволяє створити стабільну, надійну та енергоощадну модель експлуатації, яка відповідає вимогам сталого розвитку та стандартам сучасного інженерного проєктування.

СПИОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Волков О. В., Косенко І. О. Автоматизований електропривод : навч.-метод. посіб. Запоріжжя : ЗДІА, 2016. 174 с. URL: http://files.znu.edu.ua/files/ZII/metodychky/do2018/f357379.pdf.

2. Донець О. В., Колотіло В. І. Теорія електропривода : конспект лекцій. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2021. 148 с. URL: http://ebooks.znu.edu.ua/files/Bibliobooks/Inshi67/0049267.pdf.

3. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи : навч. посіб. / за ред. М. Г. Поповича, О. Ю. Лозинського. Київ : Либідь, 2005. 680 с.

4. Електропривод : підручник / за ред. Ю. М. Лавріненка. Вид. 2-ге, допов. і перероб. Київ : Ліра-К, 2009. 503 с. URL: http://files.znu.edu.ua/files/Bibliobooks/Inshi73/f345399.pdf.

5. Закладний О. М., Праховник А. В., Соловей О. І. Енергозбереження засобами промислового електропривода : навч. посіб. Київ : Кондор, 2005. 408 с. URL: http://files.znu.edu.ua/files/Bibliobooks/Inshi70/f341747.pdf.

6. Казачковський М. М. Комплектні електроприводи : навч. посіб. Дніпропетровськ : НГУ, 2003. 226 с.

7. Калюжний Д. М., Карюк А. О., Щербак І. Є. Конспект лекцій з курсу «Електропостачання та електрозбереження». Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2016. 124 с. URL: http://ebooks.znu.edu.ua/files/Bibliobooks/Inshi70/0050848.pdf.

8. Мілих В. І., Павленко Т. П. Електропостачання промислових підприємств : підручник. Київ : Каравела, 2018. 272 с. URL: http://files.znu.edu.ua/files/Bibliobooks/Inshi70/0051117.pdf.

9. Сердюк Т. В. Організаційно-економічний механізм енергозбереження в промисловості : монографія. Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. 154 с.

10. Bevrani H., Kato T., Ise T., Inoue K. Grid Connected Converters : Modeling, Stability and Control. Amsterdam : Elsevier, 2022. 291 p.

URL: http://ebooks.znu.edu.ua/files/Bibliobooks/Inshi70/0050987/.

11. Дорф Р., Бишоп Р. Современные системы управления/ Р. Бишоп, Дорф Р. – 2002. – 140 с

12. Controller Area Network (CAN) Overview [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://www.ni.com/ru-ru/innovations/white-papers/06/controller-area-network--can--overview.html

13. Diagram Ragona [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://www.researchgate.net/figure/Ragone-plot-for-electrochemical-energy-storage- devices-and-traditional_fig1_331616812

14. ПІД-регулятор [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://en.wikipedia.org/wiki/PID_controller.

15. Bose B. K. Power Electronics and Motor Drives : Advances and Trends. 2nd ed. London : Academic Press, 2021. 1088 p. URL: http://ebooks.znu.edu.ua/files/Bibliobooks/Inshi70/0050991/.

16. Energy Efficiency in Electric Devices, Machines and Drives / G. Stumberger, B. Polajzer (eds.). Basel : MDPI, 2020. 218 p. URL: http://ebooks.znu.edu.ua/files/Bibliobooks/Inshi70/0050844.pdf.

17. ПІД-регулятор [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://en.wikipedia.org/wiki/PID_controller.

18. Репнікова Н. Б. Теорія автоматичного управління: класика і сучасність/ Н. Б. Репнікова,– Київ: НТУУ (КПІ), 2012. – 238 с.

19. Energy Efficiency in Electric Motors, Drives, Power Converters and Related Systems / M. Marchesoni (ed.). Basel : MDPI, 2020. 248 p. URL: http://ebooks.znu.edu.ua/files/Bibliobooks/Inshi70/0050860.pdf.

20. Hughes A., Drury B. Electric Motors and Drives : Fundamentals, Types and Applications. 5th ed. Oxford : Newnes, 2019. 495 p. URL: http://ebooks.znu.edu.ua/files/Bibliobooks/Inshi70/0050990/.

21. Indragandhi V., Subramaniyaswamy V., Selvamathi R. Electric Motor Drives and their Applications with Simulation Practices. London : Academic Press, 2022. 507 p. URL: http://ebooks.znu.edu.ua/files/Bibliobooks/Inshi70/0050945/.

ДОДАТОК

Демонстраційні матеріали до магістерської роботи

Удосконалення системи вентиляції будівлі за критерієм енергоефективності