


ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

**ІНЖИНІРИНГ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ ГІРНИЧИХ  
І МЕТАЛУРГІЙНИХ КОМПЛЕКСІВ:**

курс лекцій з навчальної дисципліни

Запоріжжя 2026



УДК 621.31:622/669 (076)  
I62

Рекомендовано Науково-методичною радою  
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»  
(протокол № 7 від 04.06.2026 р.)

*Укладач*  
Шрамко Ю.Ю. канд. техн. наук,

I62        Інжиніринг електромеханічних систем гірничих і металургійних комплексів : **курс лекцій з дисципліни** / уклад. Ю. Ю. Шрамко. Запоріжжя : ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», 2026. 287 с.

УДК 621.31:622/669 (076)

© ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», 2026

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
ТЕМА 1. ОСНОВИ ІНЖИНІРИНГУ В ГІРНИЧО-МЕТАЛУРГІЙНІЙ ГАЛУЗІ.....	5
ТЕМА 2. СИСТЕМНИЙ ІНЖИНІРИНГ І ЖИТТЄВИЙ ЦИКЛ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ.....	20
ТЕМА 3 ОРГАНІЗАЦІЙНО-ЕКОНОМІЧНІ ОСНОВИ ІНЖИНІРИНГОВОЇ ДІЯЛЬНОСТІ.....	40
ТЕМА 4. НОРМАТИВНО-ПРАВОВЕ ТА СТАНДАРТИЗАЦІЙНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ІНЖИНІРИНГУ.....	54
ТЕМА 5. ПРОЄКТУВАННЯ ТА ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ РІШЕНЬ.....	74
ТЕМА 6. ІНЖИНІРИНГ НАСОСНИХ УСТАНОВОК.....	87
ТЕМА 7. ІНЖИНІРИНГ ВЕНТИЛЯТОРНИХ СИСТЕМ.....	121
ТЕМА 8. ІНЖИНІРИНГ КОМПРЕСОРНИХ СИСТЕМ.....	152
ТЕМА 9. ІНЖИНІРИНГ КОНВЕЄРНИХ СИСТЕМ.....	199
ТЕМА 10. ІНЖИНІРИНГ ВАНТАЖОПІДІМАЛЬНИХ МЕХАНІЗМІВ.....	255

## ВСТУП

Сучасні гірничі та металургійні підприємства характеризуються високим рівнем енергоємності, автоматизації та інтеграції виробничих процесів. Ефективність їх роботи безпосередньо залежить від технічного стану, енергоефективності та надійності електромеханічних систем, які забезпечують привід технологічного обладнання, транспортування матеріалів, вентиляцію, водовідлив, підйомні та дробильні комплекси, прокатні стани, насосні й компресорні установки.

У межах курсу розглядаються принципи побудови та інженерного аналізу електромеханічних систем на базі електричних машин змінного і постійного струму, силової електроніки, систем керування електроприводами, засобів автоматизації та елементів електропостачання. Значна увага приділяється питанням енергозбереження, підвищення надійності, діагностики технічного стану обладнання, впровадження частотно-регульованих електроприводів та сучасних цифрових систем керування.

Окремий акцент зроблено на інженерних методах розрахунку параметрів електромеханічних систем, виборі обладнання відповідно до умов експлуатації, оцінюванні режимів роботи та забезпеченні електробезпеки в умовах підвищеної небезпеки гірничого виробництва.

Матеріал конспекту лекцій структуровано відповідно до логіки інженерного проектування: від аналізу технологічних процесів і навантажень до вибору електроприводу, розрахунку систем керування, інтеграції в структуру електропостачання підприємства та оцінювання експлуатаційних характеристик.

Опанування дисципліни забезпечує здобувачам освіти здатність:

- обґрунтовувати вибір типу та параметрів електромеханічних систем для конкретних виробничих механізмів;
- виконувати інженерні розрахунки електроприводів та елементів систем керування;
- аналізувати енергетичні показники та розробляти заходи з підвищення енергоефективності;
- оцінювати надійність і безпечність функціонування обладнання в умовах гірничо-металургійного виробництва;
- впроваджувати сучасні технології автоматизації та цифровізації електромеханічних комплексів.

Таким чином, дисципліна формує основу професійної діяльності майбутнього фахівця, забезпечуючи інтеграцію знань з електротехніки, електричних машин, електроприводу, силової електроніки та автоматизації в єдину систему інженерного забезпечення гірничих і металургійних комплексів.

## ТЕМА 1. ОСНОВИ ІНЖИНІРИНГУ В ГІРНИЧО-МЕТАЛУРГІЙНІЙ ГАЛУЗІ

Поняття інжинірингу та його відмінності від сервісного і проєктного обслуговування. Завдання інжинірингу в гірничо-металургійних комплексах: енергоефективність, модернізація, автоматизація.

Класифікація інжинірингових послуг. Сучасні напрями електротехнічного та електромеханічного інжинірингу. Технологічні тренди: цифрові двійники, Smart Grid, Smart Factory, штучний інтелект у діагностиці. Роль електроприводів і електронних систем керування у виробничих процесах ГМК.

Основні поняття та визначення.

Інжиніринг відіграє визначальну роль у розвитку сучасних технологій, інфраструктури та суспільства загалом. Він сприяє створенню нових продуктів, систем і процесів, що підвищують якість життя, забезпечують економічне зростання та стимулюють інноваційний розвиток. Завдяки інжинірингу з'являються ефективні технічні рішення, які дозволяють розв'язувати складні виробничі завдання та вдосконалювати вже існуючі технології.

Поняття «інжиніринг» трактується як комплексний процес застосування наукових знань, технічних умінь і креативних підходів для розроблення, створення та експлуатації об'єктів, систем і технологічних процесів. Інженерна діяльність спрямована на пошук функціональних і надійних рішень, що відповідають потребам суспільства й вимогам конкретної галузі.

Перед тим як перейти до вивчення дисципліни, пов'язаної з інжинірингом електромеханічних систем, необхідно усвідомити сутність базового поняття — «система». Саме воно визначає логіку побудови та функціонування технічних і виробничих об'єктів, а також їхню взаємодію з людиною й навколишнім середовищем.

Система — це впорядкована сукупність взаємопов'язаних елементів чи компонентів, які функціонують у взаємодії з метою досягнення певного результату або виконання визначеної функції. До складу системи можуть входити як фізичні об'єкти (машини, механізми, обладнання), так і процеси, люди, програмне забезпечення чи інформаційні ресурси. Важливою ознакою системи є цілісність: властивості всієї системи не зводяться лише до суми властивостей її окремих елементів, а визначаються характером взаємозв'язків між ними.

На рис. 1.1 представлено систему, яка складається з тих елементів системи та їхніх взаємозв'язків, які існують у визначених межах.

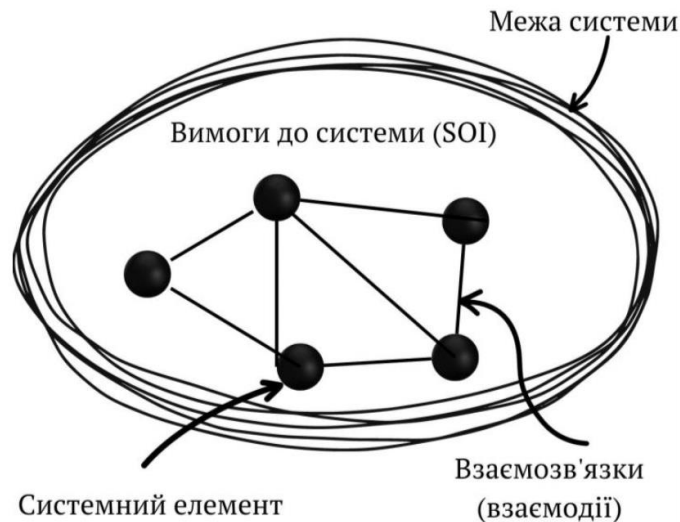


Рисунок 1.1 - Вимоги до системи

### Основні характеристики системи

- Елементи (компоненти). Система складається з окремих елементів, які можуть мати матеріальну природу (наприклад, деталі машини, електронні компоненти) або бути абстрактними (алгоритми, логічні блоки програмного забезпечення).
- Взаємодія елементів. Компоненти системи перебувають у взаємозв'язку та впливають один на одного шляхом обміну інформацією, енергією, матеріалами або сигналами. Взаємодія може бути:
  - прямою — один елемент безпосередньо впливає на інший;
  - опосередкованою — вплив реалізується через посередництво інших елементів.
- Мета (функціональне призначення). Кожна система створюється для виконання певної функції або досягнення конкретної мети. Це може бути забезпечення необхідного технологічного процесу, надання послуг або усунення виробничих обмежень.
- Властивості системи. Характеристики системи визначаються її структурою та організацією взаємодії елементів. До основних властивостей належать:
  - швидкість реакції;
  - надійність;
  - ефективність;
  - гнучкість;
  - безпека.
- Механізми управління. Будь-яка система має підсистему керування, яка регулює її роботу, забезпечує стабільність функціонування та досягнення поставлених цілей.

Системи є універсальним поняттям і зустрічаються в різних галузях знань та практичної діяльності: техніці, природничих і соціальних науках,

біології, інформаційних технологіях тощо. Завдяки системному підходу стає можливим створення складних продуктів, вирішення багатоконпонентних проблем та вдосконалення процесів у найрізноманітніших сферах. Таким чином, концепція «система» виступає методологічною основою для аналізу та проєктування як технічних об'єктів, так і соціально-економічних чи інформаційних структур.

Системи можна поділяти за різними критеріями, залежно від характеру їх взаємодії із середовищем, походження, форми існування чи ступеня новизни. Серед найбільш поширених типів систем виділяють такі:

- Відкриті та закриті системи
  - Відкрита система взаємодіє з навколишнім середовищем: отримує від нього вхідні дані (інформацію, енергію, матеріали) та повертає результати у вигляді вихідних потоків.
  - Закрита система ізольована від зовнішнього середовища і функціонує автономно.
- Природні, створені та модифіковані людиною системи
  - Природні системи виникають унаслідок природних процесів і містять природні елементи (наприклад, екосистема).
  - Системи, створені людиною, розроблені та побудовані штучно (наприклад, електроенергетична мережа, виробничий цех).
  - Модифіковані системи — природні системи, змінені для задоволення людських потреб (наприклад, штучно зрошувані землі, регульовані річки).
- Фізичні та концептуальні системи
  - Фізичні системи мають матеріальну форму й існують у реальному світі (машини, обладнання, будівлі).
  - Концептуальні системи є абстрактними утвореннями, що описують зв'язки та структури, але не мають фізичного втілення (наприклад, математичні моделі, алгоритми).
- Попередні та **безпрецедентні** системи
  - Попередні системи будуються на основі раніше створених аналогів чи відомих рішень.
  - Безпрецедентні системи не мають прямих аналогів; вони створюються вперше і є результатом досліджень та інноваційної діяльності.

Автоматизовані системи керування належать до фізичних систем, оскільки мають матеріальну форму та складаються з конкретних компонентів: датчиків, виконавчих пристроїв, контролерів, засобів автоматизації й комунікаційних модулів. Вони забезпечують інтеграцію різних елементів у єдину структуру, що дозволяє здійснювати управління складними технологічними процесами.

АСК є ключовим елементом сучасних промислових і технологічних рішень, які застосовуються у виробничих лініях, енергетиці, транспортних системах, будівництві, хімічній і нафтовій промисловості, медицині та багатьох інших сферах. Їхнє призначення полягає у забезпеченні

оптимальної роботи обладнання та систем шляхом автоматизації процесів контролю й управління.

Функціонування АСК ґрунтується на принципі взаємодії окремих компонентів, які спільно реалізують поставлені цілі. Такі системи здатні автоматично регулювати параметри технологічних процесів у режимі реального часу, мінімізуючи необхідність прямого втручання оператора.

Завдяки цьому застосування АСК забезпечує:

- підвищення ефективності виробництва;
- покращення якості продукції;
- зростання надійності обладнання;
- посилення безпеки технологічних процесів.

Успішне створення та впровадження АСК передбачає проходження кількох ключових етапів:

- Аналіз системи та постановка цілей керування

На цьому етапі визначаються основні функції системи, перелік контрольованих параметрів, формуються вимоги до структури АСК та її компонентів. Аналіз охоплює вивчення об'єкта керування та зовнішніх умов його функціонування.

- Розробка архітектури АСК

Включає вибір апаратних і програмних засобів, формування загальної структури системи керування та визначення логіки взаємодії між компонентами. На цьому етапі створюється проектна модель майбутньої системи.

- Розробка та реалізація алгоритмів керування

Виконується побудова математичних моделей та алгоритмів, які забезпечують контроль, регулювання та оптимізацію роботи системи. Алгоритми базуються на даних датчиків, їх обробці та прийнятті керуючих рішень у режимі реального часу.

- Імплементация та інтеграція

Реалізуються апаратні й програмні компоненти, проводяться випробування та налагодження системи. Інтеграція забезпечує узгоджену роботу всіх модулів у межах єдиної функціональної структури.

- Експлуатація та супровід

Передбачає постійний моніторинг параметрів системи, технічне обслуговування, усунення відмов, а також оновлення програмного забезпечення. На цьому етапі гарантується стабільність і надійність роботи АСК упродовж усього життєвого циклу.

Життєвий цикл системи.

Життєвий цикл системи — це концептуальна модель, яка відображає послідовність етапів і процесів, що проходить система від моменту її створення до завершення використання. Він охоплює повний шлях розвитку системи: від початкового проектування та розробки до впровадження, подальшої експлуатації та завершальної стадії — виведення з експлуатації. (рис. 1.2.).



Рисунок 1.2 - Фази життєвого циклу універсальної системи

Життєвий цикл будь-якої технічної чи інформаційної системи охоплює послідовність фаз, що забезпечують її створення, функціонування та завершення використання. До основних етапів належать:

- Аналіз і визначення вимог.

На цій стадії здійснюється виявлення потреб і очікувань замовника, формулюються функціональні та технічні вимоги. Визначаються ключові параметри, які система має забезпечити, а також обмеження, що впливають на її проектування та подальше використання.

- Проектування

Включає розробку концепції системи, створення архітектури, специфікацій і плану реалізації. На цьому етапі закладаються основи майбутньої структури системи та принципи взаємодії її компонентів.

- Впровадження

Охоплює практичне введення системи в експлуатацію у реальному середовищі. Проводяться тестування, налагодження, навчання користувачів, а також інтеграція з існуючими технологічними або інформаційними системами.

- Експлуатація

Передбачає регулярне використання системи за призначенням. У цій фазі здійснюється технічна підтримка, моніторинг параметрів, усунення несправностей, оновлення та оптимізація функціонування для забезпечення стабільної та ефективної роботи.

- Вихід з експлуатації

Завершальна стадія, що включає процедури відключення та виведення системи з обігу. Це може передбачати демонтаж обладнання, архівацію чи перенесення даних, а також підготовку до переходу на нову систему.

Життєвий цикл системи є важливим інструментом для організацій, оскільки дозволяє планувати і здійснювати розвиток, управління та підтримку систем протягом усього періоду їх використання. Такий підхід

забезпечує оптимальну функціональність, якість і надійність, а також дає змогу уникати зайвих витрат і проблем, пов'язаних із використанням застарілих або неефективних рішень.

Кожна фаза життєвого циклу має власні завдання, ресурси та ризики, якими необхідно управляти. До ключових процесів належать:

- управління вимогами та специфікаціями;
- планування й організація проекту;
- розробка та тестування системи;
- забезпечення безпеки та захисту даних;
- управління змінами, оновленням та технічною підтримкою.

Розуміння концепції життєвого циклу є критично важливим для інженерів та менеджерів, адже воно сприяє ефективному управлінню проектами, прийняттю обґрунтованих рішень щодо розвитку чи модернізації систем, а також допомагає мінімізувати ризики та уникати помилок у процесі реалізації складних системних проектів.

### **Керування системою**

Життєвий цикл будь-якої системи передбачає участь кількох зацікавлених сторін, кожна з яких виконує власні функції та несе відповідальність за певні процеси. До основних учасників належать:

- **Замовники (користувачі системи).** Формулюють потреби, очікування та вимоги до системи, забезпечують фінансування та оцінюють результати її функціонування.
- **Розробники (інженери, проєктувальники, програмісти).** Виконують аналіз вимог, проєктування архітектури, розробку програмного та апаратного забезпечення, тестування і впровадження системи.
- **Постачальники обладнання та технологій.** Забезпечують необхідні технічні ресурси (датчики, контролери, приводи, програмне забезпечення) та здійснюють їх інтеграцію у систему.
- **Оператори та обслуговуючий персонал.** Безпосередньо працюють із системою під час експлуатації, відповідають за правильність її функціонування, моніторинг параметрів та виявлення несправностей.
- **Менеджери та керівники проєктів.** Координують дії учасників, здійснюють планування ресурсів, контроль термінів і якості реалізації етапів життєвого циклу.
- **Сервісні та технічні служби.** Виконують модернізацію, оновлення та ремонт системи, забезпечують її підтримку протягом усього життєвого циклу.

Відповідальність за різні етапи життєвого циклу системи розподіляється між підприємством (або організацією), у якому функціонуватиме кінцева система. На рис. 1.3 умовно показано участь основних сторін на різних фазах життєвого циклу.

- **Початкова фаза (до придбання системи).** За цю стадію відповідає керівництво підприємства, яке здійснює бізнес-планування,

формує стратегію розвитку та готує бізнес-обґрунтування для майбутніх проєктів.

- **Фаза проєктування та закупівлі.** На цьому етапі формується технічне завдання та проєкт системи. Менеджер проєкту, спираючись на ресурси організації, організовує процес закупівлі та підготовки до впровадження.

- **Фаза впровадження та функціонування.** Після введення системи в дію її експлуатацію здійснюють кінцеві користувачі, які керують процесами на основі отриманих даних.

- **Фаза підтримки.** Підтримку роботи системи, усунення несправностей та оновлення програмно-апаратних засобів виконують відповідні технічні служби.

Важливо підкреслити, що усі сторони залучені протягом усього життєвого циклу системи, однак їхні ролі та сфери відповідальності змінюються залежно від фази.



Рисунок 1.3 - Відповідальність за різні етапи життєвого циклу системи

Головні положення щодо інжинірингової діяльності

Господарські відносини мають власний зміст та механізми впровадження в правове поле. Вибір моделі їх регулювання часто супроводжується складнощами, зокрема на етапі ідентифікації відповідних законодавчих норм та визначення оптимальних правових інструментів.

В інжиніринговій діяльності такі труднощі проявляються особливо відчутно, насамперед у сфері зовнішньоекономічної діяльності. Це пов'язано з особливостями трансферу технологій та переміщення послуг, що потребує чіткого дотримання вимог як на національному, так і на міжнародному рівні. Проблематика ускладнюється у випадках, коли проєкти реалізуються підприємствами, зареєстрованими як нерезиденти, але фактично діючими на території України.

Основними викликами є:

- визначення відповідної правової юрисдикції для інжинірингових проєктів;
- забезпечення дотримання стандартів та технічних регламентів;
- урахування норм міжнародного права у сфері трансферу технологій і зовнішньоекономічної співпраці.

Таким чином, правові аспекти інжинірингової діяльності вимагають комплексного підходу, що поєднує національне законодавство, міжнародні стандарти та практику договірної регулювання.

Відповідно до законодавства України, визначення інжинірингової діяльності у галузі будівництва міститься в Законі "Про архітектурну діяльність". Цей закон визначає інжинірингову діяльність у будівництві як комплекс послуг інженерного та технічного характеру. Ця діяльність охоплює проведення попередніх техніко-економічних обґрунтувань і досліджень, експертизу проєкту, розробку програм фінансування будівництва. Також до інжинірингової діяльності входить організація виготовлення проєктної документації, проведення конкурсів і торгів, укладання підрядних договорів, координація діяльності всіх учасників будівництва.

Крім того, інжиніринг охоплює процес здійснення технічного нагляду за будівництвом об'єкта архітектури та надання консультаційних послуг економічного, фінансового або іншого характеру.

Відповідно до Національного класифікатора України ДК 009:2010 "Класифікація видів економічної діяльності", інжинірингова діяльність відноситься до секції М "Професійна, наукова та технічна діяльність" і має код 71.12.

Згідно з цим класифікатором, інжинірингова діяльність охоплює такі сфери:

- промислове будівництво;
- проєктування інженерних споруд, гідротехнічних споруд і транспортно-будівництва;
- проєкти управління водними ресурсами;
- проєкти у сфері електроніки та електротехніки;
- проєкти у видобувній інженерії;
- проєкти хімічної технології;
- машинобудування;
- організацію виробництва;
- системотехніку;
- техніку безпеки;
- проєктування систем кондиціонування, охолодження.

Відповідно до статті 14 підпункту 14.1.85 Податкового кодексу України, інжиніринг визначається як надання послуг (виконання робіт) у таких напрямках: складання технічних завдань і проєктних пропозицій; проведення наукових досліджень і техніко-економічних обстежень; виконання інженерно-розвідувальних робіт у будівництві об'єктів; розроблення

технічної документації і проектування об'єктів техніки і технології; надання консультацій та авторського нагляду під час монтажних та пусконаладжувальних робіт; надання консультацій, пов'язаних із зазначеними послугами і роботами.

Система державних стандартів у сфері будівництва та архітектурної діяльності відіграє важливу роль у нормативно-правовому регулюванні інжинірингової діяльності. Ці стандарти є важливими в інжинірингу через специфіку послуг і процедур, пов'язаних з цією галуззю. Дотримання відповідних будівельних, проектних та експлуатаційних стандартів є необхідним, оскільки інжинірингові підприємства займаються створенням і обслуговуванням об'єктів, пов'язаних зі значними ризиками для користувачів. Аналіз державних стандартів та будівельних норм є важливим як для забезпечення якості інжинірингових послуг, так і для контролю за виконанням технічних вимог будівництва та експлуатації об'єктів нерухомості інжиніринговими підприємствами.

Основними стандартами в інжиніринговій діяльності є:

- ДБН А.1.1-1:2009 "Система нормування та стандартизації у будівництві. Основні положення";
- ДБН В.2.5-23:2010 "Проектування електрообладнання об'єктів цивільного призначення";
- ДБН В.2.5-67:2013 "Опалення, вентиляція та кондиціонування";
- ДБН В.2.5-74:2013 "Водопостачання. Зовнішні мережі та споруди. Основні положення проектування";
- ДБН В.2.5-75:2013 "Каналізація. Зовнішні мережі та споруди. Основні положення проектування";
- ДБН В.2.5-77:2014 "Котельні";
- ДБН В.2.5-56:2014 "Системи протипожежного захисту";
- ДБН В.2.5-28-2018 "Природне і штучне освітлення";
- ДСТУ 2226-93 "Автоматизовані системи. Терміни та визначення";
- ДСТУ 3451-96 "Технічні засоби для розподілених автоматизованих систем керування технологічними процесами. Загальні вимоги до спряження виробів";
- ДСТУ Б А.2.4-3:2009 "Система проектної документації для будівництва. Правила виконання робочої документації автоматизації технологічних процесів".

Отже, інжинірингові послуги включають широкий спектр робіт, пов'язаних з розробкою проектів, проведенням досліджень, підготовкою технічної документації, консультуванням та наглядом під час виконання різних інженерних проектів.

## **Електротехнічний інжиніринг**

### ***Об'єкти і характеристика електротехнічного інжинірингу***

Електротехнічний інжиніринг є складовою галуззю інжинірингу, що зосереджується на розробці, проектуванні, виготовленні та управлінні електротехнічними системами, пристроями та обладнанням. Цей напрям

охоплює як фундаментальні аспекти електротехніки, так і прикладні завдання, пов'язані з функціонуванням сучасної енергетичної та промислової інфраструктури.

Основні напрями діяльності електротехнічного інжинірингу включають:

- проектування та розробку електричних систем і мереж (системи електропостачання, електропередачі, освітлення, автоматизовані системи керування, системи електробезпеки);
- виготовлення та монтаж електротехнічного обладнання (генератори, трансформатори, розподільчі пристрої, електричні панелі, кабельні мережі);
- технічне обслуговування, модернізацію та ремонт обладнання, що забезпечує надійність його роботи в умовах експлуатації;
- впровадження енергоефективних технологій і відновлюваних джерел енергії, інтеграцію «зелених» рішень у промисловість і міську інфраструктуру;
- виконання електротехнічних розрахунків та системного аналізу, спрямованих на підвищення безпеки, ефективності та надійності електричних установок.

Таким чином, електротехнічний інжиніринг виступає базовим напрямом розвитку енергетики та промисловості, забезпечуючи функціонування як традиційних, так і сучасних високотехнологічних систем.

Проектування систем електропостачання та електроосвітлення здійснюється з урахуванням потреб і вимог користувачів. Основними завданнями є визначення необхідних електротехнічних та освітлювальних параметрів, виконання розрахунків навантажень, вибір відповідних приладів та обладнання, а також розробка схем живлення, які забезпечують безперервність і надійність електропостачання.

Ключовим аспектом такого проектування виступає забезпечення ефективності, надійності та безпеки електротехнічних систем. Це досягається шляхом:

- дотримання галузевих стандартів, норм і правил;
- виконання необхідних електротехнічних розрахунків;
- впровадження заходів із захисту, резервування та заземлення;
- застосування якісних матеріалів і сертифікованих компонентів.

Важливою складовою електротехнічного інжинірингу є також управління енергоефективністю та підтримка сталого розвитку. Це передбачає оптимальне використання електроенергії, впровадження сучасних енергоощадних технологій, інтеграцію відновлюваних джерел енергії та системний моніторинг для дотримання екологічних стандартів.

Під час проектування систем силового електрообладнання необхідно дотримуватися комплексу вимог, що забезпечують їх ефективність, надійність і безпеку. Серед ключових вимог можна виділити такі:

- Безпека обладнання та персоналу. Проектування має враховувати вимоги електробезпеки: правильний вибір захисних пристроїв, організація заземлення, надійна ізоляція, дотримання правил експлуатації та технічних регламентів.

- Надійність роботи та безперервність живлення. Система повинна забезпечувати стабільне електропостачання, що досягається завдяки коректним розрахункам навантаження, застосуванню надійних компонентів, передбаченню можливості оперативного ремонту та використанню запасних вузлів.

- Енергоефективність. Необхідно забезпечити раціональне використання електроенергії шляхом мінімізації втрат, вибору енергоощадних компонентів, впровадження сучасних технологій керування навантаженням та оптимізації режимів роботи.

- Простота експлуатації та безпечність керування. Система повинна бути зручною в обслуговуванні, мати зрозумілий інтерфейс керування та гарантувати безпеку оператора під час експлуатації.

- Відповідність стандартам і нормам. Розробка електрообладнання має відповідати чинним національним та міжнародним електротехнічним стандартам, що регулюють якість, надійність і безпеку електричних установок.

- Економічна доцільність. Вибрані рішення повинні мінімізувати сукупні витрати на закупівлю обладнання, його монтаж, експлуатацію, технічне обслуговування та ремонт.

Виконання цих вимог допомагає забезпечити оптимальну роботу силового електрообладнання, максимізувати його ефективність, надійність та довговічність.

Технічне завдання (ТЗ) є базовим документом, що визначає ключові вимоги та параметри, необхідні для успішної реалізації проекту силового електрообладнання. Початкова стадія роботи передбачає аналіз будівельних споруд, технологічного та механічного обладнання, яке є складовою майбутньої системи.

Розробка проекту відповідно до ТЗ здійснюється за такою послідовністю:

- Розрахунок і вибір електрообладнання. Основне завдання полягає у встановленні оптимального складу обладнання, що відповідає технічним та функціональним вимогам, включаючи споживану потужність, надійність, економічність і енергоефективність. На цьому етапі виконується вибір електродвигунів, перетворювачів, комутаційних апаратів та інших елементів.

- Вибір розподільних мереж та систем живлення. Визначається структура й параметри розподільчих електричних мереж, обираються проводка, засоби захисту, вимикачі, розподільчі щити та інші компоненти. Мета — забезпечити оптимальний розподіл електричної енергії, надійність живлення та електробезпеку.

- Вибір систем автоматизації та управління технологічним процесом. Розглядається питання впровадження систем автоматизації, що здійснюють контроль та керування роботою електрообладнання. Це можуть бути системи керування освітленням, контролю доступу, автоматизовані системи електропостачання тощо. Вибір здійснюється з урахуванням вимог до функціональності, ефективності та безпеки.

- Конструктивні рішення з монтажу електрообладнання та мереж. Виконується деталізоване проектування розташування обладнання, його монтажу та прокладання інформаційних і силових мереж. При цьому враховуються вимоги до електробезпеки, просторового розміщення, доступності для обслуговування та експлуатаційної зручності.

Таким чином, процес проектування силового електрообладнання передбачає послідовний перехід від вибору обладнання та мереж до систем автоматизації й остаточних конструктивних рішень. Такий підхід забезпечує створення оптимальної, функціональної та надійної системи, яка відповідає технічним вимогам і потребам конкретного проєкту.

### **Технологічні тренди та роль електроприводів у ГМК**

*Цифровий двійник* — це віртуальна модель обладнання чи процесу, яка відтворює його стан у реальному часі. Такий підхід дає змогу прогнозувати відмови, оптимізувати режими роботи та проводити навчання персоналу без ризику для виробництва. У гірничо-металургійній галузі цифрові двійники застосовуються для прокатних станів, доменних печей та конвеєрних ліній, забезпечуючи економію енергії та зниження аварійності.

#### **Цифрові двійники**

- Визначення: віртуальна модель агрегату або процесу, що відображає його стан у реальному часі.

- Застосування: оптимізація процесів, прогнозування відмов, навчання персоналу.

- Приклад: цифровий двійник прокатного стану дозволяє зменшити кількість браку та витрати енергії.

- Вплив: зниження аварійності, економія ресурсів, екологічність виробництва.

*Розумні енергосистеми (Smart Grid)* поєднують електричні мережі та цифрові технології керування. У ГМК вони дозволяють збалансувати навантаження між цехами, інтегрувати відновлювані джерела енергії та здійснювати моніторинг якості живлення. Це підвищує надійність роботи доменних і прокатних агрегатів, зменшує втрати електроенергії та забезпечує стабільність технологічних процесів.

#### **Smart Grid (розумні енергосистеми)**

- Сутність: поєднання електричних мереж і цифрових технологій.

- Можливості для ГМК: балансування навантаження, інтеграція ВДЕ, моніторинг якості електроенергії.

- Вплив: підвищення надійності живлення доменних і прокатних агрегатів, зменшення втрат енергії.

*Концепція розумного заводу (Smart Factory)* базується на цифровій інтеграції всіх виробничих процесів. Використання IIoT, SCADA і MES-систем, роботизованих комплексів та автоматизованих ліній підвищує продуктивність, скорочує час простоїв і забезпечує контроль за екологічними параметрами. У доменних печах та прокатних станах Smart Factory дозволяє автоматично регулювати параметри процесів у режимі реального часу.

Smart Factory (розумне виробництво)

- Принцип: повна інтеграція виробничих процесів через цифрові платформи.

- Компоненти: IIoT, SCADA, MES, роботи та автоматизовані комплекси.

- Ефект: зростання продуктивності, мінімізація простоїв, контроль викидів.

- Приклад: автономне регулювання параметрів доменної печі.

*Штучний інтелект у діагностиці.* Алгоритми машинного навчання та нейронні мережі широко використовуються для аналізу технічного стану обладнання. Системи штучного інтелекту визначають приховані дефекти підшипників і редукторів за вібраційними сигналами, прогнозують несправності й оптимізують графіки ремонту. Це зменшує ризик аварій, скорочує витрати на обслуговування та підвищує безпеку персоналу.

Штучний інтелект у діагностиці

- Функції: аналіз даних, прогноз несправностей, оптимізація ремонту.

- Методи: нейронні мережі, машинне навчання.

- Приклад: виявлення мікродефектів підшипників електродвигунів за вібросигналами.

- Вплив: скорочення аварій, економія на ремонті, безпека персоналу.

### Порівняльна характеристика трендів

Тренд	Основне призначення	Приклад у ГМК	Ключові переваги
Цифрові двійники	Моделювання процесів та обладнання	Прокатні стани, доменні печі	Оптимізація, прогнозування відмов
Smart Grid	Інтелектуальне управління енергією	Балансування навантажень у цехах	Енергоефективність, стійкість
Smart Factory	Автоматизоване виробництво	Автоматичне керування цехами	Продуктивність, екологічність
Штучний інтелект	Діагностика й аналітика даних	Двигуни, насоси, редуктори	Надійність, зниження витрат

*Роль електроприводів та систем керування.* Електроприводи є ключовим елементом більшості технологічних процесів у ГМК — від транспортування сировини до роботи прокатних станів і доменних машин. Сучасні системи керування ґрунтуються на ПЛК, SCADA та частотних перетворювачах, що дозволяє регулювати швидкість, зменшувати

енергоспоживання на 15–30 % та забезпечувати стабільність технологічних режимів. Впровадження інтелектуальних систем управління робить виробництво більш безпечним, гнучким та екологічно орієнтованим.

- Вплив:
  - стабільність технологічних процесів;
  - зниження енергоспоживання на 15–30%;
  - підвищення безпеки та екологічності виробництва.

Висновки.

Інжиніринг є основою розвитку сучасних технологій у гірничо-металургійній галузі, адже поєднує наукові знання, технічні навички та інноваційні рішення. Центральним поняттям виступає система — сукупність взаємопов'язаних елементів, що діють разом для досягнення спільної мети. Життєвий цикл системи включає аналіз, проектування, впровадження, експлуатацію та вихід з експлуатації, а відповідальність на кожному етапі розподіляється між різними учасниками. Електротехнічний інжиніринг охоплює проектування систем електропостачання, вибір і монтаж обладнання, автоматизацію та впровадження енергоефективних технологій. Сучасні тренди — цифрові двійники, Smart Grid, Smart Factory та штучний інтелект — сприяють енергоефективності, екологічності й безпеці виробництва. Електроприводи та системи керування є ключовими елементами, що забезпечують стабільність та ефективність процесів у ГМК.

Контрольні питання до теми 1.

1. Що таке інжиніринг та які його основні відмінності від сервісного і проектного обслуговування?
2. Які завдання виконує інжиніринг у гірничо-металургійних комплексах?
3. Як класифікуються інжинірингові послуги?
4. Які сучасні напрями електротехнічного та електромеханічного інжинірингу ви знаєте?
5. Що таке система? Які її основні риси та ознаки цілісності?
6. Назвіть основні характеристики системи та поясніть їх зміст.
7. Які типи систем виділяють за взаємодією із середовищем, походженням та формою існування?
8. До якого типу систем належать автоматизовані системи керування (АСК) і чому?
9. Які етапи включає процес проектування та впровадження АСК?
10. Що таке життєвий цикл системи та які його основні фази?
11. Які завдання вирішуються на кожному етапі життєвого циклу системи?
12. Які сторони беруть участь у життєвому циклі системи та які їхні основні ролі?
13. Як розподіляється відповідальність за різні етапи життєвого циклу між учасниками?

14. У чому полягають правові аспекти інжинірингової діяльності, зокрема у зовнішньоекономічній сфері?
15. Які нормативні документи України регулюють інжинірингову діяльність?
16. Що таке електротехнічний інжиніринг і які його основні напрями діяльності?
17. Які ключові завдання вирішуються при проектуванні систем електропостачання та електроосвітлення?
18. Які основні вимоги висуваються до силового електрообладнання?
19. Що таке технічне завдання (ТЗ) і яку роль воно відіграє у проектуванні силового електрообладнання?
20. Які технологічні тренди впливають на розвиток ГМК (цифрові двійники, Smart Grid, Smart Factory, ШІ у діагностиці)?
21. Яку роль відіграють електроприводи та системи керування у виробничих процесах ГМК?

Використана література.

1. Інжиніринг електротехнічних та мехатронних систем : підруч. для здобувачів ступеня магістра за спец. 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / А. В. Босак, А. В. Торопов, Л. В. Торопова; КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. 251 с.

2. Інжиніринг електротехнічних та мехатронних систем: конспект лекцій : навч. посіб. для здобувачів ступеня магістр за освітньою програмою «Інжиніринг інтелектуальних електротехнічних та мехатронних комплексів» спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / О.В. Чермалих, О.В. Данілін, А.В. Босак. Л.В. Торопова; КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 77 с.

## ТЕМА 2. СИСТЕМНИЙ ІНЖИНІРИНГ І ЖИТТЄВИЙ ЦИКЛ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

Системний підхід як основа інжинірингу. Елементи та структура складних технічних систем. Життєвий цикл електромеханічної системи: проектування, виготовлення, монтаж, експлуатація, модернізація, утилізація. Методи системного аналізу: декомпозиція, моделювання, оптимізація. Управління життєвим циклом обладнання в умовах гірничо-металургійного виробництва. Приклади застосування системного інжинірингу у проектуванні автоматизованих електроприводів.

### Системний інжиніринг

Системний інжиніринг (SI) надає керовану структуру, у межах якої складні технічні системи коректно визначаються, аналізуються, специфікуються, розробляються/виготовляються, вводяться в експлуатацію та підтримуються протягом усього життєвого циклу. Фокус SI — на системі в цілому та на міждисциплінарній інтеграції. Скоординовані зусилля охоплюють управління проєктами, забезпечення якості, інтегровану логістичну підтримку та взаємодію широкого спектра інженерних дисциплін.

SI — це міждисциплінарний підхід і практичний інструмент створення успішних систем, що вимірно задовольняють потреби замовників, користувачів і інших стейкхолдерів у визначеному операційному контексті. Ключові елементи підходу проілюстровано на рис. 2.1.

– Системний інжиніринг розглядає систему як скоординовану комбінацію взаємодіючих елементів, зорієнтованих на досягнення визначеної мети (набору цілей). Система функціонує у середовищі, яке охоплює інші системи, користувачів і природні чинники, та взаємодіє з ним через формалізовані інтерфейси й потоки енергії/матеріалів/інформації.

До елементів системи можуть належати: апаратне забезпечення, програмне забезпечення, мікропрограмні компоненти, люди (оператори, персонал), дані та знання, методики й процедури, технічні засоби та інфраструктура, сервіси підтримки та інші допоміжні складові.

– Системний інженер — фахівець, який забезпечує й координує міждисциплінарний підхід до створення системи впродовж усього її життєвого циклу. Він/вона з'ясовує потреби стейкхолдерів і трансформує їх у чіткі, вимірювані та здійсненні вимоги, придатні до реалізації розробниками. До типових обов'язків належать: формування та підтримка вимог і трасування (RTM), узгодження архітектури й інтерфейсів, планування V&V (верифікації й валідації), управління ризиками та змінами, а також балансування компромісів (trade-off) між вартістю, термінами, ризиками, продуктивністю й безпекою.

Системний інженер забезпечує узгодженість і взаємну сумісність усіх елементів системи з метою виконання встановлених вимог замовника та досягнення цільових характеристик. Кінцевою метою цієї діяльності є задоволення потреб клієнтів та інших стейкхолдерів, які набувають і використовують систему у реальних умовах експлуатації.

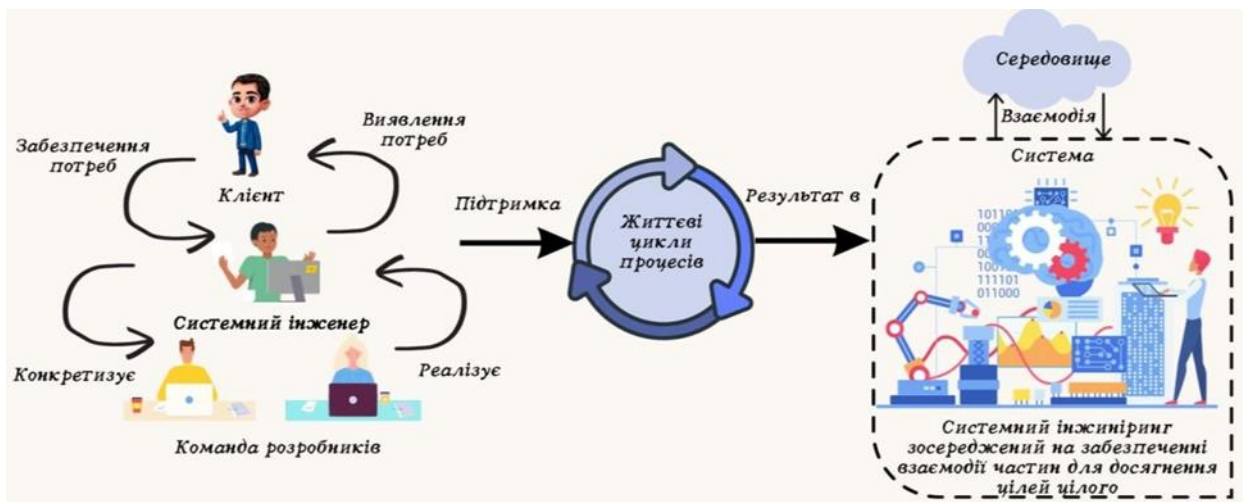


Рисунок. 2.1 - Ключові елементи системного інжинірингу 1

### Сфера застосування системного інжинірингу

Сфера застосування системного інжинірингу (СІ) охоплює всі напрями, пов'язані з проєктуванням, розробленням та управлінням складними технічними системами. Його принципи та методи використовуються в різних галузях промисловості й науки, де необхідний системний підхід до створення, впровадження та супроводу складних рішень.

Ключові сфери застосування СІ:

- Інформаційні технології — розроблення та управління програмними комплексами, базами даних, обчислювальними мережами, веб-сервісами та інформаційними інфраструктурами.
- Транспорт і логістика — проєктування та оптимізація транспортних систем, логістичних мереж, управління рухом і розкладами, підвищення ефективності перевезень вантажів і пасажирів.
- Енергетика й електроенергетика — побудова та управління енергосистемами: електростанціями, мережами передачі й розподілу, об'єктами відновлювальної енергетики (сонячними, вітровими, гідроустановками).
- Автомобільна промисловість — створення автомобільних систем керування, безпеки, електроніки та комунікацій; оптимізація виробництва, забезпечення кібербезпеки, розроблення фінансово-аналітичних рішень та управління ризиками.
- Телекомунікації — проєктування й розвиток телекомунікаційних мереж: мобільних, супутникових, інтернет-провайдерських і глобальних систем зв'язку.
- Промисловий дизайн — розроблення продукції та промислових систем з урахуванням вимог до ергономіки, матеріалознавства, випробувань і надійності.
- Екологія та сталий розвиток — проєктування екологічно збалансованих технологій, систем управління довкіллям, програм енергоефективності та стратегій переходу до відновлюваних джерел енергії.

- Управління проектами — застосування системного підходу для планування, координації ресурсів, контролю постачань, управління якістю та реалізації складних інженерних проєктів.
- Наукові дослідження — використання методів СІ для постановки та аналізу експериментів у сферах інженерії, комп’ютерних і соціальних наук, біомедичних технологій.

Зручним способом визначення сфери застосування СІ в інженерії та управлінні є розробка діаграми Венна.

На рисунку 2.2 подано схему взаємозв’язку між системним інжинірингом (СІ), процесами впровадження системи та діяльністю з управління проектами/системами 6.

До сфери функцій планування та аналітичної діяльності СІ належать, зокрема, оцінка альтернативних варіантів виробництва, випробувань та експлуатації системи. Натомість такі практичні дії, як замовлення та монтаж обладнання виробничої лінії чи його безпосереднє використання у виробництві, хоча й мають значення для загального контексту проєкту та враховуються з погляду екологічних та системних наслідків, не відносяться безпосередньо до завдань СІ.

Водночас інженерія впровадження системи включає окремі аспекти інтеграції та введення в дію не лише апаратної частини, а й компонентів, що стосуються програмного забезпечення, зокрема методів його розроблення та впровадження у виробниче середовище.



Рисунок 2.2 - Межі системного інжинірингу, впровадження систем та управління проєктами/системами 1, 2

Учасники життєвого циклу системи та їх взаємозв’язки.

Життєвий цикл проєкту системного інжинірингу (СІ) передбачає взаємодію трьох ключових складових:

- агентів — суб'єктів або об'єктів, які виконують дії чи взаємодіють між собою та з іншими системами;
- дій (процесів) — операцій, що здійснюються агентами в межах проєкту;
- артефактів — матеріальних або інформаційних продуктів, створених чи використаних для досягнення цілей.

На рисунку 2.3 представлено узагальнену модель, яка відображає основних агентів, типові види діяльності та артефакти, що формуються упродовж життєвого циклу СІ в контексті проєкту зі створення та розвитку інженерної системи 1, 2.

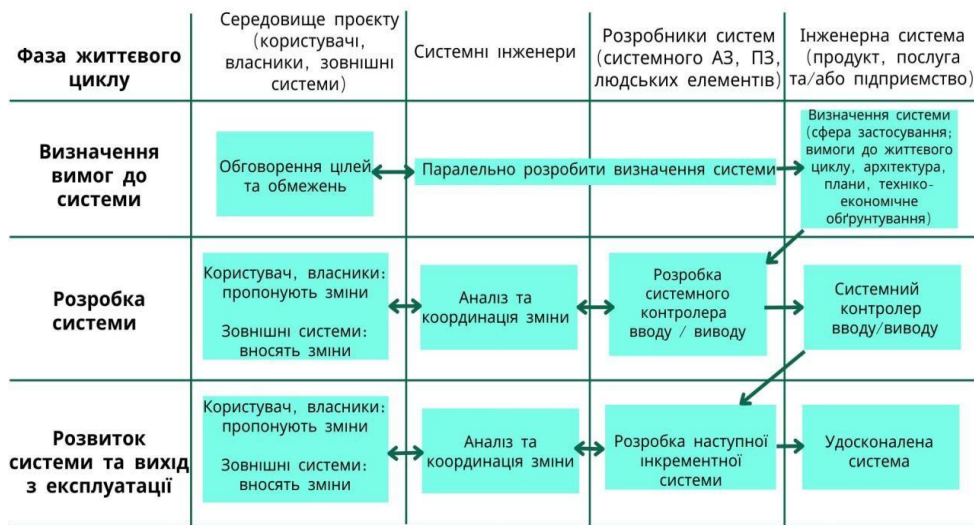


Рисунок. 2.3 - Контекст життєвого циклу проєкту СІ та інженерної системи: пов'язані агенти, дії та артефакти 1, 2

Апаратне забезпечення системи (АЗ) охоплює фізичні компоненти, які формують інфраструктуру комп'ютерної або технологічної системи. До нього належать процесори, модулі пам'яті, пристрої зберігання даних, інтерфейси введення/виведення, мережеві елементи та інші електронні й механічні складові, що забезпечують функціонування системи.

Програмне забезпечення системи (ПЗ) охоплює програмні компоненти, призначені для управління апаратним забезпеченням і координації роботи всієї системи. Сюди відносяться операційні системи, утиліти, драйвери й інструментальні програми, які реалізують управління ресурсами, планування процесів, обробку операцій введення/виведення, захист даних і взаємодію з користувачем.

Системний контролер введення/виведення — це окремий модуль або компонент, відповідальний за обробку операцій введення та виведення, що забезпечує узгоджену взаємодію між апаратними пристроями та програмним забезпеченням системи.

Системний контролер введення/виведення (I/O Controller) забезпечує обробку даних між центральним процесором (CPU) та зовнішніми пристроями або інтерфейсами. Він керує потоками даних до пристроїв

введення (клавіатури, миші, датчики) та пристроїв виведення (дисплеї, принтери, виконавчі механізми), а також може підтримувати зв'язок із зовнішніми системами чи мережами.

Інкрементна розробка системи ґрунтується на ітераційному підході, характерному для системного інжинірингу та розробки програмного забезпечення. Такий підхід передбачає створення системи невеликими керованими кроками (ітераціями), де кожен крок додає або розширює функціональні можливості.

Основні переваги інкрементної моделі:

- поступове нарощування функціональності;
- можливість отримання раннього зворотного зв'язку від користувачів і стейкхолдерів;
- адаптивність до змінних вимог і пріоритетів;
- зниження ризиків за рахунок регулярної перевірки проміжних результатів.

Мета цього підходу полягає в тому, щоб на регулярних етапах забезпечувати корисні доповнення до системи, підвищуючи її цінність для кінцевих користувачів і створюючи умови для своєчасного виявлення недоліків.

Коли розробників просять «розробити наступний крок системи», це означає продовження роботи над її удосконаленням: додавання нових функцій, оптимізація наявних можливостей, усунення помилок та випуск оновленої версії, яка створює додаткову цінність у порівнянні з попереднім приростом.

Упродовж життєвого циклу проєкту ключову роль відіграють агенти, що змінюють стан інженерної системи. На рисунку 2.3 у лівій колонці відображені основні етапи життєвого циклу: визначення системи, початковий розвиток операційних можливостей, експлуатація та виведення з експлуатації. До середовища проєкту входять такі агенти, як системні інженери, системні розробники та зовнішні органи управління проєктом.

У контексті керування змінами важливу роль відіграють зацікавлені сторони (користувачі, власники), які можуть ініціювати зміни. Такі пропозиції потребують узгодження із розробниками системи, а посередницьку функцію виконують системні інженери. Процес передбачає переговори, у яких враховується взаємозалежність ініціатив і зустрічних рішень шляхом двосторонньої комунікації.

Діаграма «агент – діяльність – артефакт» наочно ілюструє складні взаємодії між учасниками. Наприклад, зацікавлені сторони можуть ініціювати зміни у відповідь на зовнішні збої чи конкурентні загрози. Ці пропозиції обговорюються й аналізуються у співпраці з розробниками, а системні інженери забезпечують вибір оптимальних і взаємовигідних рішень.

## Електротехнічний інжиніринг

Електротехнічний інжиніринг — це галузь інжинірингу, зосереджена на розробленні, проектуванні, виготовленні та експлуатації електротехнічних систем, пристроїв і обладнання.

Сфера діяльності електротехнічного інжинірингу охоплює:

- проектування та розроблення електричних систем і мереж (електропостачання, передача електроенергії, освітлення, системи автоматизованого керування та безпеки);
- виготовлення й монтаж електротехнічного обладнання (генератори, трансформатори, розподільчі пристрої, щити управління, кабельні системи);
- технічне обслуговування, модернізацію та ремонт електротехнічних установок;
- впровадження технологій енергоефективності та інтеграцію відновлюваних джерел енергії;
- виконання інженерних розрахунків і системного аналізу для забезпечення безпеки, надійності та сталості електроустановок.

Електротехнічний інжиніринг є невід'ємною складовою багатьох галузей — енергетики, будівництва, автомобілебудування, виробництва електроніки тощо.

Проектування електропостачання та електроосвітлення здійснюється з урахуванням вимог і потреб користувачів та включає: визначення необхідних параметрів освітлення й електроживлення, розрахунок навантажень, вибір відповідних пристроїв і компонентів, а також розроблення схем і мереж живлення для забезпечення безперервності подачі електроенергії.

Ключовими аспектами проектування є ефективність, надійність та безпека електротехнічних систем. Вони досягаються шляхом дотримання стандартів і нормативів, виконання інженерних розрахунків, впровадження заходів захисту, резервування та заземлення, а також використання якісних матеріалів і сучасних компонентів.

Електротехнічний інжиніринг також охоплює питання енергоефективності та сталого розвитку, що передбачає раціональне використання електроенергії, інтеграцію енергоощадних технологій і відновлюваних джерел енергії, а також застосування систем моніторингу для дотримання екологічних стандартів.

Під час виконання проєктів силового електрообладнання необхідно дотримуватися комплексу вимог, які гарантують ефективність, надійність і безпеку роботи системи. Основні з них:

- Безпека – проектування має враховувати захист обладнання, персоналу та користувачів. Це передбачає правильний вибір захисних пристроїв, організацію заземлення, надійну ізоляцію та суворе дотримання правил електробезпеки.

- Надійність і безперервність живлення – забезпечується правильним розрахунком навантажень, використанням якісних і перевірених компонентів, наявністю резервних засобів та можливістю оперативного ремонту.

- Енергоефективність – досягається оптимальним використанням електричних ресурсів через застосування продуктивних компонентів, зниження енергетичних втрат, впровадження енергозберігаючих технологій і систем керування навантаженням.

- Зручність і безпечність експлуатації – система має бути зрозумілою в управлінні, доступною для обслуговування та безпечною у використанні.

- Відповідність стандартам і нормам – обладнання повинно відповідати чинним електротехнічним стандартам та нормативним документам, що регламентують якість, надійність і безпеку.

- Економічна доцільність – передбачає мінімізацію витрат на придбання обладнання, його експлуатацію, технічне обслуговування та ремонт.

Дотримання зазначених вимог забезпечує оптимальну роботу силового електрообладнання, сприяє підвищенню його ефективності, надійності та довговічності.

Технічне завдання (ТЗ) при проектуванні силового електрообладнання визначає ключові вимоги та параметри, необхідні для успішної реалізації проєкту. Початковий етап роботи включає ознайомлення з умовами будівельних споруд, технологічним та механічним обладнанням, що становлять потенційні складові майбутньої системи.

У процесі виконання проєкту відповідно до ТЗ основні завдання вирішуються у такій послідовності:

- Розрахунок і вибір електрообладнання.

Головна мета – визначити оптимальний склад обладнання, що відповідає заданим вимогам щодо потужності, функціональності, надійності, економічності та енергоефективності. На цьому етапі обираються електродвигуни, перетворювачі, комутаційні апарати та інші компоненти системи.

- Вибір розподільних мереж і мереж живлення.

Визначається структура та параметри електричних мереж, обираються кабельні системи, пристрої захисту, вимикачі, розподільчі щити та інші елементи. Завданням є забезпечення оптимального розподілу електроенергії, безпеки та надійності живлення у робочих умовах.

- Вибір систем автоматизації та керування технологічними процесами.

Формується рішення щодо систем автоматичного керування, що забезпечують контроль і управління роботою обладнання: системи освітлення, контролю доступу, моніторингу та керування електропостачанням

тощо. Вибір базується на вимогах до функціональності, ефективності та безпеки.

– Прийняття конструктивних рішень.

Розробляються детальні проекти розташування обладнання, монтажу інформаційних та електричних мереж. Враховуються вимоги до просторової організації, електробезпеки, зручності обслуговування та надійності експлуатації.

Таким чином, проектування силового електрообладнання є послідовним процесом, що починається з розрахунків і вибору обладнання, продовжується проектуванням мереж та систем управління і завершується конструктивними рішеннями щодо монтажу. Такий підхід забезпечує створення оптимальної, функціональної та безпечної системи, яка відповідає технічним і експлуатаційним вимогам проекту.

### Інжиніринг електромеханічних систем

Інжиніринг електромеханічних систем охоплює сукупність професійних дій і методів, спрямованих на розроблення, проектування, виробництво та експлуатацію систем, які поєднують електричні, механічні та комп'ютерні технології. Галузь орієнтована на створення й оптимізацію складних технічних рішень, у яких взаємодіють електромеханічні компоненти та системи керування.

Процес інжинірингу електромеханічних систем включає такі основні етапи:

- аналіз вимог до системи;
- проектування та моделювання структурних і функціональних рішень;
- виготовлення окремих компонентів та інтеграція системи;
- тестування й перевірка відповідності технічним вимогам;
- впровадження в експлуатацію;
- підтримка та технічне обслуговування протягом життєвого циклу.

Такий підхід потребує широкого комплексу знань і навичок у галузях електротехніки, механіки, електроніки, програмування та автоматизації, що забезпечує інтегрований характер професійної діяльності.

Інжиніринг електромеханічних систем має широке застосування в різних галузях, зокрема:

- автомобілебудуванні — розроблення систем керування, приводів, електроніки безпеки;
- промисловій автоматизації — створення роботизованих комплексів, виробничих ліній і систем автоматизованого керування;
- біомедичній техніці — проектування медичних приладів і систем діагностики;
- робототехніці — розробка мобільних та промислових роботів;
- споживчій електроніці — виробництво побутових пристроїв, електронних гаджетів, систем «розумного дому».

Застосування методів інжинірингу електромеханічних систем забезпечує підвищення ефективності, надійності та функціональності сучасних технічних рішень..

Розробка електроприводів електротехнічних комплексів з використанням стандартних засобів автоматизації.

Розроблення автоматизованих електроприводів для електротехнічних та електромеханічних комплексів із використанням стандартних (типових) засобів має низку важливих переваг. Такий підхід дозволяє:

- скоротити час і витрати на проектування систем електроприводу;
- спростити інтеграцію компонентів;
- забезпечити швидке впровадження проєктів у виробництво.

Застосування типових засобів сприяє стандартизації та уніфікації систем електроприводу, що полегшує їх обслуговування, заміну запасних частин та проведення модернізації.

Цей підхід особливо ефективний у масовому виробництві, де однакові компоненти можуть застосовуватися для різних механізмів і комплексів. Це забезпечує додаткову економію витрат на закупівлю, виготовлення й експлуатацію обладнання.

Крім того, використання стандартних рішень дозволяє досягти високої надійності та підтримувати стабільні, уніфіковані характеристики систем електроприводу.

Процес створення автоматизованих електроприводів для механізмів, машин та електротехнічних комплексів із застосуванням типових засобів потребує знань у галузях електротехніки, автоматики, механіки, програмування та системного проєктування. Його метою є розроблення оптимальних технічних рішень, що відповідають вимогам замовника та забезпечують ефективну й надійну роботу обладнання.

Основні етапи створення автоматизованих електроприводів:

- Аналіз вимог і визначення параметрів.

Проводиться дослідження потреб замовника, формуються вимоги до функціональності, продуктивності, безпеки та експлуатаційних характеристик майбутньої системи електроприводу.

- Вибір типових засобів.

Основний акцент робиться на використанні стандартизованих елементів (електродвигуни, контролери, регулятори, частотні перетворювачі, кабельні системи, датчики тощо). Вибір ґрунтується на їх доступності, надійності, економічній доцільності та зручності у застосуванні.

- Проєктування системи електроприводу.

Розробляються інженерні рішення: складаються електричні схеми, виконується розрахунок потужності, обирається необхідне обладнання,

здійснюється підбір і інтеграція компонентів для досягнення заданих функцій та характеристик.

- Монтаж і впровадження.

Здійснюється встановлення обладнання, підключення до електричної мережі, налаштування й перевірка працездатності системи. Завершальним етапом є введення електроприводу в експлуатацію з організацією технічної підтримки та подальшого обслуговування.

Більшість завдань із розроблення нових або модернізації існуючих електромеханічних систем для конкретних об'єктів можуть бути реалізовані із застосуванням типових уніфікованих засобів електроприводу та елементів автоматизації. Це дозволяє скоротити терміни розробки, зменшити витрати та забезпечити уніфікацію технічних рішень.

Структура автоматизованого технологічного комплексу змішувача на базі багатодвигунної електромеханічної системи наведена на рисунку 2.4. Комплекс включає:

- три нерегульовані шнекові дозатори, які забезпечують подачу вихідних компонентів;
- електродвигун змішувача, продуктивність якого регулюється за допомогою частотного перетворювача.

Таке рішення забезпечує гнучке керування продуктивністю технологічного комплексу, підвищує його енергоефективність і дозволяє адаптувати роботу обладнання до вимог технологічного процесу.

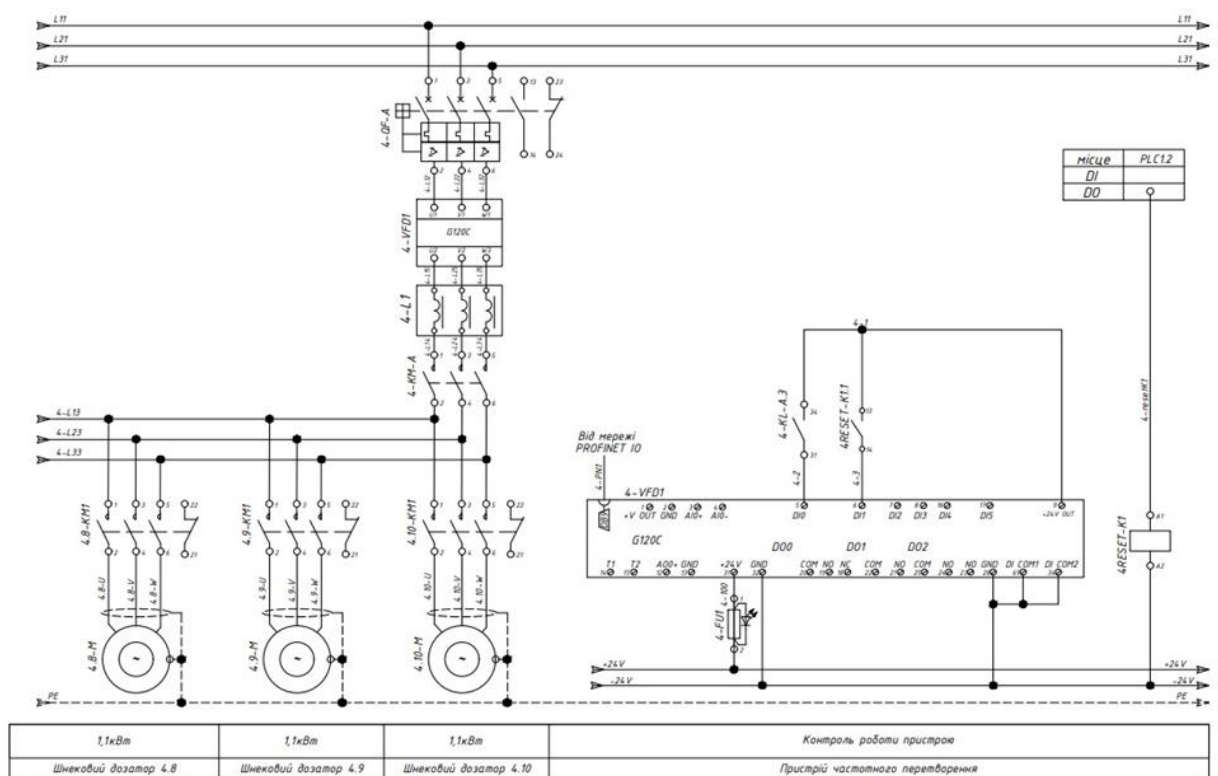


Рисунок. 2.4 - Типова структура автоматизованого технологічного комплексу дозування

Типова структура багатодвигунного автоматизованого електроприводу може містити такі основні компоненти:

- Джерело живлення – електрична мережа змінного або постійного струму, від якої живляться електродвигуни та інші елементи системи.

- Електродвигуни – перетворюють електричну енергію в механічну, забезпечуючи рух механізмів та вузлів комплексу. У складі багатодвигунного електроприводу може застосовуватися кілька двигунів, кожен з яких має індивідуальне керування.

- Регулятори обертів – здійснюють керування роботою електродвигунів, подають необхідну кількість електроенергії, регулюють швидкість обертання чи переміщення відповідно до вимог технологічного процесу.

- Датчики – вимірюють ключові параметри системи (швидкість, потужність, температуру, тиск тощо). Отримані дані передаються до контролера системи автоматизації або безпосередньо до регуляторів обертів для аналізу й прийняття рішень.

- Комунікаційна мережа – забезпечує обмін інформацією між елементами електроприводу та системою верхнього рівня. Може ґрунтуватися як на провідних, так і на бездротових технологіях передачі даних.

- Програмне забезпечення – встановлюється на контролерах системи автоматизації або на комп'ютерах систем збору даних. Використовується для керування режимами роботи електроприводу, діагностики, налаштування параметрів, моніторингу стану системи й збору інформації для подальшого аналізу.

Загальні принципи розрахунку та проектування автоматизованих електроприводів полягають у визначенні параметрів електродвигуна та системи керування відповідно до умов роботи технологічного обладнання.

Розрахунок автоматизованого електроприводу включає:

- визначення необхідної потужності електродвигуна;
- розрахунок максимального крутного моменту, що забезпечує роботу механізму;

- врахування режимів роботи обладнання (тривалий, короткочасний, повторно-короткочасний тощо);

- побудову та аналіз швидкісних і навантажувальних діаграм.

Вибір системи електроприводу здійснюється з урахуванням таких факторів:

- тип і параметри електричної мережі;
- необхідна споживана потужність;
- діапазон робочих швидкостей;
- умови експлуатації та режими роботи;
- перевантажувальна здатність електродвигуна та вимоги до надійності.

Таким чином, правильний розрахунок і обґрунтований вибір системи електроприводу є ключем до забезпечення ефективності, надійності та довговічності технологічного обладнання.

При розрахунку, виборі та проектуванні автоматизованих електроприводів необхідно дотримуватись послідовності дій, що забезпечують правильність інженерних рішень і надійність роботи системи:

- Визначення вимог до системи.

Формулюються вимоги щодо точності позиціонування, динамічних характеристик, діапазону регулювання, умов експлуатації та технологічних обмежень. Це ключовий етап, що задає вихідні параметри для розрахунків.

- Вибір типу електродвигуна.

Залежно від завдання визначається оптимальний тип двигуна (асинхронний, синхронний, кроковий, безколекторний або колекторний). Вибір здійснюється за критеріями споживаної потужності, точності керування, енергоефективності та вартості.

- Вибір регулятора обертів.

Враховується характер живлення (AC/DC), необхідний діапазон регулювання, функціонал (ШИМ, ПІД-регулювання технологічних параметрів, наявність мережевих протоколів комунікації, можливості ПЗ для налаштування та моніторингу).

- Розрахунок передаточних відношень.

Визначаються оптимальні коефіцієнти передачі за моментом і швидкістю для узгодження параметрів електродвигуна з характеристиками кінцевого механізму.

- Урахування параметрів живлення.

Проводяться розрахунки потужності, напруги та струму, вибираються кабельні провідники й оцінюється номінальна потужність системи електропостачання з урахуванням вимог безпеки та ефективності.

- Вибір режимів керування.

Перевіряється наявність у регуляторі можливостей векторного керування швидкістю, моментом чи положенням, а також можливість роботи у режимі сервокерування із застосуванням датчика швидкості.

- Розрахунок і встановлення захисту.

Система обладнується пристроями захисту від перевантажень, перегріву, перенапруг, міжфазних і замикань на землю, з урахуванням чинних нормативів з електробезпеки.

- Інтеграція та випробування.

Перед введенням у експлуатацію здійснюється інтеграція всіх компонентів системи, проведення комплексних випробувань і перевірка відповідності технічним вимогам.

У випадку застосування систем з асинхронними короткозамкненими двигунами або синхронними двигунами з електромагнітним збудженням при асинхронному пуску може виникати перевантаження електричної

мережі. Це пов'язано з високими пусковими струмами, характерними для короткозамкнених асинхронних двигунів та режиму асинхронного пуску синхронних машин.

Для зниження навантаження на електромережу та забезпечення її стабільності застосовують такі технічні рішення:

- Пристрої плавного пуску – забезпечують поступове підвищення напруги та струму, що дає можливість запускати двигун без різких стрибків навантаження на мережу.

- Частотні перетворювачі – дозволяють керувати швидкістю і струмом двигуна шляхом регулювання частоти живлення. Це зменшує пускові струми та навантаження на систему електропостачання.

- Компенсуючі пристрої – батареї конденсаторів або компенсатори реактивної потужності, які знижують споживання реактивної потужності та стабілізують роботу мережі.

- Розрахунок та аналіз параметрів електричної мережі – необхідно враховувати усі пускові струми та навантаження. За потреби виконуються заходи з підвищення потужності мережі: заміна трансформаторів, збільшення перерізів кабелів або встановлення додаткового компенсуючого обладнання.

Таким чином, правильний вибір методів пуску і засобів компенсації дозволяє запобігти перевантаженню мережі, знизити пускові струми та забезпечити стабільність роботи електросистеми.

Техніко-економічне порівняння редукторного приводу та безредукторного тихохідного двигуна базується на оцінці таких параметрів, як ефективність, габарити й маса, точність роботи, вартість та ремонтпридатність. Вибір конкретного рішення залежить від вимог проєкту, бюджету та пріоритетів замовника.

- Ефективність.

Редукторні приводи мають додаткові втрати енергії в зубчастих передачах. Натомість безредукторні тихохідні двигуни зазвичай характеризуються вищою ефективністю, оскільки передача потужності здійснюється безпосередньо на вихідний вал.

- Габарити й маса.

Редукторні системи потребують більшого монтажного простору через наявність редуктора. Безредукторні двигуни, як правило, компактніші й легші.

- Точність.

Безредукторні приводи забезпечують вищу точність завдяки відсутності люфтів і зазорів у механічних передачах, що важливо, наприклад, для задач високоточного позиціонування. Редукторні приводи простіші в налаштуванні та експлуатації.

- Вартість.

Виготовлення безредукторних тихохідних двигунів потребує значних витрат, що робить їх дорожчими. Редукторні приводи є економічно доступнішими завдяки поширеності та нижчій вартості комплектуючих.

– Ремонтпридатність і обслуговування.

Редукторні рішення простіше в обслуговуванні, а заміна або ремонт окремих вузлів виконується швидше. Для безредукторних двигунів питання заміни в Україні ускладнене через обмежену поширеність, що може призводити до значних економічних втрат у безперервнопотоківих виробництвах.

Загалом, перехід до безредукторних електроприводів і мехатронних модулів є перспективним напрямом розвитку приводної техніки. Водночас практичний вибір має враховувати як технічні переваги, так і ризики, пов'язані з вартістю та доступністю сервісної підтримки.

Вибір системи електроприводу потребує врахування характеру навантаження робочого механізму: воно може бути стабільним, нерівномірним, пульсуючим або супроводжуватися значними струмовими піками.

У системах з нерівномірними чи пульсуючими навантаженнями керування вирівнюванням моменту двигуна є складним завданням. Для зниження коливань часто доводиться збільшувати механічну інерцію, що водночас зменшує швидкодію приводу.

У випадках, коли у навантаженні виникають піки струму, необхідна додаткова перевірка стійкості приводу до перевантажень. Якщо система не здатна їх витримати, встановлюються засоби захисту або застосовуються системи керування, які обмежують струм і момент двигуна, а також компенсують динамічні навантаження в механічних передачах (наприклад, у екскаваторних приводах) чи в пружних елементах (підйомні машини, стрічкові конвеєри).

У сучасних проєктах нового технологічного обладнання переважно застосовуються автоматизовані електроприводи змінного струму. Їхня частка постійно зростає, тоді як електроприводи постійного струму нині становлять лише незначну частку. Це відображає загальний тренд до використання систем змінного струму, що забезпечують більшу гнучкість і продуктивність у порівнянні з приводами постійного струму.

У проєктах з модернізації обладнання в Україні виникають труднощі через наявність застарілих систем регульованих електроприводів постійного струму, що базуються на застарілих технологіях управління. Це спричиняє високі витрати електроенергії у процесах, де потрібне глибоке регулювання швидкості. Для підвищення продуктивності та енергоефективності доцільно розглядати заміну застарілих систем на сучасні електроприводи змінного струму або впровадження нових технологічних рішень, спрямованих на оптимізацію промислових процесів.

У практиці промислової експлуатації застосовуються чотири основні підходи до модернізації автоматизованих електроприводів, спрямовані на підвищення їх ефективності, надійності та функціональності:

- Заміна аналогових і релейно-контактних систем керування цифровими – перехід на сучасні системи з використанням мікропроцесорної техніки, що забезпечує гнучкість і точність управління.
- Використання мікропроцесорних вузлів для управління електроприводами постійного струму – оновлення систем керування з підвищенням рівня автоматизації та оптимізації режимів роботи.
- Заміна тиристорних блоків комплектних електроприводів транзисторними ШІМ-перетворювачами – підвищення енергоефективності, зниження рівня гармонічних спотворень та покращення керованості системи.
- Повна модернізація на основі електроприводів змінного струму – впровадження сучасних синхронних та асинхронних двигунів із цифровими системами керування, що забезпечує найвищий рівень надійності, гнучкості та продуктивності.

Ці підходи дозволяють адаптувати існуюче обладнання до сучасних вимог промисловості та значно підвищити його конкурентоспроможність.

#### Оцінка і визначення оптимального варіанту системи

У процесі проєктування складних електромеханічних систем часто виникає ситуація, коли існує кілька незалежних критеріїв якості, які не завжди узгоджуються між собою.

Наприклад, система повинна одночасно:

- забезпечувати максимальну динамічну точність регульованих змінних (швидкість, момент, продуктивність, тиск, напір тощо);
- мінімізувати споживання електроенергії як у перехідних, так і в сталих режимах;
- мати мінімальну вартість;
- гарантувати заданий рівень надійності.

Оскільки ці критерії можуть суперечити один одному, для прийняття рішень застосовуються узагальнені критерії якості, які дозволяють комплексно врахувати всі показники.

Саме такий підхід лежить в основі вибору структури електромеханічної системи, а також засобів і алгоритмів її управління серед багатьох можливих варіантів.

Для визначення оптимального варіанту системи необхідно:

- ретельно вивчити вимоги проєкту, включаючи потужність, швидкість, точність, навантаження, ефективність, розмір, вагу, робочі умови та інші фактори;
- дослідити різні технічні варіанти систем, такі як різні типи приводів, компонентів, технологій та конфігурацій;
- встановити критерії для оцінки кожного варіанту;
- провести ранжування і ваговий аналіз, використовуючи числові методи, такі як аналіз балів, аналітична ієрархічна процедура (АНП) або інші методи ранжування, щоб встановити значимість кожного критерію.

- провести оцінку економічних аспектів кожного варіанту, включаючи вартість компонентів, встановлення, обслуговування, енергоспоживання, тривалість експлуатації, потенційний дохід або заощадження;
- порівняти та вибрати оптимальний варіант, зібрати інформацію, проведеної оцінки та аналізу для кожного варіанту;
- перевірити вибраний варіант системи, враховуючи технічну реалізованість, наявність компонентів на ринку, технічні можливості замовника та інші важливі фактори.

#### Синтез засобів електромеханічних систем

Синтез засобів електромеханічних систем передбачає поетапну розробку та реалізацію компонентів, їх інтеграцію й тестування з метою створення оптимальних технічних рішень.

Під час синтезу враховуються вимоги щодо:

- ефективності роботи системи,
- надійності та довговічності,
- енергоефективності,
- а також інших технічних і експлуатаційних характеристик, визначених завданням проєкту.

Процес синтезу охоплює вибір і поєднання компонентів, матеріалів, технологій і конструктивних рішень для досягнення заданих параметрів і функціональності. Важливо враховувати не лише роботу окремих вузлів, а й їх взаємодію в межах інтегрованої системи.

Для досягнення оптимального результату застосовуються різні методи й підходи, серед яких:

- математичне моделювання для прогнозування поведінки системи;
- оптимізація параметрів для підвищення ефективності;
- технічний аналіз для оцінки працездатності та ризиків;
- експериментальні дослідження для підтвердження розрахункових результатів та валідації проєктних рішень.

Синтез електромеханічних систем є комплексним процесом, що поєднує інженерні знання, сучасні технології та системний підхід.

Аналіз об'єкта управління та варіантів побудови електромеханічної системи охоплює послідовність етапів, спрямованих на формування оптимального проєктного рішення:

- Визначення вимог до системи.

Формулюються функціональні параметри (точність позиціонування, швидкодія), експлуатаційні критерії (надійність, енергоефективність), а також додаткові фактори, що відображають потреби користувача та умови експлуатації.

- Вибір компонентів.

Виконується підбір електродвигунів, датчиків, виконавчих механізмів, контролерів та інших елементів, які відповідають технічним і якісним критеріям, з урахуванням вартості та доступності на ринку.

- Проектування концептуальної структури.

Розробляється загальна схема системи: визначаються основні компоненти, зв'язки між ними та принципи їхньої взаємодії. Застосовується декомпозиція й інтеграція для досягнення оптимальної ефективності.

- Розроблення алгоритмів керування.

Створюється логіка управління, алгоритми регулювання та керування режимами роботи. Особлива увага приділяється адаптивному керуванню, оптимальному розподілу навантажень і координації роботи всіх компонентів системи.

- Моделювання та симуляція.

Перед фізичною реалізацією здійснюється моделювання для перевірки правильності обраних алгоритмів і режимів роботи. Це дозволяє виявити потенційні проблеми та внести вдосконалення на ранніх етапах.

- Оцінка та затвердження системи.

Проводяться випробування й вимірювання для перевірки відповідності системи вимогам та специфікаціям. Результати документуються та затверджуються як остаточний етап синтезу...

Важливо підкреслити, що синтез засобів електромеханічних систем є ітеративним процесом. Після етапу оцінки та затвердження методів контролю можуть бути виявлені проблеми або визначені можливості для вдосконалення. У такому випадку необхідно повернутися до попередніх етапів проектування для внесення змін та уточнень.

Циклічність процесу дозволяє поступово вдосконалювати систему та повторювати цикл «проектування → моделювання → випробування» доти, доки не буде досягнуто оптимального результату, що відповідає технічним вимогам і потребам користувача.

Розробка систем автоматизації з децентралізованою архітектурою

У сучасному технологічному середовищі децентралізація є не лише трендом, але й ключовою концепцією у створенні систем автоматизації. Децентралізована архітектура передбачає розподіл функцій та контролю між окремими компонентами, що означає відхід від традиційної централізованої моделі до більш гнучкого й ефективного підходу.

Такі системи забезпечують взаємодію та обмін інформацією між вузлами без єдиного центру управління, що підвищує їх надійність, масштабованість та адаптивність.

Важливу роль у цьому процесі відіграє поетапна розробка систем автоматизації, яка охоплює:

- аналіз об'єкта управління;
- проектування та реалізацію окремих функцій;

- інтеграцію в єдину систему;
- впровадження нових функціональних завдань для розвитку.

Такий підхід дозволяє забезпечити не лише ефективність і точність автоматизованих рішень, але й їхню готовність до подальших змін, що підвищує загальну якість та продуктивність систем автоматизації у промисловості та інших галузях.

Основні етапи розробки систем автоматизації

- Аналіз об'єкта управління.

Визначаються функції майбутньої системи автоматизації, встановлюються вимоги до апаратно-програмного комплексу.

Результат: деталізована схема об'єкта управління з переліком датчиків і виконавчих механізмів.

- Розробка структури системи автоматизації.

Формуються характеристики апаратно-програмних засобів, описується функціонування системи, визначаються вимоги до алгоритмів і параметри локальної мережі.

Результат: структурна схема системи та вимоги до алгоритмів управління.

- Розробка схемної документації апаратної частини.

Виконується оцінка вартості, вибір оптимальних технічних рішень, забезпечення експлуатаційної надійності.

Результат: техніко-економічне обґрунтування та комплект схемної документації.

- Визначення складу програмних засобів.

Оцінюється вартість програмного забезпечення, визначається взаємодія між функціональними завданнями та інтерфейсами.

Результат: створене програмне забезпечення, інструкції та проведене ознайомлення персоналу з програмними продуктами.

- Оцінка працездатності й ефективності.

Перевіряються алгоритми в складі апаратно-програмних засобів, вносяться необхідні зміни для підвищення ефективності та надійності.

Результат: інструкція з експлуатації та діагностики системи автоматизації.

- Коректування програмних засобів.

Виконується налагодження та корекція програмного забезпечення відповідно до виявлених недоліків, уточнюється документація.

Результат: стабільне та надійне ПЗ з оновленою документацією.

- Формалізація функцій персоналу.

Розробляються посадові та виробничі інструкції для операторів і технічного персоналу з метою ефективного використання системи.

Результат: комплект регламентуючих документів для персоналу.

- Визначення шляхів розвитку системи.

Проводиться аналіз можливостей розширення та модернізації, узагальнюються напрями реалізації нових функцій.

Результат: перелік нових функціональних завдань і технічне завдання для подальшого розвитку системи.

#### Висновки.

– Системний інжиніринг (CI) є міждисциплінарним підходом, який забезпечує створення складних технічних систем шляхом інтеграції апаратних, програмних, організаційних і людських компонентів. Він охоплює всі етапи життєвого циклу системи — від формулювання вимог до виведення з експлуатації.

– Життєвий цикл системи передбачає поетапну реалізацію: аналіз вимог, проєктування, вибір і синтез компонентів, моделювання, інтеграцію, тестування, експлуатацію та модернізацію. Важливим є ітеративний характер цього процесу, що дозволяє вносити зміни та вдосконалення.

– Ключові критерії проєктування (точність, енергоефективність, надійність, вартість, ремонтпридатність) нерідко суперечать один одному, тому застосовуються узагальнені критерії та методи багатокритеріальної оптимізації (AHP, TOPSIS, Pareto-аналіз).

– Синтез електромеханічних систем ґрунтується на поєднанні інженерних знань з математичним моделюванням, оптимізацією й експериментальними дослідженнями. Особлива увага приділяється взаємодії компонентів у складі єдиної інтегрованої системи.

– Модернізація електроприводів та систем управління може здійснюватися поступово: від заміни релейно-контактних схем на цифрові до переходу на сучасні системи змінного струму з асинхронними та синхронними двигунами. Це дозволяє підвищити енергоефективність та продуктивність виробництва.

– Децентралізована архітектура набуває особливого значення в умовах Індустрії 4.0. Розподіл функцій між вузлами забезпечує гнучкість, масштабованість і стійкість систем, що актуально для великих промислових об'єктів.

– У галузі гірничо-металургійного комплексу (ГМК) системний інжиніринг знаходить застосування у створенні та модернізації:

- електроприводів конвеєрних ліній, підйомних машин і насосних станцій;
- систем автоматизації прокатних станів і доменних печей;
- енергоефективних мереж електропостачання підприємств.

Отже, системний інжиніринг і методологія життєвого циклу забезпечують комплексний підхід до проєктування та експлуатації технічних систем, підвищуючи їхню ефективність, надійність та конкурентоспроможність у сучасних виробничих умовах.

Контрольні питання до теми 2.

1. Що таке системний інжиніринг і яку роль він відіграє у проєктуванні складних технічних систем?
2. Які основні етапи життєвого циклу технічної системи ви можете назвати?
3. У чому полягає відмінність між централізованою та децентралізованою архітектурою систем автоматизації?
4. Які методи багатокритеріальної оцінки застосовуються для вибору оптимальної структури електромехатронної системи?
5. Назвіть основні підходи до модернізації автоматизованих електроприводів.
6. Чому процес синтезу електромеханічних систем вважається ітеративним?
7. Наведіть приклади застосування системного інжинірингу в гірничо-металургійному комплексі.

Використана література.

1. Інжиніринг електротехнічних та мехатронних систем : підруч. Для здобувачів ступеня магістра за спец. 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / А. В. Босак, А. В. Торопов, Л. В. Торопова; КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. 251 с.
2. The Guide to the Systems Engineering Body of Knowledge (SEBoK) : version 2.13 / N. Hutchison et. al. SEBoK, 2025. URL: [https://wikiworks-sebok-images.s3.amazonaws.com/main/2/23/Guide to the Systems Engineering Body of Knowledge v2.13.pdf](https://wikiworks-sebok-images.s3.amazonaws.com/main/2/23/Guide%20to%20the%20Systems%20Engineering%20Body%20of%20Knowledge%20v2.13.pdf)

## ТЕМА 3 ОРГАНІЗАЦІЙНО-ЕКОНОМІЧНІ ОСНОВИ ІНЖИНІРИНГОВОЇ ДІЯЛЬНОСТІ

Поняття бізнес-плану та його структура. Особливості бізнес-планування для нових виробничих об'єктів та при модернізації. Управління життєвим циклом промислового обладнання. Оцінка економічної доцільності інжинірингових рішень. Управління ризиками в інжинірингових проєктах. Методи контролю ефективності інвестицій у ГМК. Практичні приклади економічних рішень у системах електроприводу (енергозбереження, ремонт чи заміна обладнання).

Стратегія розробки нового обладнання та модернізації діючих технічних систем є одним із провідних напрямів технічного розвитку підприємства. Вона визначає основні тенденції інженерного вдосконалення, спрямовані на підвищення ефективності виробництва, зниження витрат, покращення якості продукції та забезпечення стабільної конкурентоспроможності на ринку.

Розробка стратегії є довгостроковим процесом, що поєднує інноваційний, економічний і виробничий аспекти діяльності підприємства. Її основна мета — забезпечити технічне оновлення виробничих фондів та підтримати актуальність технологічних процесів у відповідності до сучасних вимог галузі.

Завдання та значення стратегії

Стратегічне планування модернізації та створення нового обладнання дає змогу:

- визначити пріоритетні напрями технічного розвитку;
- оцінити ефективність існуючих технологічних процесів;
- розробити комплекс заходів щодо їх удосконалення;
- узгодити інвестиційні рішення з інженерними потребами виробництва;
- забезпечити стабільне функціонування та гнучке реагування підприємства на зміни ринку.

Завдяки чітко визначеній стратегії підприємство отримує можливість планомірного розвитку, оптимального використання ресурсів та своєчасного оновлення матеріально-технічної бази.

Бізнес-план як основа стратегічного розвитку

Одним із базових документів, який конкретизує стратегічні напрями технічного розвитку, є бізнес-план.

Він містить:

- опис мети діяльності підприємства;
- постановку коротко- і довгострокових цілей;
- аналіз ринкових умов і ресурсних можливостей;
- стратегії інноваційного розвитку;
- фінансове обґрунтування модернізаційних заходів.

Бізнес-план виступає основним інструментом прийняття управлінських рішень, а також базою для залучення інвестицій, визначення термінів реалізації проектів і контролю досягнення поставлених цілей.

#### Етапи реалізації бізнес-плану

Успішна реалізація бізнес-плану технічного розвитку підприємства передбачає послідовне проходження ряду етапів, кожен з яких має важливе значення для досягнення кінцевої мети — створення конкурентоспроможного продукту або вдосконалення діючої техніки.

Основні етапи включають:

1. Маркетингове дослідження ринку. Передбачає аналіз сучасних тенденцій, вивчення структури попиту та пропозиції, визначення конкурентів, аналіз потреб споживачів та потенційних сегментів ринку.
2. Визначення цільової аудиторії. Необхідно встановити, хто є основним користувачем продукції, які його очікування, вимоги та фінансові можливості.
3. Формування концепції продукту або послуги. Визначаються ключові технічні характеристики, параметри якості, рівень інноваційності, які забезпечують привабливість обладнання на ринку.
4. Порівняльний аналіз технологій конкурентів. Дає змогу визначити технічні та економічні переваги майбутнього продукту, вибрати оптимальні рішення для власного виробництва.
5. Оцінка вимог споживачів. Визначаються критерії якості, допустимий рівень цін, бажані терміни експлуатації, умови обслуговування та сервісу.

#### Розробка нового обладнання

При створенні нового обладнання розглядають такі послідовні кроки:

1. Формулювання цілей. Визначаються проблеми, які має вирішувати новий виріб: підвищення продуктивності, автоматизація процесів, зменшення енерговитрат тощо.
2. Технічний опис обладнання. Складається детальна характеристика конструкції, функціональних можливостей, технічних параметрів, особливостей роботи та відмінностей від існуючих аналогів.
3. Розробка бізнес-моделі. Модель визначає механізм отримання прибутку — продаж обладнання, надання сервісних послуг, оренду чи технічний супровід.
4. План впровадження. Включає розроблення конструкторської документації, виготовлення дослідного зразка, проведення випробувань, організацію виробництва, навчання персоналу та підготовку інфраструктури.
5. Фінансовий аналіз. Проводиться оцінка витрат на розробку, виготовлення, постачання, прогноз доходів, визначається очікуваний прибуток і термін окупності інвестицій.

## Модернізація існуючого обладнання

Модернізація передбачає вдосконалення наявних технічних засобів для продовження їхнього життєвого циклу та підвищення ефективності. Основні етапи цього процесу:

1. Обґрунтування необхідності модернізації. Визначається, чи виправдані витрати на оновлення, чи доцільніше створення нового обладнання.
2. Аналіз технічного стану. Оцінюються конструктивні недоліки, рівень зносу, втрати енергії, частота відмов і витрати на експлуатацію.
3. Проєктування технічних змін. Передбачає удосконалення окремих вузлів, впровадження сучасних матеріалів, оновлення систем керування, автоматизацію технологічних процесів.
4. Оцінка очікуваних результатів. Визначаються переваги від модернізації: зростання продуктивності, зниження енерговитрат, поліпшення якості продукції, зменшення витрат на обслуговування.
5. Фінансове обґрунтування. Проводиться розрахунок витрат на оновлення, прогноз економії ресурсів, прибутковості та строку окупності проєкту.

## *Маркетингові дослідження*

Маркетингові дослідження — це систематичний процес збору, обробки та аналізу інформації про ринок, споживачів, конкурентів і зовнішнє середовище підприємства.

Метою цих досліджень є отримання достовірних даних для прийняття ефективних управлінських рішень, формування вимог до нового обладнання або визначення напрямів модернізації існуючих технічних систем.

Результати маркетингових досліджень дають змогу підприємству:

- розуміти потреби й очікування споживачів;
- виявляти тенденції розвитку ринку;
- визначати потенційні ніші та напрями інновацій;
- формувати обґрунтовану стратегію розвитку і просування продукції.

## *Основні етапи проведення маркетингових досліджень*

*Маркетингові дослідження є поетапним процесом, який зазвичай включає:*

1. *Визначення цілей дослідження. Формується мета та завдання, які необхідно вирішити, наприклад: виявлення потреб споживачів у новому типі обладнання чи оцінка доцільності модернізації існуючих установок.*
2. *Планування дослідження. Визначаються методи збору інформації (опитування, інтерв'ю, спостереження, аналіз вторинних джерел), розробляється анкета або план спостережень.*

3. *Збір даних. Проводяться маркетингові опитування, аналізуються технічні характеристики конкурентних продуктів, досліджуються тенденції галузі та статистика продажів.*

4. *Аналіз і узагальнення інформації. Отримані дані систематизуються, інтерпретуються, визначаються закономірності, тенденції та ключові фактори впливу на попит.*

5. *Формулювання висновків і рекомендацій. На основі аналізу формулюються пропозиції щодо вдосконалення або створення нового обладнання, визначаються напрями інвестицій, технічні пріоритети та можливі ризики.*

6. *Підготовка звіту про дослідження. У підсумковому документі узагальнюються результати, надаються графіки, таблиці, прогнози, а також пропозиції для прийняття стратегічних рішень.*

Визначення потенційних покупців — це процес виявлення груп осіб або організацій, які можуть бути зацікавлені у придбанні нового або модернізованого обладнання.

Цей процес є важливою частиною маркетингового аналізу, адже він дозволяє зосередити зусилля підприємства на тих клієнтах, які мають найбільшу потребу в пропонованому продукті.

Основні завдання:

- вивчення потреб, поведінки та переваг цільової аудиторії;
- оцінка платоспроможності потенційних клієнтів;
- формування стратегій просування та продажу продукції.

Методи визначення потенційних покупців

Для ідентифікації цільової аудиторії використовуються такі методи:

1. *Маркетингові дослідження ринку. Збір і аналіз демографічних, поведінкових та економічних даних про споживачів, їх потреби та очікування.*

2. *Сегментація ринку. Поділ загальної маси споживачів на окремі групи (сегменти) за спільними характеристиками: вік, стать, місце проживання, рівень доходів, сфера діяльності, поведінкові особливості.*

3. *Створення профілю цільового споживача. Формування детального опису “типового покупця” — його мотивацій, цінностей, стилю життя, рівня освіти, професії тощо.*

4. *Аналіз конкурентів. Вивчення цільових аудиторій, з якими працюють конкуренти, а також виявлення незадіяних ринкових ніш.*

5. *Метод Buyer Persona. Розроблення декількох типових образів “ідеальних клієнтів” на основі реальних даних про поведінку, інтереси та цілі споживачів.*

6. *Збір і аналіз зворотного зв'язку. Вивчення відгуків, звернень і коментарів користувачів для вдосконалення продукту.*

7. Використання інструментів цифрової аналітики. Застосування веб-аналітики, аналітики соціальних мереж, фокус-груп, онлайн-опитувань для розуміння реальної поведінки споживачів.

Маркетингові дослідження — це основний аналітичний інструмент стратегічного планування технічного розвитку підприємства.

Вони дозволяють:

- мінімізувати ризики при створенні нового обладнання;
- забезпечити відповідність технічних характеристик потребам споживачів;
- підвищити ефективність виробництва;
- сформувати довгострокову конкурентну перевагу.

#### Приклад.

Маркетингові дослідження у сфері електромеханічного обладнання охоплюють широкий спектр напрямів, зокрема аналіз ринку “розумних” електроприводів — сучасних систем керування електродвигунами, інтегрованих у цифрові виробничі комплекси.

Такі дослідження спрямовані на:

- визначення основних виробників і постачальників електроприводів;
- аналіз структури ринку за типами продукції (приводи змінного струму, постійного струму, сервоприводи);
- оцінку попиту за галузями кінцевого використання (енергетика, транспорт, хімічна, металургійна, харчова промисловість тощо);
- географічний розподіл виробництва й споживання;
- формування прогнозу розвитку ринку у коротко- та середньостроковій перспективі.

Структура ринку розумних електроприводів

1. За типом приводу:

- *Приводи змінного струму (AC)* — найбільш поширені завдяки універсальності та енергоефективності; застосовуються у системах транспортування, насосних і вентиляторних установках.
- *Приводи постійного струму (DC)* — використовуються там, де необхідне точне регулювання швидкості та крутного моменту, наприклад, у прокатних станах чи підйомних механізмах.
- *Сервоприводи* — забезпечують високоточне позиціонування й автоматизоване керування у робототехнічних системах і верстатах з ЧПК.

2. За рівнем напруги:

- низьковольтні (до 690 В);
- середньої напруги (1–10 кВ);
- високовольтні (понад 10 кВ, для спеціалізованих промислових установок).

3. За галузями кінцевого використання:

- видобуток і переробка нафти та газу;
- водопостачання і водовідведення;
- хімічна та нафтохімічна промисловість;
- харчова та напоїва промисловість;
- енергетика і теплогенерація;
- целюлозно-паперова та деревообробна промисловість;
- системи HVAC (опалення, вентиляція, кондиціонування повітря);
- металургійне виробництво;
- транспортні та гірничі комплекси.

#### Географічний аналіз ринку

Згідно з прогнозами аналітичних агентств:

- Азійсько-Тихоокеанський регіон у 2024 році був визнаний найбільш розвиненим ринком розумних електроприводів, що пояснюється активним ростом промисловості, урбанізацією та впровадженням концепцій “розумного виробництва” у країнах Китаю, Японії, Південної Кореї та Індії.
- У 2025 році очікується значне зростання ринку в країнах Африки, де спостерігається інтенсивний розвиток енергетики, водного господарства та інфраструктури. Африканський континент поступово стає новим напрямом індустріального зростання завдяки міжнародним інвестиціям і створенню локальних виробництв електромеханічного обладнання.

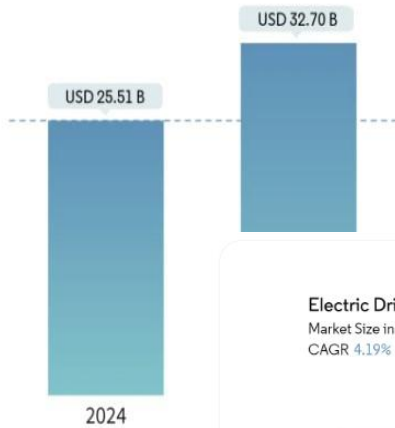
Маркетингове дослідження ринку “розумних” електроприводів демонструє:

- глобальний перехід промисловості до цифрових систем керування;
- збільшення попиту на енергоефективні рішення з можливістю віддаленого моніторингу та діагностики;
- зростання інтересу до автоматизованих приводних систем у країнах, що активно модернізують промисловість;
- посилення ролі регіонів, де формується нова промислова база — зокрема, Африки.

Ці тенденції визначають стратегічні напрями для підприємств, що займаються розробкою, виробництвом та інтеграцією електроприводів у сучасні інженерні системи.

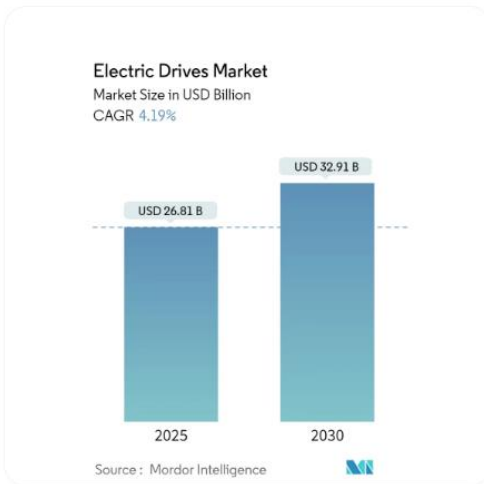
### Electric Drives Market

Market Size in USD Billion  
CAGR 5.10%



Source: Mordor Intelligence

Період дослідження	2019 - 2029 роки
Розмір ринку (2024)	25,51 мільярда доларів США
Розмір ринку (2029)	32,70 мільярда доларів США
CAGR (2024 - 2029)	5,10 %
Найшвидше зростаючий ринок	Азіатсько-Тихоокеанський регіон
Найбільший ринок	Азіатсько-Тихоокеанський регіон



Source: Mordor Intelligence

#### Market Overview

Study Period	2019 - 2030
Market Size (2025)	USD 26.81 Billion
Market Size (2030)	USD 32.91 Billion
Growth Rate (2025 - 2030)	4.19% CAGR
Fastest Growing Market	Africa
Largest Market	Asia Pacific
Market Concentration	Medium

#### Major Players



\*Disclaimer: Major Players sorted in no particular order

Рисунок 3.1 - Розміри ринку та прогнози щодо вироблення електроприводів

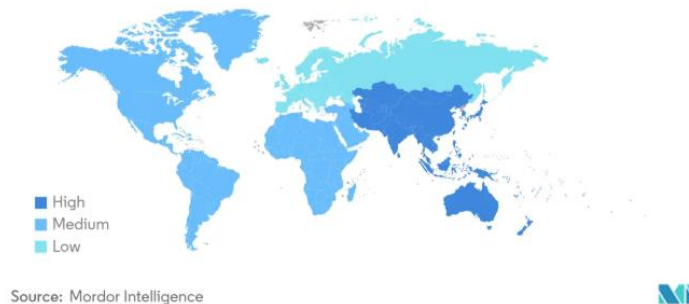


Рисунок 3.2 - Маркетингові дослідження з виробництва електроприводів по регіонам

### Приклад.

Електричні приводи мають критичне значення у ряді аспектів, таких як енергозбереження, підвищення продуктивності, спрощення систем та скорочення часу, коли ядерні реактори припиняють свою роботу. Наприклад, під час нормальної експлуатації, коли необхідно швидко охолодити активну зону реактора, декілька потужних рециркуляційних насосів з напругою 6 кВ працюють одночасно, контролюючи понад 100 параметрів. Цей аспект відіграє значну роль у загальних енерговитратах атомних електростанцій. Зниження витрат на електроенергію при цьому може сягнути 50%, що сприяє також зменшенню викидів CO<sub>2</sub>.

Також визначено, що електродвигуни відповідають за близько 65% електроенергії, споживаної у промисловості, відтак потенціал збереження енергії за допомогою низьковольтних двигунів у промисловості величезний. За прогнозами Exxon Mobil, до 2040 року глобальний попит на електроенергію сягне близько 35,3 петават-годин (рис. 3.3). Це сприятиме зростанню ринку протягом прогнозованого періоду.

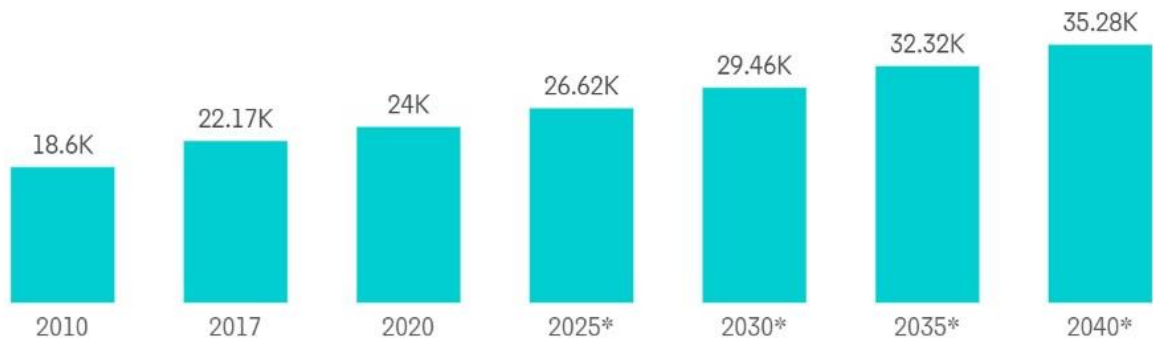


Рисунок 3.3 - Глобальний попит на електроенергію

### *Вивчення та порівняння технологій, використовуваних конкурентами*

Ринок електроприводів представлений компаніями-лідерами, такими як ABB Ltd, Siemens AG, Danfoss, Rockwell Automation Inc. і Schneider Electric SE, які використовують стратегії партнерства та інновацій для покращення продуктів та досягнення конкурентної переваги.

У 2023 році компанія Siemens представила нову систему сервоприводу SINAMICS S200, орієнтовану на високоточні технологічні процеси сучасної промисловості.

Основні характеристики:

- висока динаміка та точність позиціонування, що забезпечує стабільну роботу у швидких циклах автоматизації;
- сумісність з широким спектром сервомоторів і контролерів серії SIMATIC, що дозволяє інтегрувати систему у цифрові виробничі лінії;
- підтримка інтерфейсів реального часу для синхронізації руху у багатовісних системах;

- вбудовані алгоритми діагностики та захисту, які підвищують надійність і безпеку роботи.

### Лідери ринку електроприводів

- 1 ТОВ АББ
- 2 Siemens AG
- 3 Danfoss
- 4 Rockwell Automation Inc.
- 5 Schneider Electric SE

- 1 ABB Ltd
- 2 Siemens AG
- 3 Rockwell Automation Inc.
- 4 Schneider Electric SE
- 5 Danfoss A/S

\*Disclaimer: Major Players sorted in no particular order

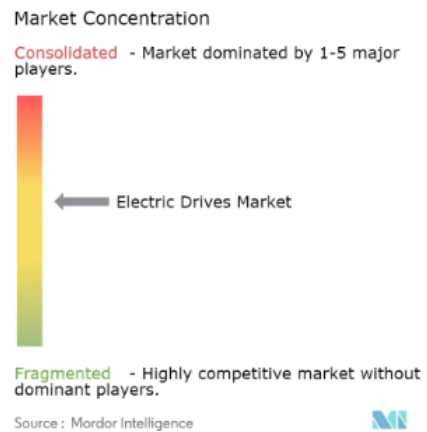
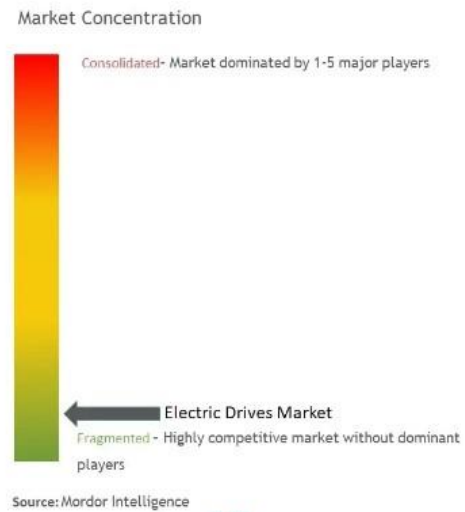


Рисунок 3.4 - Основні компанії з виробництва електроприводів

### Сфери застосування:

SINAMICS S200 знайшов широке використання у високоточному виробництві — зокрема, у галузі виготовлення акумуляторів, електроніки, робототехніки, автоматизованих пакувальних та збіркових ліній.

Система стала одним із прикладів реалізації концепції Smart Motion Control, де кожен елемент приводу є частиною цифрового екосистемного середовища Siemens Industry 4.0.

У цьому ж році компанія АББ випустила нову серію частотних перетворювачів середньої напруги — ACS2000 VFD (Variable Frequency Drive), потужністю від 400 до 1000 кВт.

Цей привід розроблений для важких промислових умов і характеризується:

- широким діапазоном вхідних напруг (до 6,9 кВ);
- високим ККД (понад 98%) завдяки сучасним схемам енергозбереження;

- модульною архітектурою для зручності обслуговування;
- низьким рівнем гармонік у мережі (відповідність стандартам IEEE 519);
- можливістю підключення до систем керування процесами через протоколи Modbus, Profibus, Ethernet/IP.

Основні галузі застосування:

- цементна промисловість;
- гірничодобувна та металургійна галузі;
- целюлозно-паперове виробництво;
- енергетика, хімічна, нафто- та газопереробна промисловість.

Завдяки універсальності та високим енергетичним характеристикам ACS2000 VFD став еталонним рішенням для модернізації потужних електроприводів технологічного обладнання у гірничо-металургійному комплексі.

На прикладі Siemens та ABB можна простежити основні тенденції розвитку сучасних електроприводів:

- перехід до цифрових “розумних” систем керування з інтеграцією у промислові мережі;
- орієнтація на енергоефективність та надійність роботи в умовах промислових навантажень;
- використання модульних архітектур для спрощення обслуговування та адаптації під різні типи машин;
- впровадження аналітичних функцій моніторингу стану обладнання в реальному часі (Predictive Maintenance);
- створення уніфікованих платформ приводів, що дозволяють масштабувати рішення під потреби конкретного підприємства.

*Аналіз вимог споживачів щодо якості, ціни, обсягу товару чи послуги.*

Аналіз вимог споживачів — це системний процес дослідження очікувань, пріоритетів і потреб клієнтів щодо продукції або послуг підприємства.

У контексті розробки та модернізації електромеханічного обладнання та систем електроприводу цей аналіз дозволяє:

- визначити ключові параметри, що мають найбільше значення для споживачів (якість, ціна, обсяг постачання, сервіс);
- адаптувати технічні рішення до специфіки експлуатаційних умов;
- сформулювати конкурентоспроможну цінову політику;
- підвищити задоволеність клієнтів і лояльність до бренду

Основні напрямки аналізу вимог

Процес вивчення вимог клієнтів охоплює такі аспекти:

1. Якість продукції — відповідність стандартам, технічним характеристикам і очікуванням споживачів.

2. Ціна — економічна доцільність придбання, співвідношення “ціна–якість”.

3. Обсяг і умови постачання — можливості постачальника задовольняти потреби клієнтів у необхідних кількостях, термінах і з належним сервісом.

#### Вимоги до якості

Якість є одним із головних чинників, що визначає успішність обладнання на ринку. Основні критерії якості електроприводів включають:

- Надійність і довговічність. Для промислових споживачів (особливо у гірничо-металургійній, автомобільній, цементній галузях) важливо, щоб електроприводи працювали безвідмовно протягом тривалого часу. Збої призводять до простоїв технологічних ліній і фінансових втрат.

*Приклад:* електроприводи доменних машин або прокатних станів повинні витримувати високі механічні навантаження та часті пуски без зниження ефективності.

- Енергоефективність. Оскільки витрати на електроенергію становлять значну частину експлуатаційних витрат підприємства, споживачі віддають перевагу приводам з оптимізованим енергоспоживанням. Енергоощадні системи дозволяють скоротити витрати, знизити викиди CO<sub>2</sub> і відповідати екологічним стандартам (ISO 50001, EN 50598).

- Продуктивність і точність. У галузях із високими вимогами до технологічної точності — таких як харчова, фармацевтична, пакувальна — необхідні приводи з можливістю точного регулювання швидкості, моменту та позиціонування.

*Приклад:* серводвигуни з цифровим управлінням забезпечують мікронну точність дозування чи переміщення механізмів.

#### Вимоги до ціни

Формування ціни на електроприводи залежить від складності конструкції, рівня автоматизації, використаних технологій і масштабів виробництва.

Основні принципи, якими керуються споживачі:

- Оптимальне співвідношення ціни та якості. Покупці прагнуть до економічно обґрунтованого вибору: не найдешевшого, а того, що забезпечує максимальну ефективність протягом тривалого періоду експлуатації.

*Наприклад:* підприємства, що реалізують довгострокові програми модернізації, віддають перевагу дорожчим, але більш енергоефективним приводам із мінімальними втратами потужності.

- Знижки за великі обсяги постачання. При серійних закупівлях електроприводів промислові клієнти розраховують на гнучку цінову політику. Постачальники, які пропонують дисконтні програми, підвищують привабливість своєї продукції на ринку B2B.

Вимоги до обсягів постачання та сервісу

- Гнучкість у постачанні. Виробники обладнання мають різні обсяги замовлень залежно від типу продукції та сезонності. Важливо, щоб постачальники могли оперативнo адаптуватися до змін у попиті, забезпечуючи безперервність виробничих процесів.

- Швидкість доставки. Для підприємств гірничо-металургійного комплексу, де технологічний цикл є безперервним, своєчасність поставок є критично важливою. Затримка може спричинити простої агрегатів, особливо у випадках аварійного ремонту.

- Сервісна підтримка. Окрім постачання обладнання, сучасні споживачі очікують комплексного технічного супроводу — монтажу, налаштування, навчання персоналу, післягарантійного обслуговування та швидкого усунення неполадок.

Це формує довіру до бренду та підвищує конкурентоспроможність виробника.

*Фактори, що впливають на ціноутворення*

1. *Вартість матеріалів. Підвищення цін на сировину (мідь, сталь, алюміній) безпосередньо впливає на собівартість електроприводів, оскільки ці матеріали становлять основну частину електричних машин.*

2. *Технологічні інновації. Впровадження нових матеріалів, сенсорів, енергоефективних алгоритмів керування збільшує початкові витрати на розробку, але забезпечує вищу продуктивність і зниження експлуатаційних витрат у майбутньому.*

3. *Попит і пропозиція. Ріст попиту на автоматизовані системи керування у промисловості, особливо на ринках, що розвиваються, може підвищувати ціни на приводи через збільшення завантаженості виробників.*

4. *Економічні умови. Валютні коливання, інфляційні процеси та геополітичні фактори впливають на ціноутворення через зміну вартості імпортованих компонентів, логістики й митних зборів.*

Практичне значення аналізу вимог споживачів

Розуміння очікувань клієнтів дозволяє:

- створювати продукцію, яка точно відповідає запитам ринку;
- підвищувати якість сервісу і рівень довіри до бренду;
- ефективно будувати стратегію продажів і маркетингу;
- удосконалювати технічні характеристики виробів з урахуванням реальних умов експлуатації;
- забезпечувати підвищення конкурентоспроможності на внутрішньому та міжнародному ринках.

## Висновки.

- Стратегія розробки нового обладнання та модернізації діючих технічних систем є ключовим інструментом технічного розвитку підприємства, спрямованим на підвищення ефективності виробництва та конкурентоспроможності.
- Бізнес-план виступає основним документом стратегічного планування, що визначає цілі, етапи, фінансові ресурси і ризики реалізації інжинірингових проєктів.
- Процес реалізації бізнес-плану передбачає проведення маркетингових досліджень, формування концепції продукту, технічного проєктування, розробку бізнес-моделі, фінансову оцінку та впровадження.
- Маркетингові дослідження дають змогу виявити тенденції розвитку ринку, визначити цільову аудиторію, оцінити попит на обладнання і скоригувати технічні рішення відповідно до потреб споживачів.
- Сучасний ринок електроприводів характеризується глобальним переходом до цифрових і енергоефективних систем керування, що реалізують концепції Industry 4.0.
- Прикладами новітніх розробок є система SINAMICS S200 від Siemens і перетворювач ACS2000 VFD від ABB, які демонструють тенденцію до підвищення енергоефективності, надійності та інтеграції у промисловій мережі.
- Аналіз вимог споживачів (якість, ціна, обсяг, сервіс) є базою для формування стратегії виробництва, ціноутворення та післяпродажного обслуговування.
- До основних факторів, що впливають на ціноутворення, належать вартість матеріалів, технологічні інновації, попит і пропозиція, а також макроекономічні умови.
- Розуміння очікувань клієнтів дозволяє підвищити рівень лояльності до бренду, оптимізувати технічні рішення і забезпечити сталий розвиток підприємства.

## Контрольні питання до теми 3.

1. Що розуміють під поняттям інжинірингова діяльність у промисловості?
2. Яке значення має стратегія розробки нового обладнання для технічного розвитку підприємства?
3. Які основні етапи реалізації бізнес-плану технічного розвитку підприємства?
4. У чому полягає роль бізнес-плану у стратегічному управлінні виробництвом?
5. Назвіть основні завдання маркетингового дослідження у сфері інжинірингу.
6. Які етапи включає процес маркетингових досліджень ринку технічного обладнання?

7. Які методи визначення потенційних покупців застосовуються під час дослідження ринку?
8. Які основні типи електроприводів розрізняють за принципом роботи та напругою живлення?
9. Які тенденції розвитку ринку електроприводів спостерігаються у світі за результатами маркетингових досліджень?
10. У чому полягають основні інноваційні особливості систем SINAMICS S200 і ACS2000 VFD?
11. Які показники якості є визначальними для промислових електроприводів?
12. Як енергоефективність впливає на експлуатаційні витрати підприємства?
13. Які фактори формують цінову політику постачальників електроприводів?
14. Які вимоги висувають споживачі до обсягів постачання та сервісного обслуговування?
15. Як аналіз вимог споживачів впливає на розробку та модернізацію електромеханічних систем у гірничо-металургійному комплексі?

Використана література.

1. Інжиніринг електротехнічних та мехатронних систем : підруч. Іля здобувачів ступеня магістра за спец. 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / А. В. Босак, А. В. Торопов, Л. В. Торопова; КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. 251 с.
2. Electric Drives Market Size & Share Analysis - Growth Trends and Forecast (2025 – 2030). URL: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/electric-drivesmarket> (дата звернення: 08.10.2025).

#### *ТЕМА 4. НОРМАТИВНО-ПРАВОВЕ ТА СТАНДАРТИЗАЦІЙНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ІНЖИНІРИНГУ*

Роль стандартів у забезпеченні якості інжинірингових рішень. Міжнародні стандарти (IEC, ISO, IEEE) для електротехнічних і електромеханічних систем. Національні стандарти (ДСТУ) та їх застосування у ГМК. Процеси сертифікації обладнання. Ліцензійні вимоги до підприємств, що здійснюють інжинірингову діяльність. Правові відносини: договори, авторські права, інтелектуальна власність. Вплив нормативної та правової бази на інженерні рішення у виробництві.

Міжнародні системи стандартизації, процедури сертифікації та механізми ліцензування взаємопов'язані між собою і спільно формують основу для гарантування якості, безпеки та взаємної сумісності продукції, послуг і технологічних процесів на глобальному рівні. Їхня узгоджена дія забезпечує уніфікацію вимог, що дозволяє різним країнам та організаціям ефективно співпрацювати в межах єдиного технічного простору..

Міжнародні системи стандартизації, зокрема ISO (Міжнародна організація зі стандартизації), розробляють нормативи та вимоги, що охоплюють широке коло сфер — від управління якістю та екологічної безпеки до технологічних процесів і менеджменту. Ці стандарти визнаються більшістю країн світу та слугують універсальною основою для впровадження передових практик, гармонізації технічних вимог і забезпечення стабільного рівня якості у різних галузях промисловості.

Сертифікація та ліцензування є ключовими інструментами контролю відповідності продукції, послуг або систем установленим стандартам. Сертифікація передбачає незалежну перевірку уповноваженими організаціями, які офіційно підтверджують, що об'єкт оцінки відповідає вимогам чинних нормативів. Ліцензування, своєю чергою, надає суб'єктам господарювання право використовувати певні технології, торговельні марки чи інженерні рішення, що відповідають стандартам і мають підтверджену якість. Правові відносини у цій сфері оформлюються через договори та угоди між сторонами, які займаються стандартизацією, сертифікацією чи технічним партнерством. До них належать контракти на сертифікацію продукції, ліцензійні угоди щодо використання технологій, а також договори про спільну розробку або технологічну кооперацію.

Міжнародні й національні професійні організації, а також виробники промислової продукції активно сприяють узгодженню технічних вимог і норм у різних сферах діяльності через впровадження системи стандартизації. Особливе значення це має в галузі інжинірингу електромеханічних і мехатронних систем, де єдність технічних вимог, термінології та методів забезпечує сумісність, надійність і безпечність технічних рішень.

Ключову роль у сфері міжнародної стандартизації відіграють дві провідні організації — Міжнародна організація зі стандартизації (ISO) та Міжнародна електротехнічна комісія (IEC). Ці інституції спільно розробляють

і впроваджують стандарти, які набувають чинності у багатьох країнах світу, забезпечуючи гармонізацію технічних вимог, методів випробувань і процедур оцінки відповідності у сфері електротехніки та суміжних галузях.

Окрім базових органів стандартизації, функціонують також об'єднані технічні комітети (JTC — Joint Technical Committees), які об'єднують фахівців, експертів і представників різних організацій для спільної розробки комплексних стандартів. Такий підхід сприяє узгодженню міжгалузевих вимог, забезпечує взаємну сумісність систем і підвищує ефективність впровадження міжнародних норм у національні стандарти.

У діяльності міжнародних органів зі стандартизації беруть участь національні установи з різних промислово розвинених країн, серед яких — і Україна. Їхня співпраця забезпечує участь у формуванні глобальних стандартів, сприяє гармонізації технічних вимог, підвищенню якості продукції та зміцненню технічного партнерства між державами. Така інтеграція дозволяє Україні адаптувати власні стандарти до світових вимог і посилювати конкурентоспроможність на міжнародних ринках.

Стандарт — це нормативний документ, що визначає обов'язкові або рекомендовані правила, технічні вимоги, параметри чи критерії, необхідні для досягнення стабільної якості, безпеки й ефективності у певній сфері діяльності. Він виступає еталоном, на який спираються під час проектування, виробництва, випробувань і експлуатації продукції, а також при оцінюванні послуг або систем, забезпечуючи їхню взаємну сумісність, надійність і відповідність встановленим нормам.

У таблиці 4.1 наведено перелік основних міжнародних стандартів, що регламентують процеси системної та програмної інженерії. Ці документи визначають структуру життєвого циклу технічних систем, правила управління ризиками, конфігурацією, документацією, а також вимоги до забезпечення якості, архітектури й інформаційної узгодженості в інжинірингових проектах.

Таблиця 4.1 - Основні міжнародні стандарти з системного інжинірингу

Шифр стандарту	Повна назва стандарту
ISO/IEC/IEEE 15288:2023	Системна і програмна інженерія - процеси життєвого циклу системи
ISO/IEC/IEEE 24765:2017	Системна і програмна інженерія - Словник систем і програмної інженерії
ISO/IEC/IEEE 42010:2022	Системна і програмна інженерія - опис архітектури
ISO/IEC 24748-4:2016//IEEE 1220	Управління процесом системної інженерії
ISO/IEC/IEEE 29148:2018	Розробка систем і програмного забезпечення - розробка вимог
ISO/IEC/IEEE 16085:2021	Системна і програмна інженерія - управління ризиками

ISO/IEC/IEEE 15939	Системна і програмна інженерія - процес вимірювання
ISO/IEC/IEEE 16326	Системна і програмна інженерія - управління проектами
prEN9277	Управління програмами - Посібник з управління системою інженерією
EIA 632	Проектування системи
ISO 9001:2015	Системи управління якістю - вимоги
EIA-649-B	Національний узгоджений стандарт керування конфігурацією
ISO/IEC/IEEE TR 24748-1	Системна і програмна інженерія. Процеси життєвого циклу системи
ISO/IEC/IEEE TR 24748-2	Системна і програмна інженерія. Управління життєвим циклом. Частина 2: Рекомендації щодо застосування ISO/IEC/IEEE 15288 (Процеси життєвого циклу системи)
ISO/IEC/IEEE CD 24748-4	Системна інженерія програмного забезпечення - застосування та управління процесом системної інженерії
ISO/IEC DTR 16337	Довідник з системного інжинірингу
ISO/IEC/IEEE 15289:2019	Системна і програмна інженерія. Зміст інформаційних елементів життєвого циклу (документація)
ISO/IEC/IEEE 150261:2019	Системна і програмна інженерія. Гарантія систем і програмного забезпечення. Частина 1: Основні поняття та визначення
ISO/IEC/IEEE 150262:2022	Системна і програмна інженерія. Гарантія систем і програмного забезпечення. Частина 2: Гарантійний випадок
ISO/IEC/IEEE 150263:2023	Системна і програмна інженерія. Гарантія систем і програмного забезпечення. Частина 3: Рівні цілісності системи
ISO/IEC/IEEE 150264:2021	Системна і програмна інженерія. Гарантія систем і програмного забезпечення. Частина 4: Гарантія життєвого циклу
ISO 10303-233:2012	Стандарт обміну даними системного інжинірингу
ISO 31000:2018	Управління ризиками
IEC 31010:2019	Управління ризиками. Методи оцінки ризиків
ISO 19439:2006	Інтеграція підприємства. Структура моделювання підприємства
ISO 15704:2019	Моделювання та архітектура підприємства Вимоги до архітектури та методології, що орієнтуються на підприємство.
EIA 748	Системи управління отриманою вартістю

На рисунку 4.1 подано порівняльну характеристику ключових міжнародних стандартів системної інженерії, що відображає ступінь їх деталізації та охоплення етапів життєвого циклу системи. Така візуалізація дозволяє оцінити взаємозв'язок між окремими стандартами, визначити їхню

сферу застосування та роль у забезпеченні комплексного управління інженерними процесами..

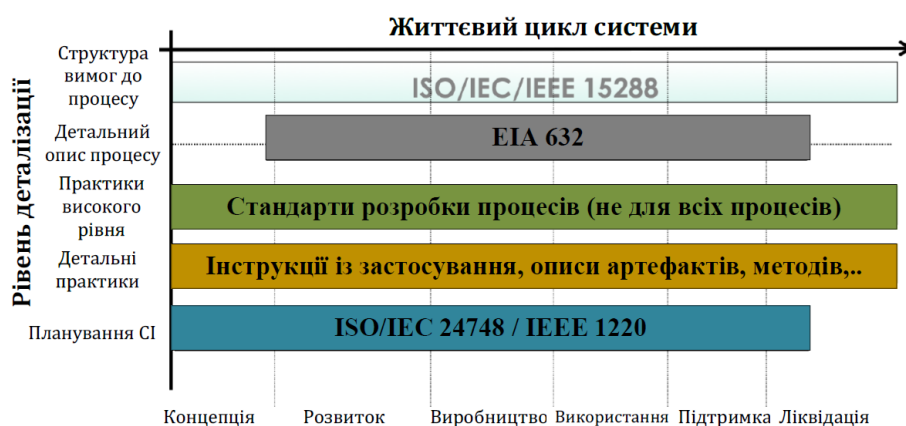


Рисунок 4.1- Широта та рівень деталізації ключових стандартів системної інженерії

Основна мета стандартизації в Україні полягає у створенні єдиної системи норм і вимог, що забезпечують надійність, безпеку та ефективність продукції, процесів і послуг.

До ключових завдань стандартизації належать:

- забезпечення відповідності продукції її функціональному призначенню;
- управління різноманітністю, забезпечення сумісності й взаємозамінності технічних рішень;
- раціоналізація виробництва на основі уніфікованих правил, процедур і методик;
- охорона життя, здоров'я та прав споживачів;
- підвищення безпеки праці й екологічної відповідальності;
- збереження природних ресурсів та енергетична ефективність;
- усунення технічних бар'єрів у міжнародній торгівлі, сприяння інтеграції України до світового економічного простору та підвищенню конкурентоспроможності вітчизняної продукції.

Систему стандартизації в Україні формують декілька ключових організаційних структур:

- Національний орган стандартизації України — ДП «УкрНДНЦ», який є головною установою, що координує діяльність у сфері стандартизації. Його функції включають розроблення, затвердження, впровадження та офіційне оприлюднення національних стандартів (ДСТУ).
- Міністерства та державні служби, зокрема Міністерство економіки України, відповідають за формування державної політики у галузі стандартизації, технічного регулювання та сертифікації продукції.
- Технічні комітети стандартизації (ТК) — спеціалізовані експертні органи, що розробляють стандарти для окремих галузей економіки. В

Україні діє понад 200 таких комітетів, які охоплюють сфери енергетики, транспорту, машинобудування, будівництва, харчової промисловості та інші напрями діяльності.

Типи стандартів в Україні:

- Державні стандарти України (ДСТУ) - національні стандарти, що розробляються для різних галузей економіки.
- Міждержавні стандарти (ГОСТ). Україна продовжує використовувати деякі міждержавні стандарти, спільні для країн колишнього СРСР, проте поступово замінює їх національними чи міжнародними стандартами.
- Технічні умови (ТУ). Це стандарти, що розробляються безпосередньо підприємствами для своєї продукції, і мають більш вузький характер застосування.

Інжинірингова діяльність включає повний цикл робіт — від проектування й планування до впровадження, експлуатації та технічного супроводу інженерних систем і комплексів. Застосування стандартів у цій сфері забезпечує уніфікацію технічних вимог, узгодженість процедур проектування та контролю якості, підвищує рівень безпеки виробничих процесів і сприяє раціональному використанню матеріальних, енергетичних та трудових ресурсів.

Одними із ключових нормативних документів, що визначає вимоги до організації інжинірингової діяльності, є:

- ДСТУ EN ISO 9001 «Системи управління якістю. Вимоги», гармонізований із міжнародним стандартом ISO 9001:2015.
- Цей стандарт регламентує принципи побудови системи управління якістю (СУЯ), зокрема орієнтацію на споживача, лідерство керівництва, залучення персоналу, процесний і системний підходи, постійне вдосконалення та прийняття рішень на основі достовірних даних.

У сфері інжинірингу застосування ISO 9001 сприяє:

- забезпеченню стабільної якості проєктних і технічних робіт;
- створенню прозорої системи контролю якості на всіх етапах реалізації проєкту — від розробки до введення в експлуатацію;
- підвищенню довіри замовників, інвесторів і партнерів завдяки наявності сертифікованої системи менеджменту якості.

– ДСТУ EN ISO 14001 «Системи екологічного управління. Вимоги та настанови щодо застосування» визначає принципи створення та впровадження систем екологічного менеджменту (СЕУ) в організаціях. Його метою є мінімізація шкідливого впливу виробничої діяльності на навколишнє середовище шляхом системного управління екологічними аспектами.

Для інжинірингових підприємств застосування цього стандарту передбачає:

- скорочення негативного впливу на довкілля під час проєктування, будівництва та експлуатації технічних об'єктів;
- ідентифікацію, оцінювання та контроль екологічних ризиків, пов'язаних із реалізацією інженерних рішень;
- впровадження ресурсозберігаючих і енергоефективних технологій, що сприяють зниженню викидів і покращенню екологічної ефективності підприємства.

– ДСТУ EN ISO 45001 «Системи управління охороною здоров'я та безпекою праці» встановлює вимоги до створення ефективної системи управління охороною праці, орієнтованої на попередження виробничого травматизму та професійних захворювань.

Для інжинірингових компаній дотримання положень цього стандарту передбачає:

- ідентифікацію, оцінку та контроль ризиків, пов'язаних із виконанням робіт підвищеної небезпеки, зокрема на будівельних і монтажних майданчиках;
- розроблення превентивних заходів і програм зниження рівня виробничих травм і професійних захворювань;
- формування корпоративної культури безпеки, що охоплює як штатних працівників, так і підрядні організації, залучені до реалізації інженерних проєктів.

– ДСТУ EN ISO 55000 «Управління активами» регламентує принципи й вимоги до ефективного управління фізичними активами підприємства — інфраструктурою, обладнанням, машинами та іншими технічними системами.

Використання цього стандарту в інжиніринговій практиці дозволяє:

- забезпечити раціональне управління повним життєвим циклом активів — від проєктування й придбання до експлуатації та утилізації;
- оптимізувати витрати, пов'язані з технічним обслуговуванням, модернізацією та заміною обладнання;
- підвищити ефективність використання технічних систем, продовжити термін їхньої служби й мінімізувати ризики відмов у виробничих процесах.

– Серія стандартів ДСТУ ISO/IEC/IEEE 15288:2016 «Інженерія систем і програмного забезпечення» визначає комплекс процесів, методів і процедур, що застосовуються при створенні, розвитку й управлінні життєвим циклом складних технічних і програмно-апаратних систем.

Для інжинірингових підприємств дотримання цього стандарту забезпечує:

- впровадження системного підходу до управління проєктами на всіх етапах — від формування концепції до утилізації системи;
- уніфікацію взаємодії між підрозділами, що займаються проєктуванням, розробленням, тестуванням і супроводом інженерних рішень;

- підвищення ефективності процесів розроблення складних електромеханічних систем, зменшення ризиків помилок і покращення керованості технічних проєктів.

- ДСТУ-Н Б А.3.1-19 — національний нормативний документ, що визначає вимоги до організації та технології будівельно-монтажних робіт. Стандарт регламентує порядок підготовки, проведення й контролю будівельних процесів, встановлює правила безпечного виконання робіт, вимоги до якості матеріалів і конструкцій, а також до організації виробничих ресурсів під час реалізації інжинірингових проєктів. Його дотримання забезпечує ефективність будівництва, відповідність проєктів технічним нормам і підвищення рівня безпеки на виробничих майданчиках.

Використання стандартів у сфері інжинірингу є ключовим чинником забезпечення відповідності технічних рішень сучасним вимогам якості, екологічної безпеки та надійності. Системний підхід до стандартизації сприяє впровадженню уніфікованих процедур управління проєктами, що дозволяє мінімізувати виробничі ризики, підвищити ефективність реалізації технічних рішень і забезпечити стабільний рівень конкурентоспроможності інжинірингових підприємств на внутрішньому та міжнародному ринках.

Сертифікація відповідності — це офіційна процедура оцінювання, що підтверджує відповідність продукції, послуг або систем вимогам технічних регламентів, положенням стандартів чи умовам договорів.

Під час сертифікації проводиться комплексна перевірка технічних і якісних характеристик об'єкта оцінювання, зокрема показників безпеки, енергоефективності, електромагнітної сумісності та функціональної надійності.

Сертифікаційні процедури здійснюються незалежними, акредитованими організаціями, які мають підтверджену компетентність у відповідній галузі. За результатами перевірки видається сертифікат або декларація відповідності, що засвідчує дотримання встановлених норм і правил.

Сертифікація є важливою складовою системи технічного регулювання, оскільки гарантує безпеку продукції, підвищує довіру між виробниками, постачальниками й споживачами, а також сприяє розвитку конкурентного середовища.

Органи з сертифікації можуть бути як юридичними особами, так і фізичними підприємцями, які отримали державну акредитацію на право проведення робіт із сертифікації.

Технічний регламент — це нормативно-правовий документ, ухвалений на міжнародному або національному рівні, який встановлює обов'язкові вимоги до продукції, процесів, послуг чи систем з метою гарантування їхньої безпечності та надійності.

Під час розроблення технічних регламентів враховується ступінь потенційного ризику для життя, здоров'я людей, довкілля чи майна. Вони визначають мінімально допустимі вимоги щодо безпеки — механічної,

електричної, термічної, хімічної, пожежної, біологічної, радіаційної, ядерної, вибухової, а також електромагнітної сумісності (ЕМС), яка забезпечує безпечне функціонування обладнання без взаємних перешкод.

Підтвердження відповідності об'єкта вимогам технічного регламенту або стандарту здійснюється шляхом видачі сертифіката відповідності, що засвідчує дотримання встановлених норм і є основним документом для введення продукції в обіг на ринку.

Сертифікація імпортного електротехнічного обладнання в Україні є обов'язковим етапом, спрямованим на підтвердження його відповідності національним стандартам якості, технічним регламентам і вимогам безпеки. Така процедура гарантує, що продукція іноземного виробництва відповідає українським нормам щодо експлуатаційної надійності, електричної безпеки та екологічної сумісності, що є передумовою її легального обігу та використання на території України.

Процес отримання сертифіката відповідності на електротехнічне обладнання, що імпортується або виробляється для українського ринку, складається з кількох етапів.

#### 1. Вибір акредитованого органу сертифікації.

Іноземний виробник або офіційний імпортер звертається до уповноваженої в Україні сертифікаційної установи, яка має державну акредитацію на проведення оцінки відповідності.

Серед основних сертифікаційних органів у сфері електротехнічного обладнання:

- ДП «Укрметртестстандарт» — проводить сертифікаційні випробування та перевірку електротехнічних виробів на відповідність стандартам безпеки;
- ДП «УкрСЕПРО» — здійснює комплексну сертифікацію продукції за національними стандартами (ДСТУ, ДСТУ EN, ДСТУ ІЕС).

#### 2. Подання заявки та документів.

Імпортер або виробник подає заявку на сертифікацію разом з такими документами:

- опис електротехнічного обладнання (технічні характеристики, інструкції з експлуатації);
- наявні міжнародні сертифікати, такі як СЕ (Conformité Européenne);
- технічна документація, що містить результати випробувань, проведених за кордоном. Надання зразків обладнання.

Для проведення процедури сертифікації заявник надає зразки електротехнічного обладнання, ідентичні тим, що плануються до реалізації на українському ринку. Ці зразки проходять лабораторні випробування з метою перевірки їхньої відповідності вимогам національних стандартів (ДСТУ, ДСТУ EN, ДСТУ ІЕС). Отримані результати є підставою для прийняття рішення щодо видачі сертифіката відповідності.

3. Проведення сертифікаційних випробувань. На цьому етапі орган сертифікації здійснює комплекс лабораторних і технічних випробувань

обладнання з метою підтвердження його відповідності вимогам чинних стандартів.

До перевірки можуть входити:

- тестування за стандартом ДСТУ ІЕС 60034 — для електричних машин, генераторів та двигунів;
- випробування відповідно до ДСТУ EN 61439 — для комплексних розподільчих пристроїв низької напруги;
- перевірка параметрів безпеки, енергоефективності, функціональності, стійкості до нагрівання, а також електромагнітної сумісності (ЕМС).

Результати цих випробувань визначають відповідність продукції технічним регламентам і є підставою для подальшої оцінки її придатності до використання в Україні.

#### 4. Проведення оцінки відповідності.

Після завершення випробувань фахівці сертифікаційного органу здійснюють комплексну експертизу технічної документації та результатів тестування. На цьому етапі перевіряється повнота даних, достовірність результатів і відповідність обладнання чинним технічним регламентам та стандартам безпеки.

Якщо продукція повністю задовольняє встановлені вимоги, формується позитивний експертний висновок, який є підставою для видачі сертифіката відповідності.

#### 5. Видача сертифіката відповідності.

Після завершення всіх процедур оцінювання та підтвердження відповідності обладнання встановленим вимогам орган сертифікації оформлює та видає сертифікат відповідності.

Цей офіційний документ підтверджує, що електротехнічний виріб відповідає національним стандартам України (ДСТУ, ДСТУ EN, ДСТУ ІЕС) і вимогам чинних технічних регламентів. Сертифікат є підставою для введення продукції в обіг і дозволяє її легальне використання на території України.

#### 6. Маркування продукції.

Після отримання сертифіката відповідності виробник або імпортер зобов'язаний нанести на продукцію знак відповідності технічним регламентам України. Це маркування засвідчує, що обладнання пройшло процедуру оцінки відповідності, відповідає встановленим стандартам безпеки та якості й може офіційно реалізовуватися на українському ринку.

#### 7. Контроль та моніторинг.

Після видачі сертифіката відповідності уповноважені органи здійснюють періодичний державний нагляд за дотриманням встановлених вимог під час експлуатації обладнання. Такий моніторинг передбачає вибіркові перевірки, випробування зразків продукції та аналіз технічної документації з метою виявлення можливих відхилень від стандартів. Регулярний контроль гарантує підтримання стабільного рівня якості та безпеки продукції, а також захист інтересів кінцевих споживачів.

Процедура сертифікації імпортного електротехнічного обладнання в Україні гарантує його повну відповідність чинним національним стандартам безпеки, якості та технічним регламентам. Це є необхідною умовою для надійного функціонування електротехнічних систем, запобігання аварійним ситуаціям і забезпечення безпечної експлуатації електрообладнання на підприємствах та в енергетичних мережах України.

Правові відносини у сфері інжинірингової діяльності.

Інжиніринг є невід'ємною складовою економічної системи, що охоплює широкий спектр технічних, технологічних і управлінських процесів. Для ефективного ведення інжинірингової діяльності, захисту прав суб'єктів господарювання та забезпечення належної якості послуг необхідно суворо дотримуватися чинного законодавства.

До ключових правових аспектів, які регламентують діяльність інжинірингових підприємств в Україні, належать:

- ліцензування окремих видів господарської діяльності;
- договірно-правове регулювання взаємовідносин між замовниками, підрядниками й постачальниками;
- захист прав інтелектуальної власності на розроблені технічні рішення;
- дотримання вимог технічного регулювання, норм охорони праці та екологічної безпеки.

Таке правове підґрунтя створює умови для прозорості, надійності та законності інжинірингових процесів у промисловості.

Ліцензування окремих видів діяльності в Україні — це адміністративно-правова процедура, спрямована на державний контроль за дотриманням встановлених вимог під час здійснення потенційно ризикованих або стратегічно важливих видів господарської діяльності.

Через механізм ліцензування держава забезпечує відповідність підприємств технічним, технологічним, екологічним, правовим і безпековим стандартам, запобігаючи недобросовісній або небезпечній діяльності на ринку.

Правові засади ліцензування господарської діяльності в Україні визначаються низкою нормативно-правових актів, серед яких:

- Закон України «Про ліцензування видів господарської діяльності», який встановлює загальні принципи, процедури отримання та анулювання ліцензій;
- Постанова Кабінету Міністрів України «Про затвердження Порядку ліцензування видів господарської діяльності», що деталізує вимоги до оформлення, подання та розгляду заяв на отримання ліцензії;
- Закон України «Про електроенергетику», який регулює порядок ліцензування діяльності у сфері виробництва, транспортування й постачання електричної енергії.

До основних видів господарської діяльності, що підлягають обов'язковому ліцензуванню в Україні, належать:

- будівельно-монтажні роботи — виконання робіт із нового будівництва, реконструкції, технічного переоснащення та капітального ремонту об'єктів;
- енергетична діяльність — виробництво, передача, розподіл і постачання електричної енергії споживачам;
- газова промисловість — видобуток, транспортування, зберігання та постачання природного газу;
- фармацевтична діяльність — виготовлення, фасування, реалізація й імпорт лікарських засобів;
- роздрібна торгівля алкогольними напоями та тютюновими виробами;
- екологічна діяльність — операції з управління відходами, очищення промислових стічних вод, моніторинг і контроль рівня забруднення навколишнього середовища.

Процедура отримання ліцензії охоплює такі етапи:

- Підготовка документів, що підтверджують відповідність вимогам для отримання ліцензії. Це можуть бути технічні паспорти, документи про кваліфікацію персоналу, договори, підтвердження фінансової спроможності тощо.
  - Подання заявки на отримання ліцензії до відповідного ліцензуючого органу. Зазвичай, це робиться через онлайн-портали або безпосередньо в органах влади.
  - Оцінка відповідності. Ліцензуючий орган перевіряє надані документи та проводить перевірку відповідності вимогам. Може бути проведено аудит або інспекція.
  - Отримання ліцензії. Після успішної перевірки орган видає ліцензію, яка є офіційним дозволом на ведення зазначеного виду діяльності. Ліцензія має певний термін дії, після якого її необхідно продовжити.
- Обов'язки ліцензіата:
- Дотримання вимог. Ліцензіат повинен дотримуватися всіх вимог і стандартів, передбачених ліцензією.
  - Звітність. Ліцензіат може бути зобов'язаний подавати регулярні звіти або відомості до ліцензуючого органу.
  - Оновлення інформації. У разі змін у діяльності, ліцензіат повинен інформувати ліцензуючий орган та, за необхідності, вносити зміни до ліцензії.

Відповідальність за порушення.

Ліцензіати, які порушують умови ліцензії або законодавство, можуть бути притягнені до відповідальності, у тому числі штрафами, анулюванням ліцензії та іншими санкціями.

Договірні відносини в інжиніринговій діяльності

Інжинірингова діяльність ґрунтується на системі договірних взаємовідносин між замовником, підрядником і субпідрядними організаціями. Такі договори визначають правовий статус сторін, їхні зобов'язання, обсяг робіт, строки виконання, умови оплати, гарантії якості та порядок вирішення можливих спорів.

Належне оформлення договірних відносин є основою правової визначеності та фінансової стабільності інжинірингових проєктів, а також забезпечує захист інтересів усіх учасників проєктної діяльності.

В інжиніринговій практиці застосовуються різні типи договорів, що регламентують порядок виконання робіт, постачання матеріалів і надання послуг.

Основними з них є:

- Договір підряду — базовий вид угоди між замовником і підрядником, що визначає обсяг, зміст, строки, вартість та якість виконання робіт. Зазвичай використовується для проєктних, будівельно-монтажних або електромонтажних робіт.

- Договір надання послуг — регламентує відносини у сфері консалтингу, технічного нагляду, управління проєктами, аудиту, енергоаудиту чи розробки програмного забезпечення.

- Договір субпідряду — укладається між генеральним підрядником і сторонньою організацією для виконання спеціалізованих робіт у межах основного контракту (наприклад, системи автоматизації, монтаж електрообладнання).

- Договір постачання — визначає умови забезпечення проєкту обладнанням, комплектуючими та матеріалами. У ньому фіксуються вимоги до якості, терміни поставки, ціна та відповідальність сторін за порушення умов.

- Ліцензійний договір — оформлює передачу прав на використання технологій, патентів, програмних продуктів або промислових зразків, які є об'єктами інтелектуальної власності.

Для забезпечення ефективного виконання інжинірингових проєктів і запобігання виникненню спірних ситуацій договори мають містити чітко визначені ключові положення, зокрема:

- предмет договору — конкретизація обсягу, змісту й характеру робіт або послуг, що підлягають виконанню, із зазначенням технічних вимог, цільових показників і спеціального обладнання чи технологій, які використовуватимуться;

- строки виконання — визначення дат початку, завершення й проміжних етапів проєкту, включно з графіками здачі звітів, перевірок і контролю якості;

- вартість і порядок оплати — встановлення загальної вартості робіт, умов фінансування, форм і термінів розрахунків (авансові платежі, поетапна або остаточна оплата);

- гарантії якості — визначення стандартів, за якими проводитимуться роботи, вимоги до сертифікованих матеріалів, методів контролю якості, проведення випробувань і перевірок;
- порядок приймання робіт — опис процедур перевірки виконаних робіт і документального підтвердження результатів (акти виконаних робіт, технічні звіти, сертифікати відповідності тощо);
- відповідальність сторін — регламентація відповідальності за порушення строків, неякісне виконання робіт або недотримання вимог безпеки, із зазначенням санкцій і штрафних механізмів;
- форс-мажорні обставини — визначення умов звільнення сторін від відповідальності у випадку надзвичайних подій (стихійні лиха, воєнні дії, страйки), а також порядок дій у таких ситуаціях;
- права інтелектуальної власності — фіксація правових аспектів використання, передачі та захисту інтелектуальних продуктів, створених у межах договору (технології, програмне забезпечення, винаходи, креслення);
- порядок вирішення спорів — визначення механізму досудового врегулювання конфліктів (переговори, медіація) та арбітражних або судових процедур у разі неможливості досягнення згоди.

Під час розроблення договорів у сфері інжинірингу необхідно забезпечити їх комплексну правову й технічну експертизу, що гарантує відповідність чинному законодавству, стандартам і нормам технічного регулювання.

Договірна документація повинна бути сформульована чітко, конкретно й без двозначностей, містити однозначне трактування прав та обов'язків сторін, щоб уникнути можливих конфліктів під час реалізації проєкту.

Водночас важливо передбачати гнучкість договорів, яка дозволяє вносити зміни у разі коригування технічних завдань, строків виконання або фінансових умов, за умови дотримання встановлених процедурних вимог і принципів юридичної прозорості.

#### Правові відносини на ринку інтелектуальної власності

Захист прав інтелектуальної власності є одним із ключових чинників успішного функціонування інжинірингових компаній, адже саме результати їхньої науково-технічної та творчої діяльності — винаходи, розробки, програмне забезпечення, технічна документація — становлять основну частину нематеріальних активів.

Ефективна система охорони інтелектуальної власності забезпечує підприємствам стійкі конкурентні переваги, стимулює інноваційний розвиток, сприяє комерціалізації технічних рішень і підвищує інвестиційну привабливість інженерних проєктів.

В Україні правовий захист об'єктів інтелектуальної власності для інжинірингових компаній регламентується системою національних та міжнародних нормативно-правових актів.

Оснoву законодавчої бази становлять:

- Цивільний кодекс України, який визначає загальні принципи володіння, користування й розпорядження об'єктами інтелектуальної власності;
- спеціальні закони України — «Про охорону прав на винаходи і корисні моделі», «Про охорону прав на промислові зразки», «Про охорону прав на знаки для товарів і послуг», «Про авторське право і суміжні права», які регламентують процедури набуття, охорони та захисту патентних, авторських і суміжних прав;
- Закон України «Про комерційну таємницю», що забезпечує захист конфіденційної інформації, технологій, ноу-хау та іншої інтелектуальної власності, яка не підлягає патентуванню.

Національне законодавство гармонізоване з міжнародними правовими актами, такими як Паризька конвенція про охорону промислової власності та Угода ТРІПС (TRIPS), а також із постановами Кабінету Міністрів України, які деталізують порядок реалізації та захисту прав інтелектуальної власності.

В інжиніринговій діяльності можуть використовуватися різні види інтелектуальної власності, включаючи:

- Патенти захищають технічні винаходи, нові методи, процеси, машини або пристрої, що мають новизну, неочевидність і промислову придатність. Патенти надають виключне право власнику на використання винаходу та заборону іншим особам його використовувати без дозволу.
- Авторські права захищають творчі роботи, такі як програмне забезпечення, технічна документація, креслення, технічні звіти, наукові статті. Авторські права автоматично виникають з моменту створення твору і надають автору право контролювати використання свого твору.
- Торгові марки захищають бренди, логотипи, назви компаній, що ідентифікують товари або послуги на ринку. Торгові марки допомагають споживачам розпізнавати продукти фірми та забезпечують захист від недобросовісної конкуренції.
- Комерційна таємниця захищає конфіденційну інформацію, яка має комерційну цінність і не є загальнодоступною, наприклад, бізнесстратегії, технічні ноу-хау, дані про клієнтів, маркетингові плани.
- Комерційна таємниця захищається шляхом збереження її конфіденційності.

Стратегії захисту інтелектуальної власності в інжинірингових компаніях мають комплексний характер і включають організаційні, правові та технічні заходи:

- офіційна реєстрація прав у Державній службі інтелектуальної власності України, що надає юридичне підтвердження авторства й забезпечує можливість судового захисту прав власника;

- укладення договорів про конфіденційність (NDA) з працівниками, підрядниками та партнерами для запобігання розголошенню комерційних таємниць і технічної інформації;
- ліцензування об'єктів інтелектуальної власності, яке дозволяє контролювати використання запатентованих технологій, програмного забезпечення або брендів та отримувати додатковий прибуток;
- моніторинг ринку з метою виявлення фактів порушення авторських і патентних прав та оперативне застосування правових механізмів (попередження, судові позови, анулювання незаконних реєстрацій);
- підвищення обізнаності персоналу щодо правил захисту ІВ, дотримання режиму конфіденційності та відповідальності за неправомірне використання інтелектуальних продуктів компанії.

Для підвищення ефективності системи захисту інтелектуальної власності інжинірингові компанії доцільно залучають професійних юридичних консультантів, які мають спеціалізацію у сфері права інтелектуальної власності.

До таких фахівців належать:

- патентні повірені — здійснюють підготовку та подання заявок на патенти, корисні моделі, промислові зразки;
- адвокати з питань ІВ — представляють інтереси компанії у судах, арбітражах та переговорах;
- експерти з авторського права й комерційної таємниці — розробляють договори, політики конфіденційності, умови передачі прав на результати творчої чи технічної діяльності.

Співпраця з такими спеціалістами забезпечує правову захищеність інженерних розробок, знижує ризики неправомірного використання інтелектуальних продуктів і сприяє дотриманню міжнародних стандартів у сфері ІВ.

Організаційна структура підприємства є ключовим елементом управління інжиніринговою компанією, оскільки визначає систему взаємодії між підрозділами, розподіл повноважень і відповідальності, а також порядок прийняття рішень.

Правильна побудова структури підприємства забезпечує узгодженість дій між учасниками проектів, чітке визначення функцій і відповідальності керівників і виконавців, що безпосередньо впливає на ефективність реалізації технічних, виробничих та інноваційних завдань.

Тип організаційної структури визначає розподіл ролей і рівень координації всередині компанії, сприяючи досягненню стратегічних цілей бізнесу та підвищенню конкурентоспроможності.

У процесі реалізації інжинірингових проектів підприємства впроваджують ефективні системи внутрішньої комунікації та координації між усіма структурними підрозділами. Це передбачає:

- проведення регулярних виробничих і координаційних нарад;

- використання сучасних інформаційно-комунікаційних платформ (PLM-, ERP-, BIM-систем) для обміну даними та контролю виконання завдань;

- запровадження чітких процедур звітності та моніторингу стану проєктів у реальному часі.

Гнучка система комунікацій дозволяє оперативно реагувати на зміни у технічних завданнях, своєчасно вирішувати виробничі проблеми, координувати роботу підрядників і забезпечувати досягнення поставлених цілей проєкту.

У процесі реалізації інжинірингових проєктів компанії активно співпрацюють із замовниками, субпідрядниками, постачальниками та партнерами, формуючи ефективну систему зовнішньої комунікації.

Така взаємодія передбачає:

- узгодження технічних вимог, обсягів робіт і графіків постачання;

- встановлення спільних процедур планування, контролю якості й моніторингу виконання контрактів;

- укладання угод про співробітництво, партнерство чи субпідряд;

- проведення спільних технічних зустрічей, координаційних рад і аудитів;

- розроблення механізмів урегулювання можливих конфліктів між сторонами.

Налагоджена зовнішня взаємодія забезпечує узгодженість дій усіх учасників проєкту, підвищує якість реалізації технічних рішень та ефективність управління ресурсами.

Залежно від масштабів діяльності, галузевої специфіки та стратегії управління, інжинірингові підприємства можуть застосовувати різні типи організаційних структур, що визначають принципи взаємодії підрозділів і розподіл управлінських повноважень. До основних типів належать:

1. Функціональна організаційна структура.

Функціональна модель управління ґрунтується на поділі персоналу за основними напрямками діяльності — проєктування, дослідження і розробки, фінанси, маркетинг, виробництво, постачання тощо. Кожен структурний підрозділ очолює керівник, який відповідає за планування, координацію та ефективність виконання відповідних функцій.

Переваги:

- висока спеціалізація працівників і можливість поглиблення професійної кваліфікації;

- чіткий розподіл обов'язків і відповідальності;

- ефективне управління в межах окремих функцій.

Недоліки:

- недостатня взаємодія між відділами, що може створювати труднощі при реалізації міжфункціональних проєктів;

- уповільнене прийняття рішень у багаторівневих структурах.

Приклад: Інжинірингова компанія може мати окремі департаменти - проектно-конструкторський, науково-технічний, фінансовий, закупівельний і відділ управління проектами, що діють під керівництвом головного інженера або технічного директора.

## 2 Проектна організаційна структура.

У проектній структурі основна увага зосереджується на виконанні конкретних проектів. Для цього формуються тимчасові міжфункціональні команди, до складу яких входять фахівці з різних підрозділів — інженери, конструктори, технологи, економісти, менеджери. Кожен проект очолює керівник проекту (Project Manager), який відповідає за координацію дій команди, дотримання термінів, бюджету й технічних вимог.

### Переваги:

- висока гнучкість у розподілі трудових і матеріальних ресурсів;
- концентрація зусиль на досягненні конкретних цілей проекту;
- покращена комунікація між учасниками команди та оперативність прийняття рішень.

### Недоліки:

- можливий дефіцит ресурсів у разі паралельного виконання кількох проектів;
- ускладнення управління за наявності великої кількості одночасних проектів.

Приклад: Інжинірингова компанія, що спеціалізується на промисловому будівництві, може створювати окремі команди для кожного об'єкта — наприклад, спорудження електростанції, транспортної інфраструктури або металургійного комплексу — з повним циклом проектного управління від розробки до здачі в експлуатацію.

## 3. Матрична організаційна структура.

Матрична модель поєднує переваги функціональної та проектної структур управління. У такій системі працівники мають подвійне підпорядкування — водночас функціональному керівнику (за напрямом діяльності) та керівнику проекту (за конкретним завданням). Це забезпечує ефективне використання людських і технічних ресурсів у межах кількох проектів.

### Переваги:

- оптимальний розподіл ресурсів між проектами;
- покращена координація між функціональними підрозділами й проектними командами;
- сприяння розвитку інноваційного потенціалу та обміну знаннями між фахівцями різних напрямів.

### Недоліки:

- ускладнена система управління через подвійне підпорядкування;
- можливі конфлікти інтересів між функціональними та проектними керівниками;

- підвищені вимоги до рівня комунікації й менеджерської компетентності.

Приклад: Великі міжнародні корпорації, наприклад ABB або Siemens, часто застосовують матричну модель: інженери, проєктувальники та технічні спеціалісти одночасно беруть участь у кількох проєктах — локальних і міжнародних, — звітуючи як перед керівником підрозділу, так і перед менеджером конкретного проєкту.

#### 4. Географічна організаційна структура.

Географічна (регіональна) модель управління передбачає поділ компанії на територіальні підрозділи, що функціонують у межах окремих регіонів чи країн. Такий підхід дозволяє інжиніринговим компаніям гнучко реагувати на особливості локальних ринків, кліматичні умови, законодавчі вимоги та потреби клієнтів.

Переваги:

- ефективне управління проєктами на місцевому рівні;
- глибше розуміння специфіки регіональних ринків і споживачів;
- швидке ухвалення управлінських рішень з урахуванням місцевих умов.

Недоліки:

- можливе дублювання функцій між регіональними офісами;
- труднощі в забезпеченні уніфікованих корпоративних стандартів і процедур між різними регіонами;
- підвищені витрати на управління багаторівневою структурою.

Приклад: Міжнародні компанії, такі як Siemens або Schneider Electric, організовують діяльність за географічним принципом, створюючи окремі регіональні представництва (наприклад, у Європі, Азії, Північній та Південній Америці), які відповідають за реалізацію проєктів, продажі та технічну підтримку у відповідних зонах.

#### 5. Мережева організаційна структура.

Мережева модель управління ґрунтується на взаємодії незалежних підрозділів, підрядників і партнерських організацій, які об'єднуються для спільного виконання проєктів або реалізації окремих етапів виробничого циклу. Такий підхід характерний для сучасних інжинірингових компаній, що прагнуть підвищити гнучкість, скоротити витрати та швидко адаптуватися до змін ринку.

Переваги:

- висока гнучкість і децентралізоване прийняття рішень;
- швидке реагування на зміни зовнішнього середовища;
- можливість залучення передових технологій і партнерських ресурсів без збільшення власного штату.

Недоліки:

- складність координації дій між численними учасниками мережі;
- залежність від надійності партнерів і узгодженості їхніх дій;

- підвищені вимоги до контролю якості та управління інформаційними потоками.

Приклад: Інжинірингова компанія може реалізовувати масштабні проекти, співпрацюючи одночасно з кількома субпідрядниками, постачальниками та науковими партнерами — наприклад, передаючи проектування систем автоматизації сторонньому бюро, а виготовлення та монтаж обладнання — спеціалізованим підрядним організаціям.

Вибір оптимальної організаційної структури інжинірингової компанії визначається низкою чинників: масштабом підприємства, типом реалізованих проектів, галузевою специфікою, особливостями ринку та стратегічними пріоритетами розвитку.

Раціонально побудована структура забезпечує ефективний розподіл ресурсів, чітку систему управління, налагоджену комунікацію між підрозділами та оперативне прийняття управлінських рішень. Це, у свою чергу, підвищує загальну результативність діяльності компанії, сприяє реалізації її довгострокових цілей і зміцненню позицій на конкурентному ринку.

Висновки.

1. **Стандартизація** є основою забезпечення якості, безпеки та взаємозамінності продукції, послуг і процесів у сфері інжинірингу. Вона встановлює єдині вимоги до розробки, виробництва та експлуатації електромеханічних систем.

2. **Міжнародні стандарти ISO, IEC, IEEE** забезпечують глобальну уніфікацію вимог до якості, управління ризиками, процесів життєвого циклу систем, а також узгодження методів оцінювання результатів інженерної діяльності.

3. **Національні стандарти України (ДСТУ)** адаптують міжнародні норми до українських умов, сприяючи конкурентоспроможності продукції на внутрішньому та світовому ринках.

4. **Сертифікація та технічні регламенти** гарантують відповідність обладнання вимогам безпеки, електромагнітної сумісності, енергоефективності, що є критично важливим для галузей гірничо-металургійного комплексу.

5. **Ліцензування діяльності** забезпечує контроль за дотриманням технічних, правових та екологічних вимог у процесі виконання інжинірингових робіт.

6. **Договірні відносини** регламентують взаємодію між замовниками, підрядниками та постачальниками, визначаючи обсяг, строки, вартість робіт і відповідальність сторін.

7. **Захист інтелектуальної власності** є важливим для інноваційного розвитку, забезпечує збереження авторських прав, патентів, торгових марок та комерційної таємниці.

8. **Організаційна структура підприємства** визначає ефективність управління інжиніринговими проектами; найбільш поширеними є функціональні, проектні та матричні моделі.

9. Комплексне застосування правових, стандартизаційних і сертифікаційних механізмів забезпечує **надійність, безпеку та конкурентоспроможність інженерних рішень.**

Контрольні питання до теми 4.

1. Яку роль відіграють стандарти у забезпеченні якості інжинірингових рішень?
2. Назвіть основні міжнародні організації, що займаються стандартизацією в електротехніці та інженерії.
3. У чому полягає різниця між сертифікацією та ліцензуванням?
4. Які основні етапи проходження сертифікації електротехнічного обладнання в Україні?
5. Яке значення має ДСТУ EN ISO 9001 для інжинірингової діяльності?
6. Які вимоги встановлює ДСТУ EN ISO 45001 щодо безпеки праці?
7. Назвіть основні завдання стандартизації в Україні.
8. Які типи стандартів діють в Україні (ДСТУ, ГОСТ, ТУ) і в чому їх відмінність?
9. Які законодавчі акти регулюють ліцензування господарської діяльності в Україні?
10. Які основні типи договорів застосовуються в інжиніринговій практиці?
11. Що таке патент і яке його значення для інженерних фірм?
12. Які види інтелектуальної власності найбільш поширені в інжинірингу?
13. Назвіть переваги та недоліки матричної організаційної структури підприємства.
14. У чому полягає взаємозв'язок між правовим, стандартизаційним та сертифікаційним забезпеченням інжинірингу?
15. Як стандартизація сприяє міжнародній конкурентоспроможності українських інжинірингових компаній?

Використана література.

1. Інжиніринг електротехнічних та мехатронних систем : підруч. для здобувачів ступеня магістра за спец. 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / А. В. Босак, А. В. Торопов, Л. В. Торопова; КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. 251 с.

2. Інжиніринг електротехнічних та мехатронних систем: конспект лекцій : навч. посіб. для здобувачів ступеня магістр за освітньою програмою «Інжиніринг інтелектуальних електротехнічних та мехатронних комплексів» спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / О.В. Чермалих, О.В. Данілін, А.В. Босак. Л.В. Торопова; КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 77 с.

## ТЕМА 5. ПРОЄКТУВАННЯ ТА ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ РІШЕНЬ

Основні етапи проєктування електромеханічних систем. Формування технічного завдання: зміст, структура, порядок погодження. Методи вибору технічних рішень (порівняння альтернатив, ранжування). Техніко-економічне обґрунтування (ТЕО): мета, методи, показники ефективності. Оцінка капітальних і експлуатаційних витрат. Вибір оптимального варіанта інженерного рішення. ТЕО у проєктах модернізації електроприводів на підприємствах ГМК.

### *Основні етапи проєктування. Технічне завдання.*

Процес проєктування електромеханічних систем є багатокомпонентним і міждисциплінарним, оскільки поєднує електричні, механічні, програмні та інформаційні складові в єдину інтегровану систему, здатну реалізувати задані функції чи технологічні процеси. Такі системи застосовуються в широкому спектрі галузей – від промислової автоматизації, енергетики й транспортного машинобудування до робототехніки, медичного обладнання та побутових електронних пристроїв.

Основні етапи проєктування електромеханічних систем.

**1. Визначення вимог і цілей системи.** Початковий етап проєктування передбачає формування загальної концепції майбутньої системи, визначення її функціонального призначення та технічних характеристик. На цьому етапі встановлюють вимоги до продуктивності, надійності, точності, безпеки та сумісності системи з іншими елементами виробничої інфраструктури. Проводиться аналіз умов експлуатації — температурних, вібраційних, електромагнітних, а також просторових обмежень. Визначаються критичні техніко-економічні фактори, такі як допустима вартість, рівень енергоспоживання, габарити, маса та експлуатаційні обмеження, що впливають на вибір конструктивних і схемних рішень.

**2. Концептуальне проєктування.** На цьому етапі формується загальна ідея майбутньої системи у вигляді концептуальної моделі, що відображає основні принципи її функціонування. Виконується ідентифікація ключових компонентів — датчиків, виконавчих механізмів, контролерів, комунікаційних інтерфейсів та елементів керування. Визначається тип енергетичного приводу (електричного, гідравлічного чи пневматичного), обґрунтовується доцільність його використання залежно від умов роботи, вимог до точності, динаміки та енергоефективності. Результатом концептуального проєктування є створення узагальненої схеми системи, що визначає її функціональну структуру та взаємодію підсистем.

**3. Системне проєктування.** На етапі системного проєктування визначається загальна архітектура електромеханічної системи, її структура та взаємозв'язки між окремими підсистемами. Формується логічна та фізична структура системи, що забезпечує узгоджену роботу всіх її елементів. Проводиться вибір сенсорів для збирання даних про стан процесу або об'єкта керування — датчиків температури, тиску, положення, струму

тощо. Водночас обираються виконавчі механізми, здатні реалізувати потрібні дії: електродвигуни, соленоїди, серводвигуни або інші пристрої, що забезпечують механічне переміщення, натискання чи обертання. Основна мета цього етапу — створення структурної моделі системи, що поєднує сенсорні, обчислювальні та виконавчі компоненти у функціонально цілісну систему.

**4. Електричне проєктування.** Цей етап передбачає розроблення принципів електричних схем, що визначають взаємозв'язки між усіма елементами системи та забезпечують її стабільне функціонування. Виконується вибір електричних компонентів — резисторів, конденсаторів, дроселів, трансформаторів, комутаційних апаратів і засобів захисту. Особлива увага приділяється розробці схем живлення, вибору кабельних трас і забезпеченню електробезпеки. Для реалізації функцій керування здійснюється вибір відповідного мікроконтролера або програмованого логічного контролера (PLC), який забезпечує взаємодію між сенсорними, виконавчими та обчислювальними підсистемами. Передбачаються засоби захисту від перевантажень, коротких замикань, перенапруг і несанкціонованого втручання, що гарантують надійну роботу системи в експлуатаційних умовах.

**5. Механічне проєктування.** На цьому етапі здійснюється розроблення конструктивних елементів системи — несучих рам, корпусів, шасі, опорних вузлів і кріпильних деталей. Визначаються геометричні параметри, матеріали та способи з'єднання, що забезпечують необхідну міцність, жорсткість і довговічність конструкції. Для створення точних моделей застосовуються системи автоматизованого проєктування (CAD), які дають змогу виконувати тривимірне моделювання, перевіряти сумісність деталей та проводити попередні віртуальні випробування. Особливу увагу приділяють проєктуванню рухомих частин — валів, муфт, підшипників, редукторів, ремінних і зубчастих передач — із урахуванням навантажень, частоти обертання, зносостійкості та ефективності передавання руху.

**6. Програмне забезпечення.** Етап розроблення програмного забезпечення охоплює створення алгоритмів керування, оброблення сигналів, логіки регулювання та прийняття рішень у межах електромеханічної системи. Визначаються принципи роботи контурів керування, умови переходу між режимами, алгоритми стабілізації та аварійного реагування. Створюються програми для мікроконтролерів або програмованих логічних контролерів (PLC), які забезпечують взаємодію між сенсорними та виконавчими модулями. За потреби розробляється інтерфейс користувача, що забезпечує відображення технологічних параметрів, керування режимами роботи та діагностику стану системи. Основна мета цього етапу — реалізація функціональної логіки системи у вигляді програмного коду, який гарантує її стабільну, безпечну та ефективну роботу.

**7. Інтеграція і тестування.** Після завершення розроблення окремих підсистем виконується їх інтеграція у єдину електромеханічну систему з подальшим комплексним тестуванням. Перевіряється відповідність

функціональних характеристик проєктним вимогам, проводиться налагодження взаємодії між апаратною та програмною частинами. Тестування здійснюється як у змодельованих середовищах, так і в реальних умовах експлуатації для оцінки надійності, стабільності, точності та безпеки роботи системи. У процесі перевірок виявляються недоліки, помилки в алгоритмах або невідповідності конструктивних рішень, після чого здійснюється їх усунення та повторна перевірка. Результатом цього етапу є підтвердження працездатності та відповідності системи заданим технічним параметрам.

**8. Оптимізація та вдосконалення.** Після проведення випробувань виконується поглиблений аналіз отриманих результатів із метою виявлення резервів для підвищення ефективності роботи системи. На основі експериментальних даних здійснюється оптимізація апаратних компонентів, алгоритмів керування та програмних модулів. Особливу увагу приділяють енергоефективності, швидкодії, точності регулювання та стабільності функціонування в перехідних режимах. За потреби вносяться конструктивні або програмні зміни, спрямовані на зниження енергоспоживання, мінімізацію втрат і підвищення надійності. Цей етап завершує цикл технічного вдосконалення системи перед передачею її в серійне виробництво чи експлуатацію.

**9. Документація.** Завершальним етапом проєктування є підготовка повного пакета технічної документації, що забезпечує можливість виготовлення, монтажу, експлуатації та подальшої модернізації системи. До складу цього пакета входять принципові та монтажні електричні схеми, тривимірні моделі й креслення деталей, специфікації обладнання, перелік матеріалів, а також інструкції з налаштування, експлуатації та технічного обслуговування. Документація повинна бути логічно структурованою, чітко оформленою та відповідати вимогам стандартів ЄСКД і чинних нормативних документів. Її повнота та зрозумілість забезпечують ефективну експлуатацію системи, спрощують технічну підтримку й полегшують реалізацію майбутніх удосконалень.

#### **Стадії проєктування.**

Процес проєктування передбачає проходження низки послідовних стадій, кожна з яких має чітко визначені цілі, зміст і результати. Ці стадії забезпечують поетапний перехід від концептуальної ідеї до повноцінного технічного рішення, готового до реалізації. На кожному етапі здійснюється уточнення параметрів системи, узгодження технічних рішень, аналіз відповідності стандартам і перевірка досягнення заданих показників ефективності. Послідовне виконання всіх стадій дає змогу забезпечити комплексність, надійність і економічну обґрунтованість кінцевого результату.

Згідно з вимогами **ДБН А.2.2-3-2014 “Склад та зміст проєктної документації на будівництво”**, процес проєктування поділяється на кілька послідовних стадій, кожна з яких має власне призначення, зміст і ступінь деталізації технічних рішень:

- **Техніко-економічне обґрунтування (ТЕО);**

- **Техніко-економічний розрахунок (ТЕР);**
- **Ескізний проєкт (ЕП);**
- **Проєкт (П);**
- **Робочий проєкт (РП);**
- **Робоча документація (Р).**

**Техніко-економічне обґрунтування (ТЕО).** ТЕО розробляється на основі вихідних даних і виконується для об'єктів, що є елементами виробничих систем або інженерно-транспортної інфраструктури. Основною метою цієї стадії є визначення технічної доцільності та економічної ефективності реалізації проєкту. У процесі підготовки ТЕО розглядаються декілька можливих варіантів рішень, порівнюються їх технічні показники, вартість та експлуатаційні витрати. Результатом є вибір оптимального варіанта, що забезпечує найкраще співвідношення між капітальними вкладеннями, енергоефективністю, терміном окупності та надійністю системи.

**Техніко-економічний розрахунок (ТЕР).** ТЕР є аналітичним етапом, що передбачає кількісну оцінку технічних і фінансово-економічних параметрів запропонованого проєкту або інвестиційної ініціативи. Основна мета цього розрахунку — визначення рівня ефективності, окупності та доцільності реалізації обраного технічного рішення. У межах ТЕР аналізуються капітальні та експлуатаційні витрати, очікуваний економічний ефект, а також оцінюються технічні показники системи, такі як енергоефективність, надійність і продуктивність. Результати розрахунку дозволяють обґрунтувати доцільність подальшої реалізації або оптимізації проєкту.

**Ескізний проєкт (ЕП).** Ескізний проєкт виконується на основі вихідних даних і передбачає попереднє опрацювання основних технічних, архітектурних, технологічних та екологічних рішень. Його головне завдання — підтвердити принципову можливість реалізації об'єкта, визначити основні технічні параметри та орієнтовну вартість проєкту. У межах ЕП формуються варіанти архітектурно-планувальних і конструктивних рішень, розробляються схеми інженерного забезпечення, проводяться попередні інженерні розрахунки та оцінюється вплив на довкілля. Результати ескізного проєкту слугують базою для подальшого деталізованого проєктування.

**Проєкт (П).** Стадія «Проєкт» спрямована на комплексне визначення архітектурних, технологічних, технічних, екологічних та інженерних рішень, необхідних для реалізації об'єкта. На цьому етапі виконуються детальні розробки містобудівних і планувальних рішень, створюються архітектурні концепції, розраховуються інженерні мережі та системи енергопостачання, автоматизації, вентиляції й захисту. Обов'язково враховуються екологічні аспекти, вимоги охорони праці та нормативи безпеки. Також проводиться кошторисна оцінка, яка визначає вартість будівництва та подальшої експлуатації. Метою цієї стадії є створення узгодженої технічної стратегії реалізації об'єкта, яка забезпечує його технологічну й економічну доцільність.

**Робочий проєкт (РП).** Стадія «Робочий проєкт» виконується для об'єктів з невисоким рівнем технічної складності або у випадках, коли більшість технічних рішень уже опрацьовано на попередніх етапах проєктування. Робочий проєкт ґрунтується на затверджених вихідних даних і містить уточнення, деталізацію та конкретизацію усіх технічних і технологічних рішень. На цьому етапі розробляється повний комплект креслень, схем, розрахунків і специфікацій, необхідних для безпосереднього виконання монтажних, будівельно-інженерних та пусконаладжувальних робіт. Таким чином, стадія РП забезпечує практичну реалізацію проєктних рішень у виробничих умовах.

**Робоча документація (Р).** Робоча документація являє собою комплекс матеріалів, що забезпечують повну технічну готовність до реалізації проєкту. До її складу входять креслення, специфікації, схеми, розрахунки, ескізи, інструкції з монтажу, налагодження та експлуатації. Ця документація створюється на основі затверджених рішень попередніх стадій і є безпосереднім керівним матеріалом для будівельно-монтажних, виробничих або впроваджувальних робіт. Її точність, повнота й відповідність стандартам гарантують можливість якісного виконання робіт і мінімізують ризики відхилень під час реалізації проєкту.

Робоча документація систем автоматизації.

Розроблення робочої документації для систем автоматизації здійснюється відповідно до вимог стандартів ДСТУ Б А.2.4-3:2009, ДСТУ Б А.2.4-4:2009 та положень Єдиної системи конструкторської документації (ЄСКД). Ця документація є складовою частиною загального проєктного пакета і визначає повний обсяг технічних матеріалів, необхідних для монтажу, налаштування та введення в експлуатацію засобів автоматизації.

До її складу входять:

- робочі креслення для виконання монтажу технічних засобів автоматизації;
- креслення загальних видів нетипових конструкцій і пристроїв для встановлення приладів, у тому числі щитів, шаф і пультів керування;
- специфікації обладнання, виробів і матеріалів відповідно до **ДСТУ Б А.2.4-10**;
- відомість потреби в матеріалах і комплектуючих;
- відомість обсягів будівельно-монтажних робіт згідно з чинними нормативами.

Комплект цієї документації забезпечує уніфіковане виконання робіт і створює нормативну основу для подальшого технічного супроводу системи.

Робоча конструкторська документація.

Робоча конструкторська документація являє собою комплект матеріалів, що містить усі необхідні вказівки для виготовлення, складання, випробування та впровадження дослідного зразка або серійної партії виробу. Основними складовими є креслення виробів різних рівнів деталізації

— загальні, габаритні, монтажні, пакувальні — а також технічні умови, розрахунки, специфікації та пояснювальні записки.

Невід'ємним елементом цієї документації є відомість проекту, яка містить перелік усіх конструкторських документів, що утворюють повний комплект матеріалів для даного об'єкта. Така відомість забезпечує систематизацію, контроль актуальності та зручний пошук технічних документів у процесі виробництва й експлуатації системи.

Стадії проектування залежно від категорії складності об'єкта.

Кількість стадій проектування визначається категорією складності та класом наслідків (відповідальності) об'єкта, що встановлюються відповідно до вимог **ДБН В.1.2-14** та **ДСТУ-НБ В.1.2-16**.

- **Для об'єктів I та II категорій складності** проектування може виконуватись:
  - в **одну стадію** — робочий проект (РП);
  - у **дві стадії** — для об'єктів не виробничого призначення: ескізний проект (ЕП) та робочий проект (РП);
  - для об'єктів виробничого призначення й лінійних елементів інженерно-транспортної інфраструктури: техніко-економічний розрахунок (ТЕР) і робочий проект (РП).
- **Для об'єктів III категорії складності** проектування здійснюється у **дві стадії** — проект (П) та робоча документація (Р).
- **Для об'єктів IV та V категорій складності** проектування проводиться у **три стадії**:
  - для не виробничих об'єктів — ескізний проект (ЕП) або, за необхідності, техніко-економічне обґрунтування (ТЕО);
  - для виробничих об'єктів та інженерно-транспортних споруд — ТЕО;
  - проект (П) і робоча документація (Р).

У випадку капітального ремонту допускається спрощене проектування в одну стадію — **РП**, якщо це не суперечить вимогам безпеки й нормативним документам.

Технічні завдання, вимоги і умови.

Технічне завдання — це базовий документ, що визначає повний перелік вимог до розроблення, виготовлення, впровадження або модернізації конкретного об'єкта, системи чи технологічного комплексу. У ньому фіксуються технічні, функціональні, експлуатаційні, екологічні та якісні характеристики майбутнього виробу або системи, а також терміни виконання, бюджетні обмеження та умови постачання.

ТЗ містить опис мети та завдань проекту, перелік функцій, які повинна виконувати система, вимоги до обладнання, конструкцій, програмного забезпечення, умов експлуатації та безпеки. Крім того, документ визначає стандарти, норми та критерії приймання готового продукту.

Технічне завдання розробляється замовником або спільно з виконавцем і є офіційною основою для подальших етапів проектування, виготовлення й приймання робіт. У ході реалізації проекту ТЗ може коригуватись або доповнюватись для уточнення вимог, які виникають у процесі проектування.

Документ виконує роль договору між замовником і виконавцем, забезпечуючи єдине розуміння цілей, обмежень і технічних параметрів майбутнього рішення.

### **Приклад структури технічного.**

Розглянемо структуру технічного завдання. Метою документа є визначення основних вимог, логічних взаємозв'язків і принципів побудови системи диспетчерського управління та збору даних (SCADA).

Технічне завдання включає **описову частину** і **графічно-логічну частину**, представлену у вигляді блок-схем технологічного процесу. У документі визначаються функціональні характеристики системи, алгоритми керування, порядок взаємодії між програмним забезпеченням і технологічним обладнанням, а також структура екранних форм SCADA-системи.

Розроблення програмного забезпечення здійснюється у спеціалізованому середовищі, яке узгоджується із замовником. Це середовище повинно підтримувати створення логічних програм для контролерів, розробку інтерфейсів візуалізації SCADA для окремих ділянок виробництва, а також параметрування частотно-регульованих електроприводів і комунікаційних каналів між пристроями.

Таким чином, ТЗ визначає загальну логіку функціонування системи автоматизації, вимоги до апаратних і програмних засобів, а також порядок організації контролю, збору та обробки виробничих даних.

**Зміст технічного завдання.** Типова структура технічного завдання на створення автоматизованої системи керування (АСУ) охоплює такі основні розділи:

- **Загальні положення** — визначають загальні принципи побудови системи, інтеграцію з іншими автоматизованими системами, вимоги до звітності за сировиною та готовою продукцією, а також описують загальну архітектуру технологічних ділянок (цехи підготовки та екстракції).
- **Режими роботи обладнання** — встановлюють класифікацію технологічних механізмів за типами керування (аналогові датчики, виконавчі механізми без частотного регулювання, механізми з частотно-керованими приводами).
- **Опис технологічного процесу** — містить алгоритми запуску, нормальної роботи та зупинки обладнання у вигляді блок-схем, що забезпечують можливість подальшого програмування контролерів.
- **Блокування обладнання** — визначає логіку спрацьовування захисних функцій при виникненні аварійних або нештатних ситуацій.

- **Зупинка заводу** — описує порядок дій для планового, аварійного та повного відключення системи, з урахуванням вимог безпеки та збереження технологічних параметрів.
- **Права та рівні користувачів** — регламентують доступ операторів, наладчиків і адміністрації до функцій системи, з урахуванням підвищеної небезпеки виробництва.
- **Сигнали входів і виходів логічного обладнання** — містять таблицю з переліком усіх сигналів контролерів за виробничими ділянками, що додається як окремий документ.

Технічні умови (ТУ).

Технічні умови є обов'язковою складовою частиною проєктної та виробничої документації, що регламентує вимоги до об'єкта, системи чи продукту, який підлягає розробленню або впровадженню. Вони встановлюють детальні технічні показники, критерії якості, надійності, безпеки, енергоспоживання, екологічної відповідності та інших характеристик, які повинні бути забезпечені в процесі реалізації проєкту.

У документі визначаються допустимі відхилення параметрів, вимоги до випробувань, контролю, маркування, пакування, транспортування, зберігання та експлуатації продукції. Технічні умови розробляються на основі чинних державних стандартів, технічних регламентів або внутрішніх норм підприємства, погоджуються із замовником і, за необхідності, з відповідними наглядовими органами.

Таким чином, ТУ забезпечують уніфіковані вимоги до всіх етапів життєвого циклу виробу чи системи — від проєктування до експлуатації — і слугують ключовим документом для контролю якості та сертифікації продукції.

Техніко-економічне обґрунтування проєктних рішень.

Техніко-економічне обґрунтування є ключовим аналітичним документом, що використовується на етапі проєктування для оцінки доцільності, ефективності та здійсненності запланованого проєкту. Воно поєднує технічний аналіз із економічними розрахунками, дозволяючи визначити, наскільки запропоноване рішення є раціональним і перспективним з точки зору інвестицій, технологічної реалізації та експлуатаційної вигоди.

Основні завдання ТЕО полягають у такому:

- Оцінка економічної доцільності — визначення співвідношення витрат і очікуваних вигід від реалізації проєкту, розрахунок економічної ефективності, рентабельності та терміну окупності.
- Аналіз технічної здійсненності — перевірка можливості практичної реалізації рішення з урахуванням наявності технологій, обладнання, матеріалів, кваліфікованого персоналу та інфраструктури.
- Ідентифікація ризиків — виявлення потенційних технічних, економічних або організаційних ризиків і розроблення заходів щодо їх мінімізації.

- Порівняння варіантів реалізації — оцінювання кількох альтернативних рішень для вибору оптимального варіанту за критеріями ефективності, вартості, строків реалізації та рівня ризику.

Таким чином, ТЕО є основою для прийняття зваженого інженерно-економічного рішення, що визначає доцільність інвестування та напрями подальшого розвитку проекту.

### **Структура техніко-економічного обґрунтування (ТЕО).**

Типове ТЕО містить низку аналітичних розділів, які комплексно відображають технічну, економічну, правову та екологічну сторони проекту. Його зміст зазвичай охоплює такі елементи:

1. **Вступ.** Наводиться мета, завдання та обсяг ТЕО, короткий опис суті проекту, обґрунтовується його актуальність і необхідність реалізації, визначається очікуваний соціально-економічний ефект.

2. **Аналіз ринку.** Проводиться дослідження ринкового середовища, у межах якого реалізується проект. Оцінюються тенденції попиту та пропозиції, конкурентоспроможність продукту, наявні альтернативи та потенційна клієнтська база.

3. **Технічний аналіз.** Детально описуються запропоновані технології, принципи роботи системи, необхідна інфраструктура, склад обладнання та ресурси. Виконується порівняльна оцінка ефективності доступних технологічних рішень і рівня їх готовності до впровадження.

4. **Економічний аналіз.** Розраховуються капітальні та поточні витрати, визначається структура інвестицій, експлуатаційні витрати, витрати на обслуговування і ремонт. Проводиться фінансове моделювання з використанням основних показників ефективності — **чистої приведеної вартості (NPV), внутрішньої норми доходності (IRR), періоду окупності (PBP)** тощо. Оцінюється прогнозований прибуток і рентабельність проекту.

5. **Аналіз ризиків.** Ідентифікуються потенційні ризики технічного, економічного, соціального та екологічного характеру, визначається їх імовірність і вплив на результати проекту. Розробляються заходи управління ризиками та стратегії реагування на непередбачувані події.

6. **Правове та екологічне обґрунтування.** Визначаються правові норми, стандарти й регуляторні вимоги, що стосуються реалізації проекту. Проводиться оцінка впливу на довкілля, пропонуються заходи для зменшення шкідливого впливу. Уточнюється необхідність отримання ліцензій, дозволів або погоджень.

7. **Висновки та рекомендації.** Узагальнюються результати розрахунків, формулюються висновки щодо ефективності й доцільності реалізації проекту, пропонується оптимальний варіант виконання або рішення щодо його коригування чи відхилення.

Економічний аналіз ефективності проектних рішень.

Ефективність реалізації проєктів безпосередньо впливає на економічний розвиток підприємства та галузі загалом, сприяє створенню робочих місць, підвищенню конкурентоспроможності та впровадженню інноваційних технологій. Водночас будь-який проєкт пов'язаний із певними ризиками — фінансовими, ринковими, організаційними чи зовнішніми (зміни законодавства, валютні коливання, непередбачені обставини), тому важливо здійснювати їх системну оцінку та управління.

Основним завданням економічного аналізу є оцінка **рентабельності та інвестиційної привабливості** проєкту. Для цього використовуються фінансові показники, які дозволяють визначити ефективність вкладених ресурсів з урахуванням фактора часу та ризику:

1. **Внутрішня норма доходності (ВНД, IRR)** — показник, що відображає рівень прибутковості проєкту, тобто процентну ставку, за якої приведена вартість майбутніх грошових потоків дорівнює початковим інвестиціям. Якщо ВНД перевищує очікувану норму прибутку інвестора, проєкт вважається економічно доцільним.

2. **Чиста приведена вартість (ЧПВ, NPV)** — сума всіх дисконтованих грошових потоків, зведених до поточного моменту часу. Позитивне значення ЧПВ свідчить про фінансову вигідність проєкту.

3. **Період повернення інвестицій (ППІ, РВР)** — часовий проміжок, необхідний для того, щоб сукупні доходи компенсували первинні капіталовкладення. Менший термін окупності означає швидше повернення інвестицій.

4. **Економічна рентабельність (ЕР)** — відношення річного чистого прибутку до загальної суми інвестицій; характеризує загальний рівень ефективності вкладеного капіталу.

5. **Індекс рентабельності (ІР)** — співвідношення дисконтованих доходів до початкових інвестицій; показник, що дозволяє порівнювати ефективність кількох альтернативних проєктів.

Застосування цих методів забезпечує комплексну оцінку фінансової стійкості проєкту, його інвестиційної привабливості та здатності генерувати прибуток у довгостроковій перспективі.

**Термін окупності** використовується як додатковий індикатор, що характеризує часову ефективність інвестицій — тобто, через який період проєкт починає приносити чистий прибуток.

На рис. 5.1. представлено життєвий цикл інвестицій.

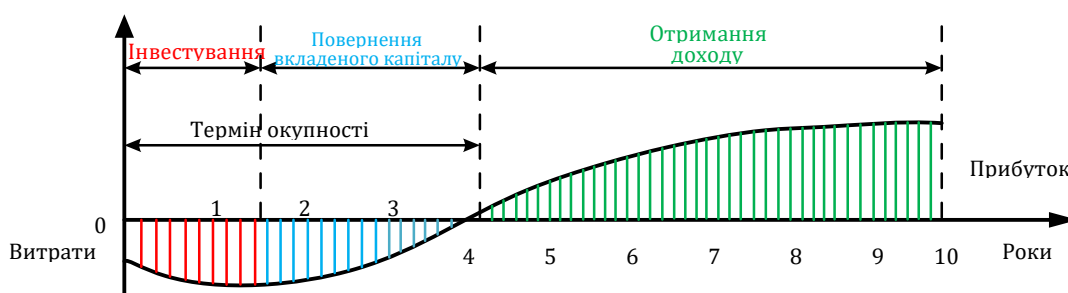


Рисунок 5.1 - Життєвий цикл інвестицій

## **Економічний ефект у системах автоматизованого електроприводу.**

Економічна ефективність автоматизованих електроприводів досягається за рахунок впровадження сучасних технологій енергозбереження, оптимізації керування та підвищення надійності обладнання. Основні напрями отримання економічного ефекту включають:

- **Використання енергоефективних електроприводів і систем керування**, що забезпечують зниження споживання електроенергії. Частотні перетворювачі дозволяють регулювати швидкість обертання двигуна відповідно до технологічного навантаження, що запобігає зайвим втратам енергії.

- **Оптимізацію режимів роботи приводів** — завдяки точному регулюванню, скороченню часу перехідних процесів і узгодженню роботи декількох електроприводів у складі технологічної лінії.

- **Застосування систем моніторингу та діагностики**, які дозволяють своєчасно виявляти ознаки зношення або несправності обладнання, планувати профілактичне обслуговування й мінімізувати ризик простоїв.

- **Раціональне використання матеріальних, трудових і часових ресурсів**, що сприяє зниженню собівартості продукції та підвищенню продуктивності виробництва.

Вибір конкретних заходів і стратегій підвищення ефективності залежить від типу виробничого процесу, рівня автоматизації, технічного стану обладнання та цілей підприємства. Комплексне впровадження таких рішень забезпечує стале енергозбереження, підвищення економічної віддачі інвестицій та зниження експлуатаційних витрат протягом усього життєвого циклу системи.

Висновки.

1. Проєктування електромеханічних систем — це комплексний процес, який об'єднує електричні, механічні, інформаційні та програмні компоненти для створення інтегрованих технічних рішень.

2. Основними етапами проєктування є: визначення вимог, концептуальне та системне проєктування, електрична й механічна розробка, створення програмного забезпечення, інтеграція, тестування, оптимізація та оформлення документації.

3. Дотримання послідовності стадій проєктування згідно з ДБН А.2.2-3-2014 гарантує структурованість і узгодженість усіх технічних, економічних та організаційних аспектів.

4. Технічне завдання (ТЗ) є базовим документом, який визначає вимоги, функціональні можливості, параметри та критерії якості майбутньої системи, а також забезпечує взаєморозуміння між замовником і виконавцем.

5. Технічні умови (ТУ) формують нормативну основу для розроблення, випробувань і експлуатації системи, встановлюючи вимоги до надійності, безпеки, енергоспоживання та екологічності.

6. Техніко-економічне обґрунтування (ТЕО) є важливим етапом інженерного аналізу, який дозволяє оцінити технічну здійсненність і економічну ефективність проекту.

7. ТЕО включає технічний, економічний, правовий, екологічний і ризик-аналіз, що забезпечує комплексну оцінку доцільності реалізації інженерного рішення.

8. Для оцінки ефективності проекту використовують основні фінансові показники: чисту приведену вартість (NPV), внутрішню норму доходності (IRR), період окупності (PBP), економічну рентабельність (EP) та індекс рентабельності (IP).

9. Розроблення систем автоматизації супроводжується створенням повного комплексу робочої та конструкторської документації відповідно до вимог ЄСКД і ДСТУ.

10. Економічна ефективність автоматизованих електроприводів досягається завдяки впровадженню енергоощадних технологій, точному регулюванню режимів роботи, використанню частотних перетворювачів і систем діагностики стану обладнання.

Контрольні питання до теми 5.

1. Що є основною метою проектування електромеханічних систем?

2. Які основні етапи включає процес проектування електромеханічних систем?

3. Яку роль відіграє технічне завдання (ТЗ) у процесі проектування?

4. Які розділи входять до складу типової структури технічного завдання?

5. Чим відрізняються технічне завдання (ТЗ) і технічні умови (ТУ)?

6. У чому полягає мета техніко-економічного обґрунтування (ТЕО)?

7. Які основні складові включає структура ТЕО?

8. Поясніть сутність понять NPV, IRR, PBP, EP та IP.

9. Які критерії використовуються для вибору оптимального варіанта технічного рішення?

10. Які нормативні документи регламентують склад та зміст проектної документації в Україні?

11. У яких випадках застосовується одностадійне, двостадійне або тристадійне проектування?

12. Що є складовими робочої документації систем автоматизації?

13. Як забезпечується інтеграція апаратних і програмних засобів у системі під час тестування?

14. Які чинники впливають на економічну ефективність автоматизованих електроприводів?

15. Які напрями енергозбереження можуть бути реалізовані при модернізації систем електроприводу підприємств ГМК?

Використана література.

1. Інжиніринг електротехнічних та мехатронних систем : підруч. для здобувачів ступеня магістра за спец. 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / А. В. Босак, А. В. Торопов, Л. В. Торопова; КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. 251 с.

2. Інжиніринг електротехнічних та мехатронних систем: конспект лекцій : навч. посіб. для здобувачів ступеня магістр за освітньою програмою «Інжиніринг інтелектуальних електротехнічних та мехатронних комплексів» спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / О.В. Чермалих, О.В. Данілін, А.В. Босак. Л.В. Торопова; КПІ ім. Ігоря Сікорського.. Київ : КПІ ім.Ігоря Сікорського, 2021. 77 с.

## ТЕМА 6. ІНЖИНІРИНГ НАСОСНИХ УСТАНОВОК

Види та класифікація промислових насосів. Вибір електроприводу для насосних агрегатів. Особливості пуску, регулювання та захисту. Методи підвищення енергоефективності насосних систем. Модернізація насосних станцій.

### Характеристика насосного обладнання

Насосні установки (НУ) посідають важливе місце у промисловості та комунальному господарстві, оскільки забезпечують транспортування рідин у різних технологічних процесах. Сьогодні вони належать до найбільш енергоємних споживачів у складі енергетичного балансу підприємств. Діапазон потужностей насосних машин є надзвичайно широким, тому навіть незначне підвищення коефіцієнта корисної дії (ККД) може забезпечити суттєву економію енергоресурсів.

На сучасних насосних установках найширше застосовуються лопатеві насоси, серед яких переважають відцентрові та осьові конструкції. Відцентрові насоси можуть бути одноступеневими, коли використовується одне робоче колесо, або багатоступеневими, якщо передбачено декілька коліс, розміщених послідовно. Залежно від орієнтації вала, насоси поділяють на горизонтальні та вертикальні.

У середині спірального корпусу (1) відцентрового насоса (рис. 6.1) розміщується робоче колесо (2), яке закріплене на валі (3). Колесо складається з двох дисків, між якими розташовано лопаті (4). Корпус насоса з'єднується з всмоктувальною і нагнітальною патрубками (5 і 6). Після заповнення корпусу та всмоктувальної лінії рідиною, при наданні робочому колесу обертального руху рідина під дією лопатей починає рухатися. Під впливом відцентрових сил рідина спрямовується до периферії колеса, де створюється підвищений тиск, тоді як у центрі утворюється розрідження. Різниця тисків забезпечує безперервну подачу рідини до напірного трубопроводу.

Робоче колесо осьового насоса (рис. 6.2) обертається в сферичній камері, в якій рідина рухається вздовж осі обертання.

Під час взаємодії лопатей колеса з рідиною утворюється різниця тисків — над лопаттю тиск підвищується, а під нею знижується, що зумовлює поступальний рух рідини вздовж осі насоса.

Осьові насоси поділяються на два основні типи:

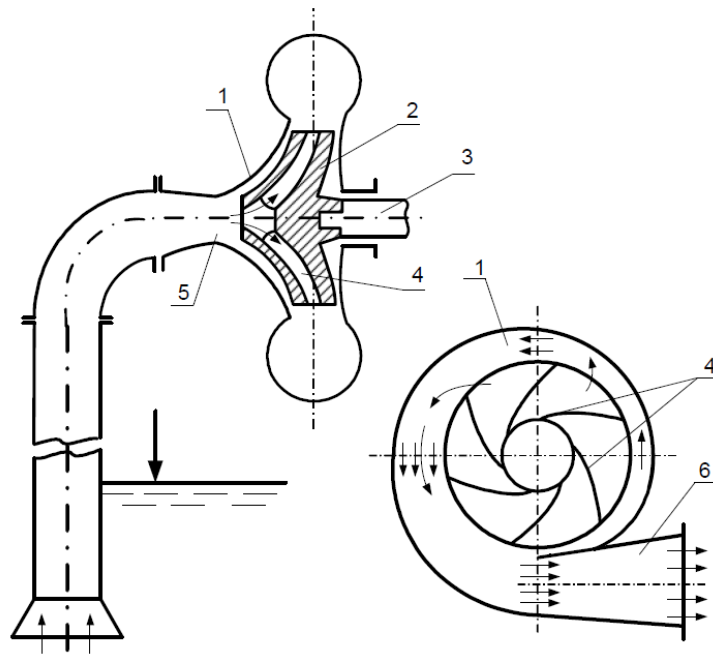
- тип О — із жорстко закріпленими лопатями робочого колеса;
- тип ОП — із поворотними лопатями, що дозволяє змінювати кут атаки потоку.

Кожен із цих типів може мати дві конструктивні модифікації:

- Г — з горизонтальним розташуванням вала;
- В — з вертикальним розташуванням вала.

Якщо насосна установка складається з декількох агрегатів, їхні всмоктувальні та напірні лінії з'єднують між собою через відповідні колектори, що забезпечує узгоджену роботу системи.

При аналізі та побудові робочих характеристик насосів основним змінним параметром приймають подачу насоса ( $Q$ ). Усі інші гідравлічні величини — напір ( $H$ ), потужність ( $N$ ) та коефіцієнт корисної дії ( $\eta$ ) — залежать від цієї подачі при фіксованій частоті обертання  $n$  робочого колеса діаметром  $D$ . Таким чином, характеристика насоса визначається сукупністю залежностей  $H-Q$ ,  $N-Q$  та  $\eta-Q$ , що описують його робочі властивості при сталій швидкості обертання..



1 – корпус; 2 – робоче колесо; 3 – вал; 4 – лопаті; 5, 6 – всмоктуючий та напірний патрубки, відповідно

Рисунок 6.1 – Схема одноступеневого відцентрового насоса

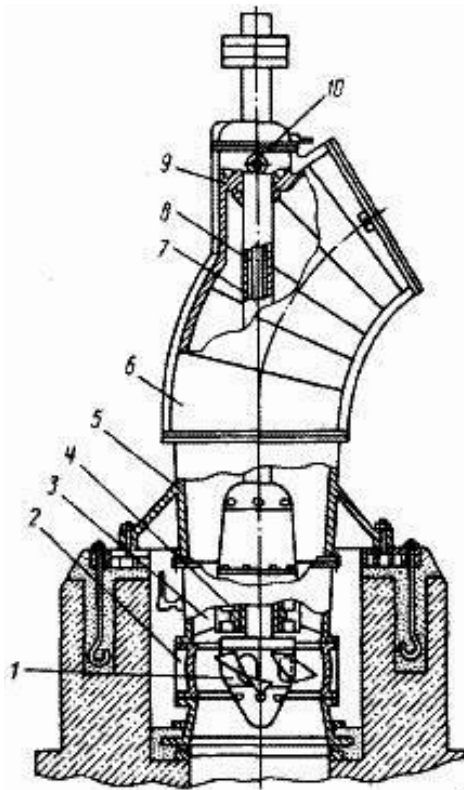
Паспортні характеристики  $H-Q$ ;  $N-Q$ ;  $\eta-Q$  насоса типу 6НДс наведено на рис. 6.3.

Залежно від конструкції робочого колеса та його швидкохідності, розрізняють три основні типи характеристик:

1. Пологі (рис. 6.4, крива 1);
2. Круто спадні (рис. 6.4, крива 2);
3. Із чітко вираженим максимумом (рис. 6.4, крива 3).

Для насосів із характеристикою третього типу робоча зона розташована праворуч від точки А на кривій (рис. 6.4, 3).

Ліва частина цієї ділянки відповідає нестійкій роботі, коли можливі коливання напору та зниження ККД.



1 – робоче колесо з поворотними лопатями; 2 – сферична камера; 3 – напрямний апарат; 4 – нижня опора вала; 5 – дифузор з лапами для кріплення до фундаменту; 6 – корпус насоса; 7 – вал; 8 – шток привода механізму розвертання лопатей; 9 – верхній напрямний підшипник; 10 – механізм повороту лопатей

Рисунок 6.2 – Осьовий насос типу ОП

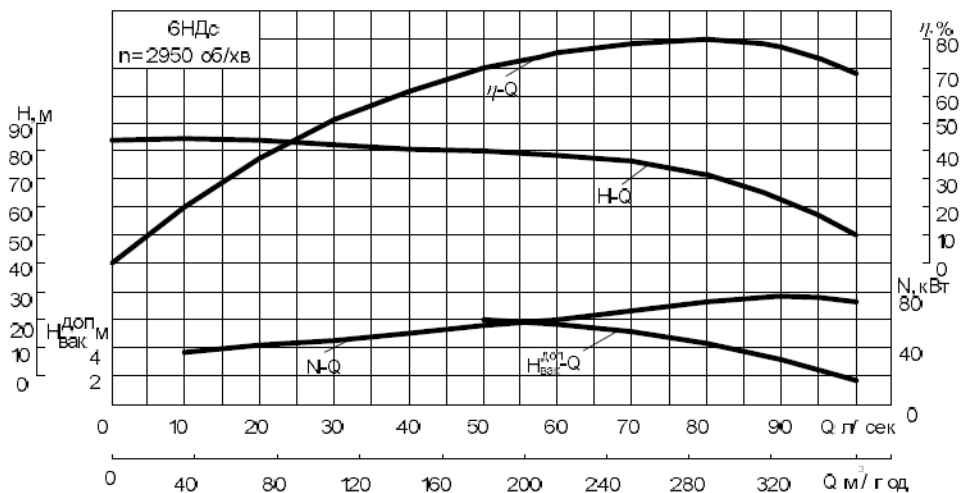


Рисунок 6.3 – Паспортні характеристики відцентрового насоса

Як видно з рисунка 6.5, крива ККД насоса має виражений максимум, який визначає область найраціональнішої експлуатації турбомеханізму.

У цій зоні значення подачі  $Q$  і напору  $H$  забезпечують стабільно високий ККД при сталих обертах  $n = const$ .

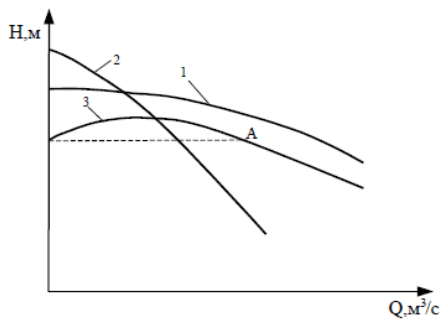


Рисунок 6.4 – Напірно-витратні характеристики насосів

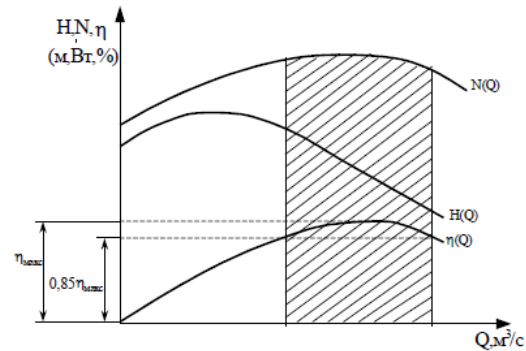


Рисунок 6.5 – Область раціонального використання відцентрового насоса при сталій швидкості обертання

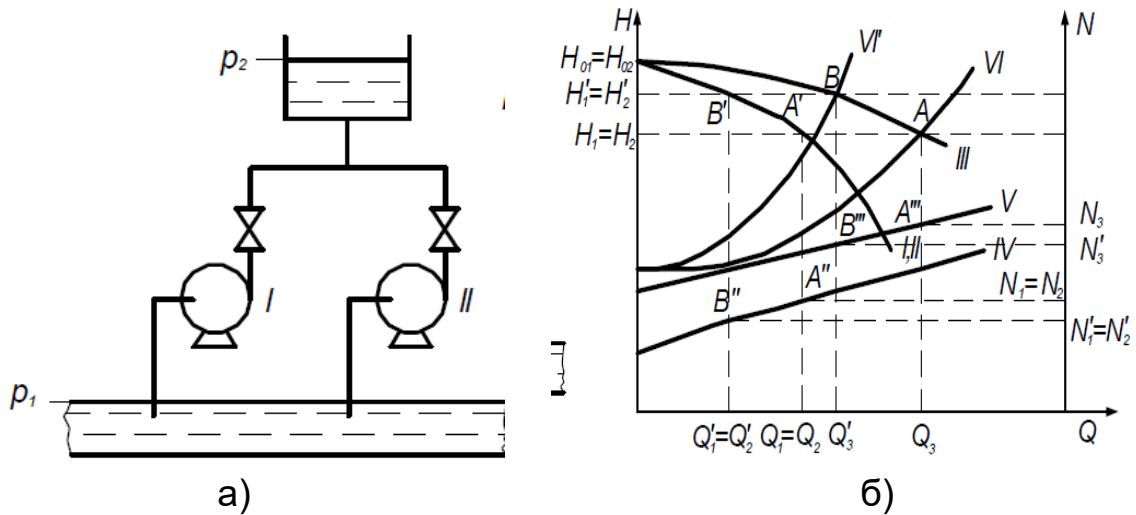
У більшості випадків насосні установки складаються з декількох машин, які можуть працювати паралельно (рис. 6.6, а) або послідовно (рис. 6.7, а). Така конфігурація дозволяє або змінювати витрату рідини відповідно до графіка водоспоживання, або підвищувати напір у системі. Під час спільної роботи відцентрові насоси впливають один на одного, тому їх подача, напір, потужність і ККД залежать від режиму навантаження кожного з агрегатів.

Для аналізу режимів роботи насосів, що функціонують паралельно, використовують сумарні характеристики. На рисунку 6.6, б показано, як будується сумарна характеристика  $H-Q$  — шляхом додавання абсцис (подач) окремих насосів при однаковому значенні ординати (напору). Якщо перший і другий насоси мають напори  $H_1, H_2$ , подачі  $Q_1, Q_2$  і потужності  $N_1, N_2$  при загальній подачі  $Q_3$ , то для іншого режиму ( $Q'_3$ ) відповідні параметри позначаються як  $H'_1, H'_2, Q'_1, Q'_2, N'_1, N'_2$ . При цьому  $H_{01}$  і  $H_{02}$  — це напори першого та другого насосів при нульовій подачі.

Паралельне з'єднання дозволяє збільшити сумарну подачу та частково підвищити напір системи. Ефект від такого з'єднання тим більший, чим пологішою є характеристика мережі.

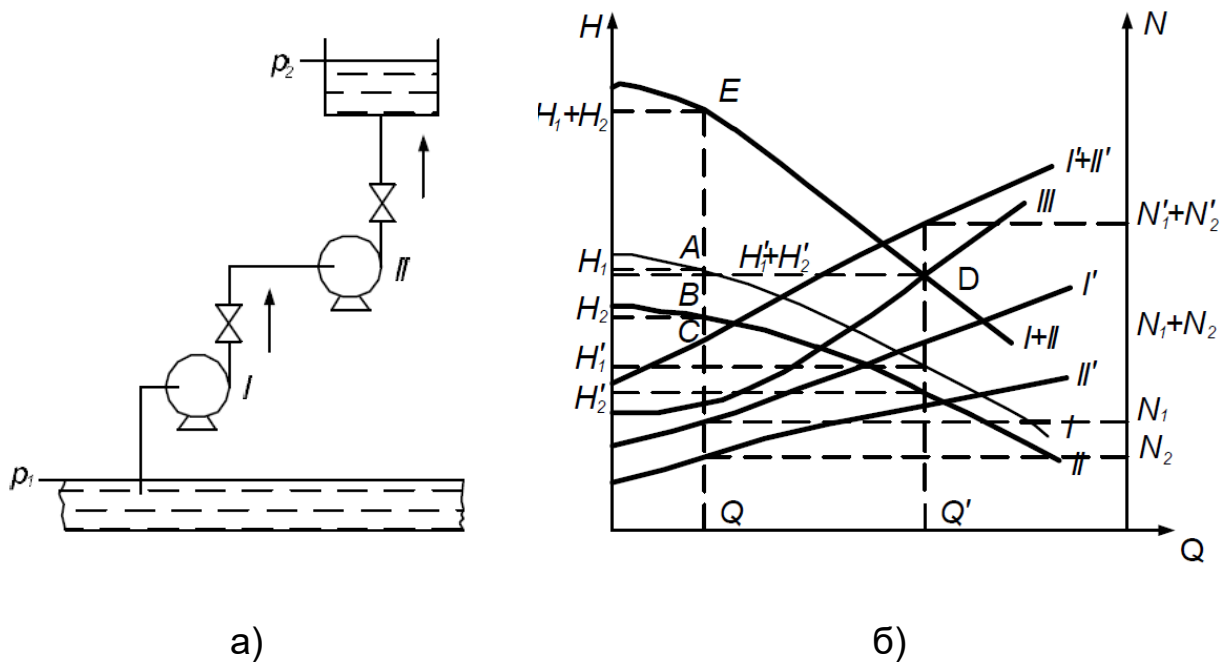
Послідовне з'єднання насосів застосовується у випадках, коли потрібно отримати підвищений напір, який неможливо забезпечити одним агрегатом. При цьому рідина, що виходить із першого насоса, надходить до всмоктувального патрубку другого, який підвищує тиск і подає потік у напірний трубопровід (рис. 6.7, а).

Для таких систем загальна характеристика насосної установки формується додаванням ординат (напорів) окремих насосів при однаковій подачі. Наприклад, точка Е на кривій сумарної характеристики (I + II, рис. 6.7, б) отримується шляхом додавання напорів  $H_1$  та  $H_2$  при певній подачі  $Q$ , а також відповідних потужностей  $N_1, N_2$ . Якщо насоси працюють на трубопроводі з характеристикою (III, рис. 6.7, б), то робоча точка D визначає подачу  $Q'$  при сумарному напорі  $H'_1 + H'_2$  і потужності  $N'_1 + N'_2$ .



а) технологічна схема; б) графік спільної роботи двох однакових насосів

Рисунок 6.6 – Паралельне з'єднання відцентрових насосів



а) технологічна схема; б) графік спільної роботи двох однакових насосів

Рисунок 6.7 – Послідовне з'єднання відцентрових насосів

### Електропривод насосних установок

Насосний агрегат (НА) являє собою комплекс насосного обладнання, електроприводу та передавального механізму, який забезпечує перетворення енергії електричного струму в гідравлічну енергію потоку рідини. У більшості випадків у ролі приводу НА використовують електродвигуни (ЕД), до яких висувають специфічні вимоги, пов'язані з особливостями пуску, навантаження та умовами експлуатації.

Однією з ключових вимог є здатність двигуна забезпечувати пуск під навантаженням, що виникає під час запуску насосного агрегату.

Конструкція ЕД має допускати тривале обертання ротора у зворотному напрямку (не менше 5 хвилин) зі швидкістю, яка визначається характеристикою насоса, наприклад, під час аварійної або штатної зупинки агрегату після відключення його від мережі.

Крім того, для насосних станцій, що працюють у режимах із частими пусками, конструкція статора й пускових обмоток двигуна повинна бути розрахована на підвищені термічні навантаження, адже нагрівання обмежує кількість допустимих пусків і визначає мінімальний час паузи між ними.

Для приводу насосів малої та середньої потужності (до 200–250 кВт), а також для установок, що працюють із частими пусками, рекомендується застосовувати асинхронні електродвигуни єдиної серії А. Залежно від діапазону потужності використовуються такі типи:

- до 100 кВт — серії А2 та АТ2;
- у межах 100–400 кВт — серії А і АК з контактними кільцями;
- понад 400 кВт — серії АЗ (закриті) та АКЗ із короткозамкненим ротором;
- у діапазоні 200–2000 кВт — серії АН із короткозамкненим ротором і АКН із фазним ротором.

Найпоширенішим варіантом є електропривод із короткозамкненим асинхронним двигуном, який відзначається простотою конструкції, надійністю та низькою вартістю. Такі двигуни не потребують постійного обслуговування, забезпечують тривалу роботу та легко інтегруються в автоматизовані системи керування.

Асинхронні двигуни з фазним ротором у насосних установках використовують рідко через складнішу експлуатацію і необхідність обслуговування контактних кілець.

Для насосів потужністю понад 250 кВт або агрегатів, що працюють у тривалих режимах, доцільно використовувати синхронні електродвигуни загальнопромислового виконання. Вони випускаються у широкому діапазоні потужностей (80–10 000 кВт) та швидкостей обертання (100–1500 об/хв) при робочих напругах від 380 до 10 000 В.

Для їх збудження рекомендується застосовувати статичні тиристорні збуджувачі, які дозволяють плавно регулювати струм збудження, знижують експлуатаційні витрати, спрощують технічне обслуговування та підвищують енергоефективність установки.

Для підвищення гнучкості керування насосними агрегатами та покращення енергоефективності насосних станцій доцільно використовувати двошвидкісні електродвигуни, які мають дві обмотки статора з різною кількістю пар полюсів. Такі двигуни забезпечують роботу з частотами обертання, що відрізняються на 25–35 %, що дозволяє регулювати подачу та напір насоса без значних енергетичних втрат. Перехід із однієї швидкості на іншу виконується шляхом послідовного вимкнення однієї обмотки та вмикання іншої, що не потребує складних схем керування.

Окремий тип машин, що використовуються у спеціалізованих системах, — це двигуни-генератори, які входять до складу оборотних насосних

агрегатів. Такі установки розраховані на роботу у двох протилежних напрямках обертання — у насосному (при подачі рідини) та турбінному (при рекуперації енергії потоку).

Реверсивні електричні машини повинні витримувати часті пуски, зупинки, зміни напрямку обертання та короткочасні режими прискорення і гальмування. Конструктивно вони відрізняються посиленими вузлами ротора і підшипників, а також здатністю працювати у трьох режимах:

- двигуна,
- генератора,
- синхронного компенсатора.

Такі агрегати застосовують у системах, де необхідна комбінована робота насоса і турбіни та можливість рекуперації енергії в електричну мережу.

#### Характеристика трубопровідної мережі

Реальні робочі характеристики насоса визначаються лише у випадку спільного аналізу параметрів насоса та трубопровідної системи, на яку він працює.

Загальний напір, створюваний насосом, складається з двох компонентів:

- статичного напору  $H_c$ , який витрачається на підйом рідини на певну висоту (геодезичний напір);
- динамічного напору, необхідного для подолання гідродинамічного опору трубопроводу, що визначається виразом (рис. 6.8)

$$h = R_c Q_c^2.$$

Характеристику трубопроводу (мережі) виражають рівнянням:

$$H = H_c + R_c Q^2,$$

де  $R_c$  – гідродинамічний опір мережі, що залежить від довжини мережі, величини діаметра трубопроводу, шорсткості стінок і наявності місцевих опорів (колін, зворотних клапанів, засувки),  $\text{с}^2/\text{м}^5$ .

Якщо протитиск відсутній, то характеристика мережі спрощується до вигляду:

$$H = R_c Q^2.$$

Отже, характеристика трубопровідної системи може бути подана у вигляді сімейства параболічних кривих, крутизна яких визначається величиною  $R_c$ .

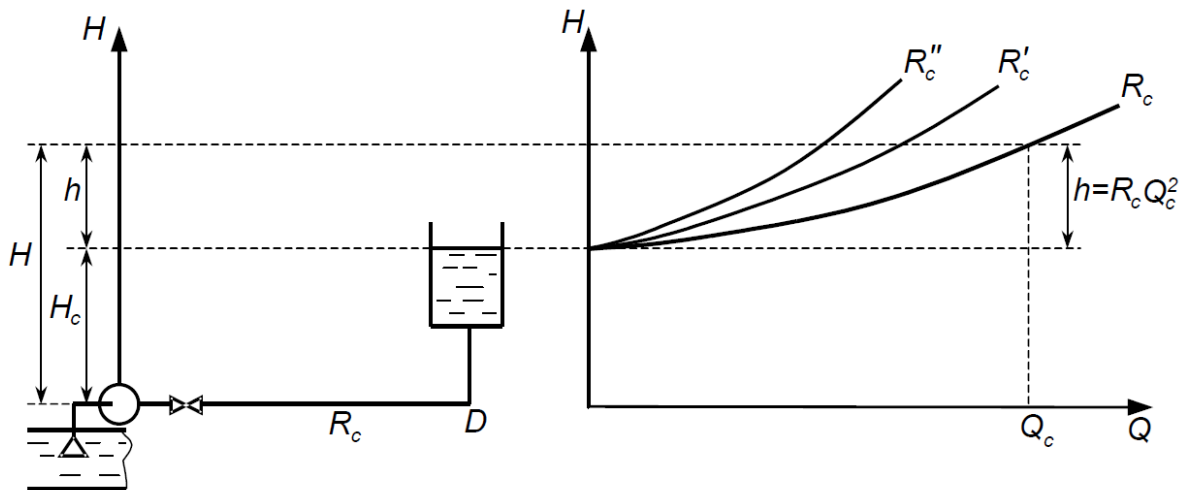


Рисунок 6.8 – Схема трубопроводу та його характеристика

### Визначення втрат тиску в трубопроводі

Розрахунок трубопровідної мережі полягає у визначенні втрат напору на кожній з ділянок мережі при заданих витраті й довжині кожної ділянки.

Розрізняють втрати напору по довжині трубопроводу  $h_{\text{довж}}$  і втрати на подолання місцевих опорів  $h_{\text{м}}$ :

$$h = h_{\text{довж}} + h_{\text{м}}$$

Втрати напору по довжині трубопроводу визначаються в загальному випадку за формулою Дарсі-Вейсбаха:

$$h_{\text{довж}} = \lambda \frac{l v^2}{d 2g},$$

де  $l$  – довжина труби, м;  $d$  – її діаметр, м;  $v = \frac{4Q}{\pi d^2}$  – швидкість рідини в трубі, м/с;  $\lambda$  – коефіцієнт, який враховує тертя рідини об стінку труби, що залежить від матеріалу й стану стінки труби (для наближених розрахунків можна взяти  $\lambda = 0,02 - 0,03$ );  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$  – прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>.

Місцеві опори виникають через зміну конфігурації потоку — звуження, розширення, повороти труб, арматуру тощо. Втрати напору на подолання місцевих опорів визначаються за формулою:

$$h_{\text{м}} = \sum \xi \frac{v^2}{2g},$$

де  $\xi$  – коефіцієнт місцевого опору для ділянки труби, що залежить від виду місцевого опору й від числа Рейнольдса та визначається за таблицями з довідника.

Для спрощення розрахунків усі місцеві опори можна замінити еквівалентною довжиною труби, де втрати ті самі, що й у місцевому опорі. Позначивши через  $k_1$  приведений коефіцієнт, отримуємо:

$$\sum \xi = k_1 l$$

Тоді, після перетворення виразів отримуємо:

$$h = \left(k_1 + \frac{\lambda}{d}\right) \frac{8lQ^2}{\pi^2 d^4 g} = SlQ^2$$

де  $S = \left(k_1 + \frac{\lambda}{d}\right) \frac{8}{\pi^2 d^4 g}$  питомий опір трубопроводу довжиною 1 м при одиничній витраті, який визначається за табличними даними.

Керування продуктивністю насосної установки

Під регулюванням режимів роботи насосної установки (НУ) розуміють навмисну зміну її параметрів — подачі (Q) та напору (H) — відповідно до потреб споживача або режиму роботи системи.

Основні методи регулювання подачі насоса поділяють за способом впливу:

1. Вплив на механізм — зміна кута установки лопатей робочого колеса.
2. Вплив на мережу — дроселювання (часткове прикриття засувки).
3. Вплив на електропривод — зміна швидкості обертання робочого колеса.
4. Зміна кількості працюючих агрегатів — підключення або відключення насосів.

Регулювання за допомогою напрямного апарата

Питома енергія, яку насос передає рідині, істотно залежить від умов входу потоку на лопаті робочого колеса.

Якщо потік закручується перед входом у колесо, то змінюється напір H і подача Q, що дозволяє здійснювати регулювання за допомогою лопатевого напрямного апарата, розміщеного безпосередньо перед колесом.

При цьому характеристика мережі залишається незмінною, а характеристика насоса повертається за годинниковою стрілкою (рис. 6.9). Зменшення споживаної потужності визначається заштрихованою областю між кривими потужності  $N_1$  і I–II–III, що свідчить про економічність такого способу регулювання.

Дросельне регулювання

Приклад дросельного регулювання наведено на рисунку 6.10.

Якщо засувка на напірному трубопроводі повністю відкрита, то робочий режим установки визначається точкою А з параметрами  $Q_A, H_A, N_A, \eta_A$ . Поступове прикриття засувки збільшує гідравлічний опір мережі, і робоча точка зміщується вздовж характеристики трубопроводу вгору та вліво — до точок В і С, які відповідають новим параметрам  $Q_C, H_C, N_C, \eta_C$ .

Дроселювання при постійній швидкості обертання змінює витрату за рахунок введення додаткового опору в мережу, що супроводжується зростанням втрат енергії.

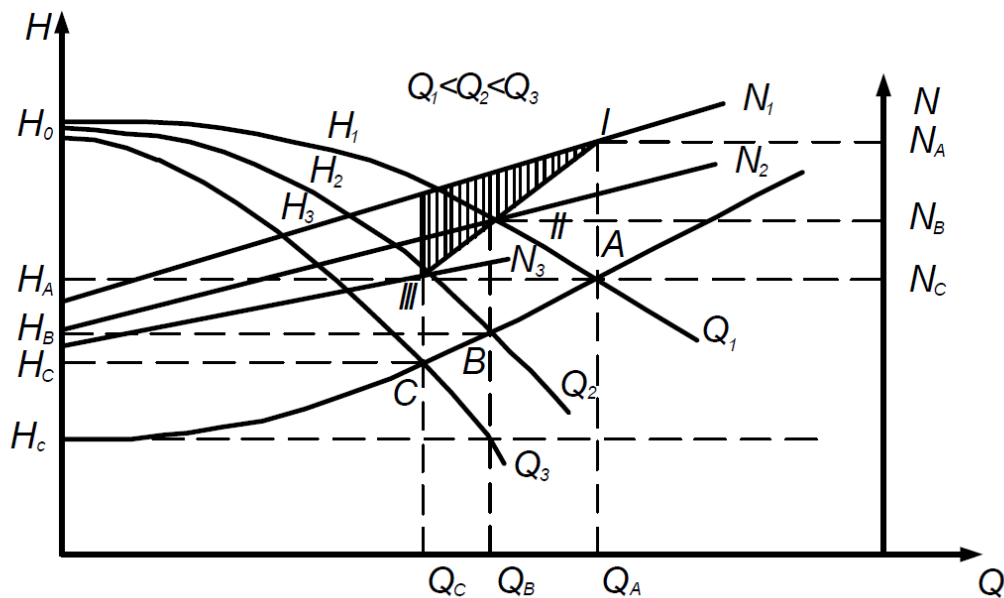


Рисунок 6.9 – Регулювання продуктивності НУ впливом на механізм

Оскільки найбільша подача досягається при повністю відкритому дроселі, дросельне регулювання застосовують тільки з метою зменшення подачі. З рис. 6.10 видно, що дроселювання зменшує потужність на валу насоса і разом з тим підвищує частку енергії, що витрачається при регулюванні; тому воно неекономічне. Так, при регулюванні до подачі  $Q_C$  з напором, що непродуктивно витрачається в дроселі, визначається відрізком  $H_{зд}$ , а потужність, що втрачається при цьому, буде дорівнювати

$$\Delta N = \frac{\rho Q_C g H_{зд}}{1000 \eta_c}$$

де  $H_{зд}$  — надлишковий напір, який втрачається в дроселі;

$\rho$  — густина рідини,  $\text{кг/м}^3$ ;

$g$  — прискорення вільного падіння;

$Q_C$  — подача при регулюванні;

$\eta_c$  — ККД насоса при цьому режимі.

Чим більший ступінь дроселювання, тим менш економічним є процес, оскільки збільшується непродуктивна витрата енергії.

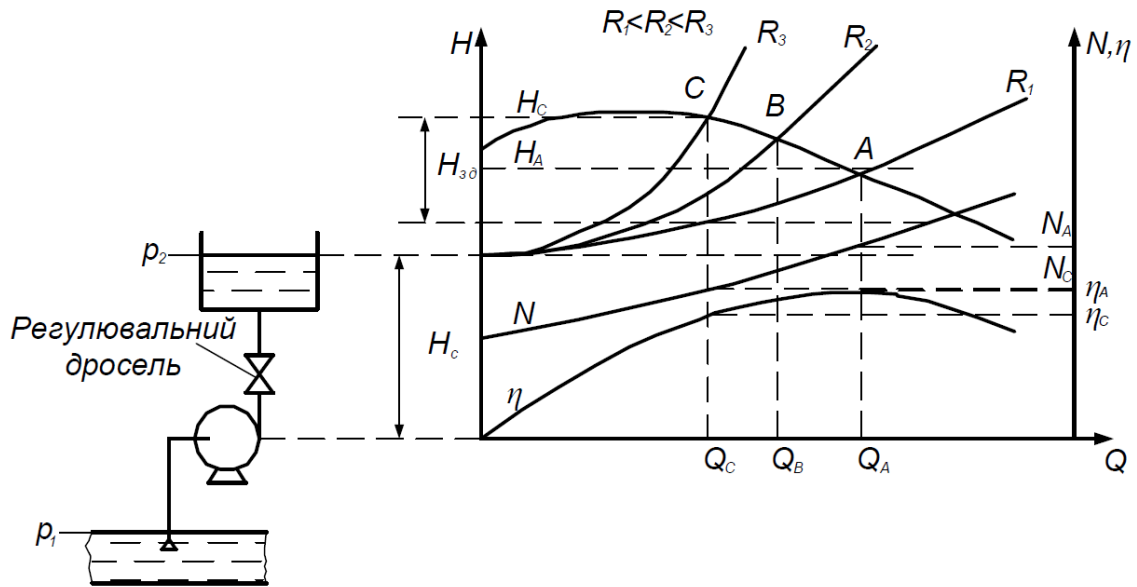


Рисунок 6.10 – Регулювання продуктивності насоса дроселюванням

#### Регулювання зміною частоти обертання

На рисунку 6.11 показано зміну характеристик насоса при різних частотах обертання  $n_1 > n_2 > n_3 > n_4$ . Оскільки положення засувки незмінне, опір мережі залишається сталим. Зі зменшенням швидкості обертання робоче колесо створює менший напір, тому робоча точка переміщується вниз уздовж характеристики мережі.

Зниження швидкості обертання до певного значення, при якому напір дорівнює статичному (точка D), призводить до повного припинення подачі ( $Q = 0$ ). Подальше зменшення швидкості робить насос неспроможним долати статичний напір.

Залежність між параметрами подачі, напору та частоти обертання визначається законами подібності (пропорційності), наведеними нижче:

$$Q \sim n, \quad H \sim n^2, \quad N \sim n^3$$

де  $Q$  — подача,  $H$  — напір,  $N$  — потужність,  $n$  — частота обертання.

Таким чином, регулювання частотою обертання є найефективнішим і найбільш енергоощадним способом, адже воно не спричиняє непродуктивних втрат потужності.

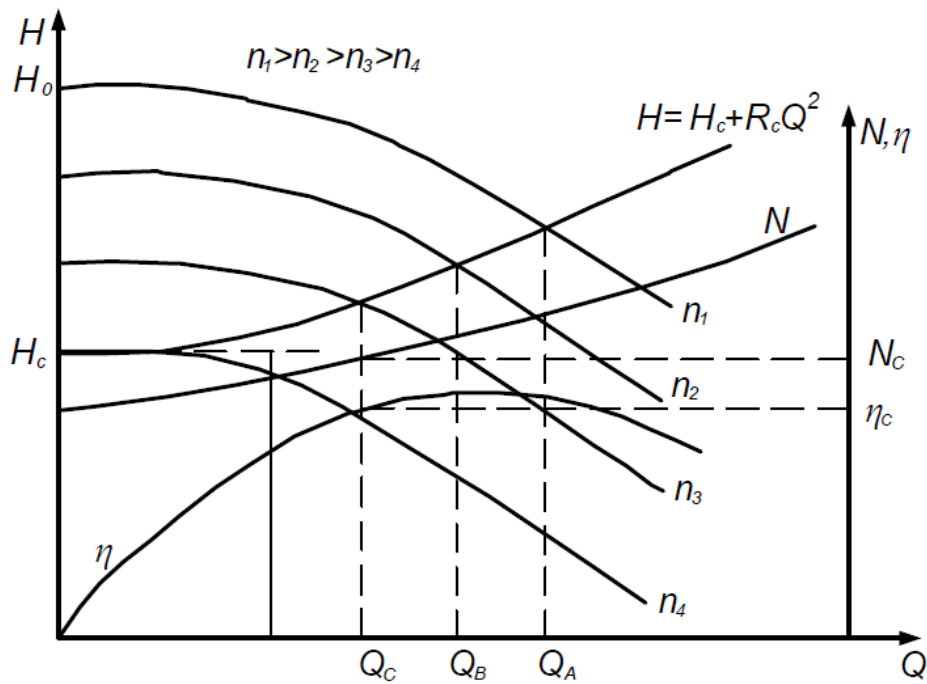


Рисунок 6.11 – Регулювання продуктивності насоса зміною частоти обертання

Аналіз продуктивності при зміні кількості паралельно працюючих насосів  
 Якщо насосна станція обладнана кількома агрегатами з різною подачею, то в залежності від поточного водоспоживання до роботи підключаються або відключаються окремі насоси.

Таке керування дозволяє підтримувати необхідний рівень тиску в мережі, але при цьому часті пуски й зупинки агрегатів можуть знижувати надійність обладнання, спричиняти гідравлічні удари та перепади тиску, що іноді призводить до аварійних ситуацій.

На рисунку 6.12 показано східчасту характеристику продуктивності насосної установки при різній кількості працюючих агрегатів  $k = 5, 4, 3, \dots$  та апроксимуючу криву  $Q(t)$ , що відображає зміну витрати в часі.

Заштриховані ділянки між кривими визначають втрати гідравлічної потужності, які обчислюються за формулою:

$$N_r = \int_0^{t_m} \Delta Q(t) H(t) dt$$

Де  $\Delta Q(t)$  — різниця між фактичною та необхідною подачею;  
 $H(t)$  — напір у мережі;  
 $t_m$  — тривалість процесу регулювання.

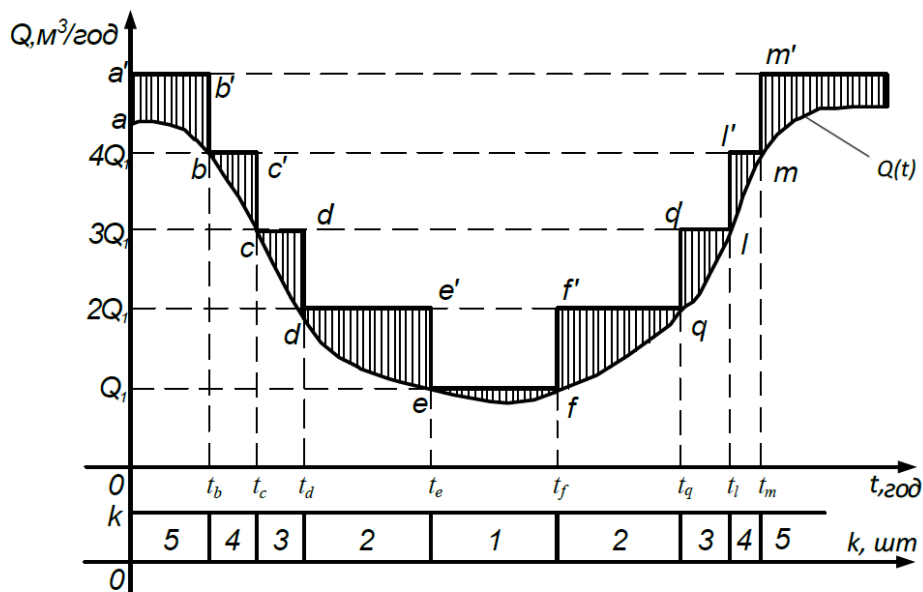


Рисунок 6.12 – Продуктивності НУ при зміні числа паралельно працюючих механізмів

Припускаючи, що тиск  $H(t)$  залишається сталим, можна вважати, що ці втрати відсутні у випадку нескінченно великої кількості ступенів регулювання або за наявності регульованого електропривода, який плавно змінює частоту обертання двигуна.

Аналогічного ефекту досягають, якщо у складі станції працює декілька агрегатів, з яких один має регульовану швидкість обертання, а решта — фіксовану. Наприклад:

- на інтервалі часу  $t_c - t_d$  працюють два агрегати з постійною швидкістю та один з регульованою;
- на інтервалі  $t_l - t_m$  — три з постійною та один із регульованою швидкістю.

Такий підхід забезпечує зменшення втрат енергії і стабілізує роботу насосної станції.

Узагальнюючи результати, можна виокремити основні недоліки традиційних систем електропривода насосних установок:

- дросельне регулювання або зміна кількості насосів спрямовані на вирішення лише технологічних, а не енергетичних завдань, тому втрати електроенергії сягають 5–30 %;
- некеровані пускові режими знижують надійність обладнання;
- часте вмикання й відключення агрегатів призводить до гідравлічних ударів і підвищує ризик аварійності системи.

#### Наявні способи опису характеристик насосних агрегатів

Для оцінювання та прогнозування роботи насосів при зміні швидкості обертання робочого колеса використовують характеристики пропорційності (або закони подібності), які дають змогу перерахувати параметри насоса на будь-яку іншу частоту обертання.

Відповідно до цих закономірностей:

– подача (продуктивність) насоса пропорційна частоті обертання:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{\omega_1}{\omega_2} \text{ або } Q = K_Q \omega;$$

– напір  $H$ , що розвивається механізмом, пропорційний квадрату швидкості обертання

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{\omega_1}{\omega_2}\right)^2 \text{ або } H = K_H \omega^2;$$

– корисна потужність  $N_{\text{кор}}$  що розвивається механізмом пропорційна кубу швидкості

$$\frac{N_{\text{кор.1}}}{N_{\text{кор.2}}} = \left(\frac{\omega_1}{\omega_2}\right)^3 \text{ або } N_{\text{кор}} = K_P \omega^3;$$

– ККД механізму в наближених розрахунках можна вважати постійним;

– потужність, що підводиться до вала, також пропорційна кубу швидкості

$$\frac{N_{\text{мех.1}}}{N_{\text{мех.2}}} = \left(\frac{\omega_1}{\omega_2}\right)^3 \text{ або } N_{\text{мех}} = K_P \omega^3;$$

– момент аеродинамічного опору насоса пропорційний квадрату швидкості

$$\frac{M_1}{M_2} = \left(\frac{\omega_1}{\omega_2}\right)^2 \text{ або } M = K_M \omega^2;$$

У формулах  $Q_1, H_1, N_{\text{кор}}, N_{\text{мех}}, M_1$  – витрата, напір, корисна потужність, споживана потужність, момент опору НА під час роботи на дану мережу при номінальній швидкості обертання  $\omega_1$  механізму;  $Q_i, H_i, N_{\text{кор}}, N_{\text{мех}}, M_i$  – те саме при швидкості  $\omega_i$ , відмінній від номінальної,  $K_Q, K_H, K_P, K_M$  — коефіцієнти пропорційності, що залежать від конструкції насоса.

Згідно з цими залежностями, при зменшенні швидкості обертання напір насоса зменшується пропорційно квадрату швидкості, а потужність — кубу швидкості. Отже, плавне регулювання частоти обертання двигуна дозволяє підтримувати необхідні гідравлічні параметри при мінімальних енергетичних витратах.

Зальна залежність для характеристики пропорційності має вигляд::

$$H_i = \frac{H_1}{Q_1^2} Q_i^2 = R Q_i^2.$$

Ця квадратична парабола описує зміну напору та продуктивності насоса при регулюванні швидкості обертання в умовах сталої гідравлічної мережі.

Апроксимація напірних та енергетичних характеристик насоса

Реальні експлуатаційні характеристики насосів, що працюють на мережу з протитиском, можуть бути описані аналітичними залежностями, які з достатньою точністю відтворюють результати експериментальних вимірювань. Такі апроксимаційні рівняння були запропоновані в роботах Онищенко Г.Б, Юнькова М.Г, Шевчука С.П., Коренькової Т.В.

Характеристика  $H-Q$  насоса з вираженим максимумом описується тричленом другого ступеня:

$$H = A_2 v^2 + B_2 v Q + C_2 Q^2.$$

Якщо характеристика  $H-Q$  насоса полога, то вираз для напірної характеристики має вигляд квадратичної параболи:

$$H = A_2 v^2 + C_2 Q^2 \quad \text{або} \quad H = H_0 v^2 - R_B Q^2.$$

Потужність, що підводиться до вала відцентрової машини, дорівнює:

$$N = A_3 v^2 Q + B_3 v Q^2 + D_3 v^3,$$

де у виразах  $v = \omega_i / \omega_H$  – відносна швидкість обертання робочого колеса насоса;  $\omega_H$  – номінальна швидкість обертання насоса;  $A_2, B_2, C_2, A_3, B_3, D_3$  – коефіцієнти апроксимації, що залежать від конструктивних особливостей механізму й визначаються за паспортними характеристиками насосів;  $H_0$  – напір, що розвиває насос при нульовій подачі;  $R_B$  – внутрішній опір насоса.

Корисна потужність турбомеханізму дорівнює:

$$N_K = \frac{\rho g Q H}{1000}$$

де  $\rho$  – щільність рідини, кг/м<sup>3</sup>;  $Q$  – подача насоса, м<sup>3</sup>/с;  $H$  – напір насоса, м.

З урахуванням (1.13) корисна потужність насоса:

$$N_K = \frac{\rho g}{1000} (A_2 v^2 Q + B_2 v Q^2 + C_2 Q^3)$$

Коефіцієнт корисної дії турбомеханізму дорівнює відношенню корисної потужності  $N_K$  до потужності  $N$ , яку підводять з боку вала турбомеханізму:

$$\eta_{\text{ТМ}} = \frac{N_{\text{к}}}{N} = \frac{\rho g}{1000} \left( \frac{A_2 v^2 Q + B_2 v Q^2 + C_2 Q^3}{A_3 v^2 Q + B_3 v Q^2 + D_3 v^3} \right)$$

Для нерегульованого за швидкістю агрегата (при  $v = 1,0$ ):

$$\eta_{\text{ТМ}} = \frac{N_{\text{к}}}{N} = \frac{\rho g}{1000} \left( \frac{A_2 Q + B_2 Q^2 + C_2 Q^3}{A_3 Q + B_3 Q^2 + D_3} \right)$$

Для одержання характеристик механізмів, описаних з деяким наближенням виразами коефіцієнти апроксимації  $A_2, B_2, C_2, A_3, B_3, D_3$  визначають за паспортними характеристиками цих насосів за трьома точками для  $v=1,0$

У таблиці 6.1 наведено значення апроксимаційних коефіцієнтів для ряду відцентрових насосів.

Таблиця 6.1 - Значення коефіцієнтів апроксимації для напірної й енергетичної характеристик насоса водопостачання.

Тип насоса	Паспортні дані					H-Q характеристика			N-Q характеристика		
	Q, м³/год	H, м	n, об/хв	N, кВт	η, %	A <sub>2</sub>	B <sub>2</sub>	C <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	B <sub>3</sub>	D <sub>3</sub>
Д2000-21	2000	21	980	150	80	31	-1,8748	-28,6934	97,2	-40,5	92
Д2000-100	2000	100	980	760	75	101.5	10,68	-83,677	1181,818	-619,835	150
Д2500-62	2500	62	980	500	87	75	35,1612	-78,1876	79,2	151,2432	330
Д3200-33	3200	33	980	400	88	44.5	-102,204	-3,4279	108	-1,318	230
Д3200-75	3200	75	980	800	87	89	5,1444	-23,0428	219,6	137,1168	420
Д4000-95	4000	95	980	1350	88	109	1,9688	-13,284	486	42,107	600
Д5000-32	5000	32	730	500	88	44	1,62	-7,452	198	-62,1043	340
Д6300-27-2	6300	27	730	600	79	43	-3,591	-3,212	70	9,493	393

### Альтернативні способи регулювання параметрів НУ

Регулювання продуктивності може здійснюватися за такими принципами:

- Зміна числа працюючих агрегатів.
- Поворот лопатей робочого колеса для зміни кута атаки потоку.
- Дроселювання – створення додаткового опору в трубопроводі.
- Зміна швидкості обертання робочого колеса.
- Байпасування потоку — частина перекачуваної рідини перепускається з напірного трубопроводу у всмоктувальний.

Щоб обґрунтувати вибір найефективнішого методу, необхідно попередньо оцінити енергетичні та вартісні показники кожної системи регулювання.

Активні регулювальні пристрої (САРП)

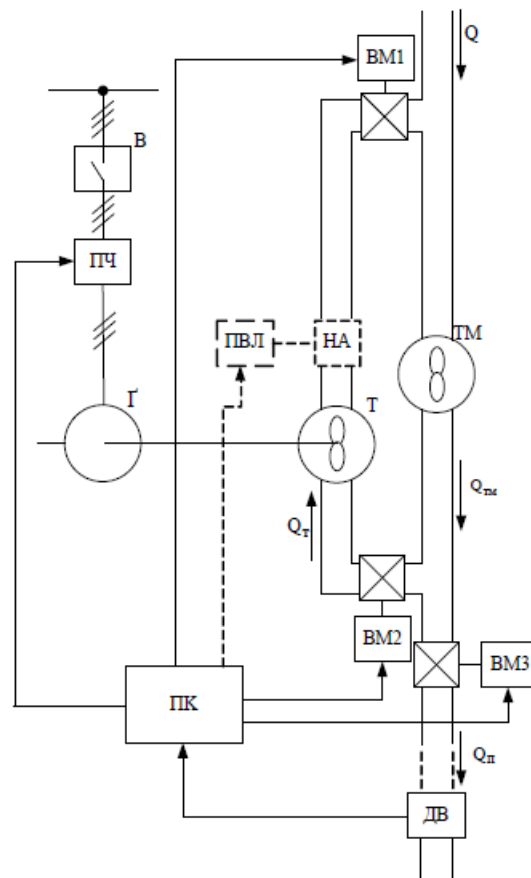
Перспективним напрямом є застосування систем активного регулювання параметрів (САРП), що базуються на поєднанні гідротурбіни, електромеханічного перетворювача та системи керування потужністю.

Такі системи дозволяють змінювати продуктивність насосного агрегату в широких межах, одночасно повертаючи надлишкову енергію до електромережі підприємства.

Можливі різні варіанти підключення САРП до технологічної схеми насосної установки:

- послідовно або паралельно з насосним агрегатом;
- паралельно із засувкою на виході насоса;
- у байпасному трубопроводі (рис. 6.13).

Особливий інтерес становить застосування оборотних гідромашин, здатних працювати як у насосному, так і в турбінному режимах, що розширює діапазон регулювання параметрів.



ПК – пристрій керування; ПВЛ – пристрій встановлення лопатей; НА – напрямний апарат; ПЧ – перетворювач частоти; В – вимикач; ТМ – турбомеханізм; ДВ – датчик витрати; ВМ 1-ВМ3 – виконавчі механізми засувки; Г – генератор; Т – турбіна

Рисунок 6.13 – Блок-схема засобу активного регулювання продуктивності турбомеханізму

## Вибір гідротурбіни

Тип гідротурбіни суттєво впливає на ефективність системи активного регулювання. Залежно від способу перетворення енергії потоку на механічну виділяють:

- реактивні (напірноструменеві) турбіни;
- активні (вільноструменеві) турбіни.

Кожен із цих типів поділяють на різновиди за напрямком потоку в робочому колесі та методом регулювання витрати.

Аналіз енергетичних показників гідроагрегатів, наведено у роботах, показав, що ККД гідротурбін знаходяться у межах 0,9– 0,95, ККД генераторів – 0,95–0,98.

## Способи зміни продуктивності турбіни

Підтримання необхідних параметрів у гідросистемі здійснюється зміною витрати та потужності турбіни, з метою роботи в зоні максимального ККД.

Продуктивність регулюють такими способами:

- зміною ступеня відкриття напрямного апарата;
- зміною кута повороту лопатей робочого колеса при фіксованому положенні напрямного апарата;
- зміною висоти напрямного апарата;
- комбінованим (подвійним) регулюванням двох параметрів одночасно.

## Регулювання через зміну частоти обертання

Технологічні параметри на виході гідротурбіни можуть змінюватися шляхом регулювання частоти обертання вала генератора.

У турбінах низького напору зі збільшенням частоти обертання витрата зростає, тоді як у високонапірних — зменшується.

Для поворотно-лопатевих турбін характерна зворотна залежність: при підвищенні швидкості обертання за незмінного відкриття напрямного апарата витрата зменшується.

Тому для керування потужністю доцільно застосовувати частотні перетворювачі (ПЧ), які забезпечують плавну зміну швидкості обертання в широкому діапазоні.

З цією метою використовуються чотириквADRантні ПЧ, здатні реалізувати реверс потужності на вході й виході електричної машини.

## Перехідні процеси в насосних комплексах

У процесі експлуатації насосних станцій відбуваються як стаціонарні, так і нестаціонарні (перехідні) режими. Перехідні процеси — це зміна стану системи у часі, зумовлена переходом з одного режиму в інший.

Вони виникають через зміну навантаження, пуск або зупинку насосів, а також під час аварійних ситуацій.

За характером і частотою виникнення всі перехідні процеси поділяють на:

- основні (експлуатаційні) — типові для нормальної роботи системи (пуск, зупинка, регулювання подачі, зміна режимів сусідніх агрегатів);
- особливі (аварійні) — кавітаційний зрив, помпаж, раптове відключення електродвигуна, пуск на порожній трубопровод тощо.

Склад елементів насосного комплексу

Типовий насосний комплекс (НК) містить:

- джерело живлення — насосну станцію або резервуар, розташований вище за рівень споживача;
- систему напірних трубопроводів;
- споживачів (водорозбірні пристрої, дощувальні машини, споруди тощо);
- запірну, регулювальну та запобіжну арматуру.

Перехідні процеси можуть бути спричинені зміною режимів роботи будь-якого з цих елементів: включенням або відключенням насосів, перекриттям окремих ділянок трубопроводу, зміною тиску на вході чи виході.

Такі процеси є небезпечними для обладнання, оскільки супроводжуються:

- пульсаціями тиску в насосах і трубопроводах;
- динамічними навантаженнями на елементи системи;
- вібрацією вузлів та фундаментів;
- перевищенням допустимих напруг у матеріалах.

Найчастіше це спостерігається в установках із великим напором і значною довжиною водоводів, коли навіть невелика зміна подачі викликає гідравлічний удар.

Пуск насосного агрегату

Відцентрові насоси характеризуються тим, що гідродинамічний момент на валу зростає із підвищенням подачі, тому пуск зазвичай здійснюють при закритій засувці або дисковому затворі (режим нульової подачі).

Такий спосіб полегшує роботу двигуна та запобігає перевантаженню при старті.

Послідовність пуску насоса:

1. Заповнити насос і всмоктувальний трубопровід робочою рідиною.
2. Увімкнути електродвигун і дати йому набрати номінальну швидкість.
3. Поступово відкрити напірну засувку до досягнення необхідної подачі.

Зупинка насосного агрегату

Зупинку здійснюють у зворотному порядку:

1. Повільно закривають засувку на напірному трубопроводі, переводячи насос у режим холостого ходу.
2. Закривають вхідну засувку.
3. Вимикають електродвигун.

Примітка. Насос і трубопровід не повинні залишатися заповненими водою, якщо температура може знизитись нижче +1 °С — замерзла рідина може пошкодити обладнання.

Під час пуску насос проходить два основні етапи:

1. Набір частоти обертання двигуна (а для синхронних — ще й процес синхронізації).
2. Робота з підвищеним напором до відкриття арматури та виходу на розрахунковий режим.

У деяких випадках допускається пуск на відкриту засувку (наприклад, у низьконапірних системах іригації з короткими водогонами), якщо потужність двигуна має достатній запас.

#### Зупинка насосного агрегата

Здійснюється відключенням насосного агрегата від мережі після попереднього прикриття засувки чи дискового затвора на напірному водоводі. Подача насоса зменшується до нуля, що, з одного боку, запобігає гідравлічному удару і робить зупинку безпечною для системи водоводів і устаткування станції, а, з іншого – при подачі, наближеній до нульової, значно підвищуються пульсація тиску, вібрації й знос насоса.

У насосних станціях з довгими водоводами їх спорожнювання може затягтися на стільки, що буде становити небезпеку для міцності агрегата. Обмеження, що накладаються на частоту зворотного обертання агрегата, пов'язані в основному з двигуном.

Відповідно до характеристики насоса двигуни розраховують на міцність при частотах обертання  $(1,3 - 1,5)n_{ном}$ . Однак унаслідок обтікання лопатей насоса зі значними кутами атаки пульсації тиску зростають до такої величини, що разом з коливаннями тиску від гідравлічного удару вони становлять небезпеку для міцності водоводу, а вібрації, що їх супроводжують сприяють прискореному зносу насоса.

#### Зрив подачі насоса

Виникає при зниженні дійсного кавітаційного запасу порівняно з необхідним при даній подачі. Це відбувається, як правило, під час пуску насоса на водовід з невеликим початковим тиском і виявляється у вигляді гідравлічних ударів, сильних поштовхів, тривалих знижень подачі та підвищених вібрацій.

#### Аварійне вимкнення енергоживлення насосного агрегату

Одним із найбільш небезпечних щодо динамічних навантажень режимів роботи насосної станції є раптове відключення електродвигуна від мережі без попереднього закриття напірної арматури.

Такий процес отримав назву «втрата привода».

Він може бути спричинений несправностями в енергосистемі, спрацьовуванням захистів або аварійними ситуаціями на лінії живлення.

Реакція системи залежить від типу арматури, встановленої на напірному трубопроводі.

У станціях зі зворотними клапанами втрата привода не викликає значних збільшень динамічних навантажень на агрегат, однак може супроводжуватися значним гідравлічним ударом у напірних водоводах і небезпечна для їх міцності. Після відключення двигуна знижується частота обертання агрегата, подача і напір, створювані насосом. При значній інерції води в напірному трубопроводі виникає нег'ативний гідравлічний удар. Після відображення нег'ативної хвилі тиску по водоводу проходить позитивна хвиля гідравлічного удару. При зменшенні частоти обертання до значення, при якому насос вже не створює тиску, достатнього для подолання статичного напору в трубопроводі, рух води змінює свій напрямок і закриває зворотний клапан. Виникає позитивний гідравлічний удар, а насос за інерцією продовжує працювати в насосному режимі з нульовою подачею. У всмоктувальному трубопроводі спостерігається зворотна картина.

У станціях з дисковими затворами при втраті привода насос послідовно проходить наступні етапи (рис. 6.14): I – зниження частоти обертання в насосному режимі до моменту зміни напрямку руху води; II – режим протитечії, у якому при номінальному напрямку обертання насоса потік рухається з напірного на всмоктувальний бік насоса, що закінчується зупинкою насоса і реверсом напрямку його обертання; III – турбінний режим, у якому насос із прискоренням розкручується у зворотному напрямку; IV – розгінний режим, у якому обертальний момент дорівнює моменту тертя агрегата.

При закритті дискового затвора чи спорожнюванні напірного водоводу залежно від швидкості процесу насос може працювати в розгінному режимі зі змінним напором (витратою) чи у зворотному насосному режимі. Зниження частоти обертання в розгінному режимі спостерігається при повільному закритті затвора, а у зворотному насосному режимі – при швидкому закритті затвора, коли насос за інерцією накачує воду з напірного водоводу до всмоктувального.

Характер протікання і тривалість кожного етапу зумовлені геометрією напірних водоводів, характеристикою системи, числом працюючих насосів, що одночасно відключаються, видом повної чотириквadrантної характеристики насосів, інерцією обертючих мас, інерцією води в трубопроводі.

Основними параметрами, що характеризують протікання процесу втрати привода, є тиск у напірному трубопроводі при гідравлічному ударі та витрата зворотного струму води, розгінна частота обертання і час її досягнення, пульсації тиску і розвиток кавітаційних явищ у проточному тракті, вібрація

гідромеханічного устаткування і будівельних конструкцій насосної станції, що визначають надійність і довговічність роботи устаткування.

При сталому режимі роботи насоса (ділянка I на рис. 6.14) його параметри дорівнюють:  $Q_H, n_H, H_H, M_{дв} = M_H$ , при цьому момент опору насоса дорівнює моменту рушання  $M_{дв}$  з боку привода. У момент часу  $t_1$

відключається привод. При цьому практично миттєво падає до нуля момент рушання, але гідравлічний момент на робочому колесі зберігається, що приводить до зниження частоти обертання  $n_H$  ротора, подачі  $Q_H$  і напору  $H_H$  (ділянка II на рис. 6.14).

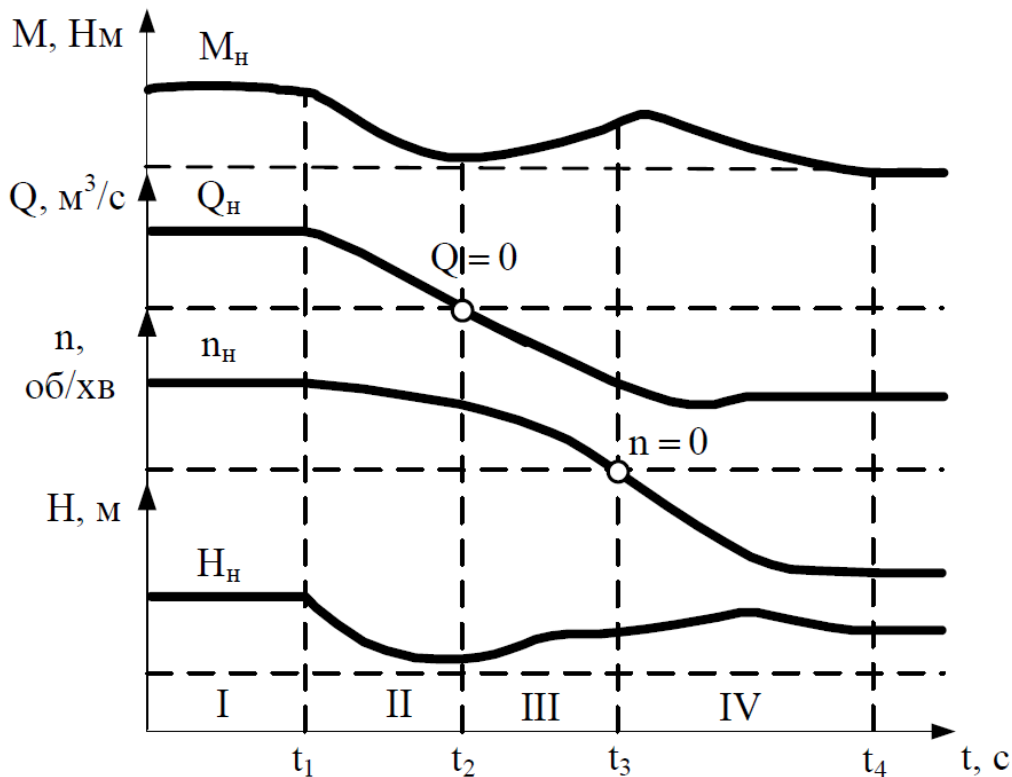


Рисунок 6.14 – Графіки зміни параметрів робочого режиму лопатевого насоса при аварійному вимкненні енергоживлення

У момент  $t_2$ , що відповідає нульовій витраті, відбувається зміна напрямку руху рідини на турбінний. Момент на робочому колесі при цьому мінімальний, а розрідження в напірному трубопроводі максимальне. У режимі протитечії (ділянка III на рис. 6.14) робоче колесо гальмується потоком зворотного (турбінного) напрямку, тиск у напірному трубопроводі зростає. У момент  $t_3$  частота обертання ротора знижується до нуля, і після миттєвої зупинки ротор починає розганятися у зворотному (турбінному) напрямку і настає турбінний режим (ділянка IV на рис. 6.14). На початку цього режиму гідравлічний момент стає максимальним, а потім зменшується. Якщо насосний агрегат подає рідину до резервуара великої місткості або у верхній б'єф каналу меліоративної системи, то в момент  $t_4$  насос входить у сталий турбінний режим. У випадку спорожнювання напірного трубопроводу, наприклад унаслідок невеликої місткості резервуара, настають такі режими роботи насоса, які наведено у табл. 6.2.

Таблиця 6.2 - Режими роботи насоса при спорожнюванні напірного трубопроводу

Номер режиму	Назва режиму	Знак параметра				
		$Q$	$n$	$N$	$M^*$	$H$
1	Насосний прямого обертання	+	+	+	+	+
2	Режим протитечії	-	+	+	+	+
3	Турбінний прямого обертання	-	-	-	+	+
4	Режим гідравлічного гальмування	-	-	+	+	+
5	Насосний зворотного обертання	+	-	+	-	+
6	Гальмівний	+	-	+	-	-
7	Турбінний зворотного обертання	+	+	-	-	-
8	Гальмівний	+	+	+	+	-

де  $M^*$  – момент на валу ротора насоса

Увімкнення і зупинка сусідніх агрегатів

Пуск і зупинка додаткових насосів впливають на працюючі агрегати. При пуску або зупинці сусіднього агрегата на закриту засувку або дисковий затвор відбувається повільна зміна подачі насоса у водогони.

Вібрації устаткування і пульсації тиску в проточному тракті не викликають особливого інтересу, тому що всі вони практично дорівнюють відповідним величинам у стаціонарних режимах, однак, як і при пуску, варто чітко уявляти, у якій точці характеристики виявиться насосний агрегат після пуску чи зупинки сусідніх агрегатів.

Пуск агрегата на закриту засувку або втрата привода сусіднім агрегатом супроводжуються швидкою зміною подачі і, як правило, гідравлічним ударом, що негативно позначається на режимі працюючих агрегатів.

Пуск агрегату іноді супроводжується спадом напруги в мережі й при значному завантаженні лінії може викликати відключення працюючих агрегатів. Регулювання подачі відцентрових насосів може здійснюватися дроселюванням напірного водоводу в споживача; так, наприклад, регулюється подача води на очисні споруди. З погляду роботи напірних водоводів і кавітації в регулюючій арматурі дроселювання бажано проводити безпосередньо в насосі, у результаті чого знижується тиск у водоводі та підвищується за засувкою.

Можливі випадки послідовної роботи насосів, установлених на одній НС, і насосів, що знаходяться на різних НС. У першому варіанті насоси встановлюють послідовно для того, щоб створити на виході значний напір; у другому – характеристики насосів і їх моменти інерції різні й при аварійному відключенні їх частоти обертання і напори будуть змінюватися по-різному в часі. Однаково буде змінюватися тільки їх подача. У протилежному випадку різниця у витратах призвела б до утворення розриву суцільності потоку між насосами. При несправності одного з насосів

передбачають автоматичне відключення обох насосів, що працюють послідовно. Таким чином, паралельна робота декількох пар таких насосів, що працюють послідовно, аналогічна роботі декількох однакових насосів, що працюють паралельно.

При послідовній роботі НС найбільш часто між станціями передбачають ємності, з яких станції наступного підйому забирають воду, але іноді вони можуть бути відсутні. Теоретично можливе аварійне відключення кожної з цих НС, а також будь-які комбінації: одночасне відключення двох, трьох та більшої кількості станцій.

Практично при відключенні кожної з НС, у зв'язку зі значним зниженням тиску в її напірному трубопроводі, можливий зрив роботи наступних НС, тому найбільш

доцільне автоматичне одночасне відключення всіх НС. Іноді кожен проміжну НС обладнують обвідною лінією з установленим на ній зворотним клапаном, закритим при нормальній роботі. У випадку зменшення тиску в напірному колекторі нижче, ніж у всмоктувальному, зворотний клапан відкриється і вода буде подаватися по цій обвідній лінії.

#### Кавітація

Кавітація — це одне з найбільш небажаних явищ у гідродинаміці, яке виникає в насосах, трубопроводах і гідротурбінах. Вона полягає у порушенні суцільності потоку через появу парогазових порожнин (каверн) у місцях, де тиск у рідині знижується нижче тиску насиченої пари. Руйнування цих порожнин супроводжується ударними навантаженнями, що спричиняють вібрацію, шум і ерозійне пошкодження матеріалу лопатей та корпусів насосів.

Поява каверн у робочому колесі або всмоктувальному патрубку призводить до різкого зниження напору  $H$  і коефіцієнта корисної дії  $\eta$  (рис. 6.16).

У сифонових системах це явище супроводжується нагромадженням повітря у верхніх точках магістралі, що створює повітряні пробки й зменшує ефективний перетин трубопроводу.

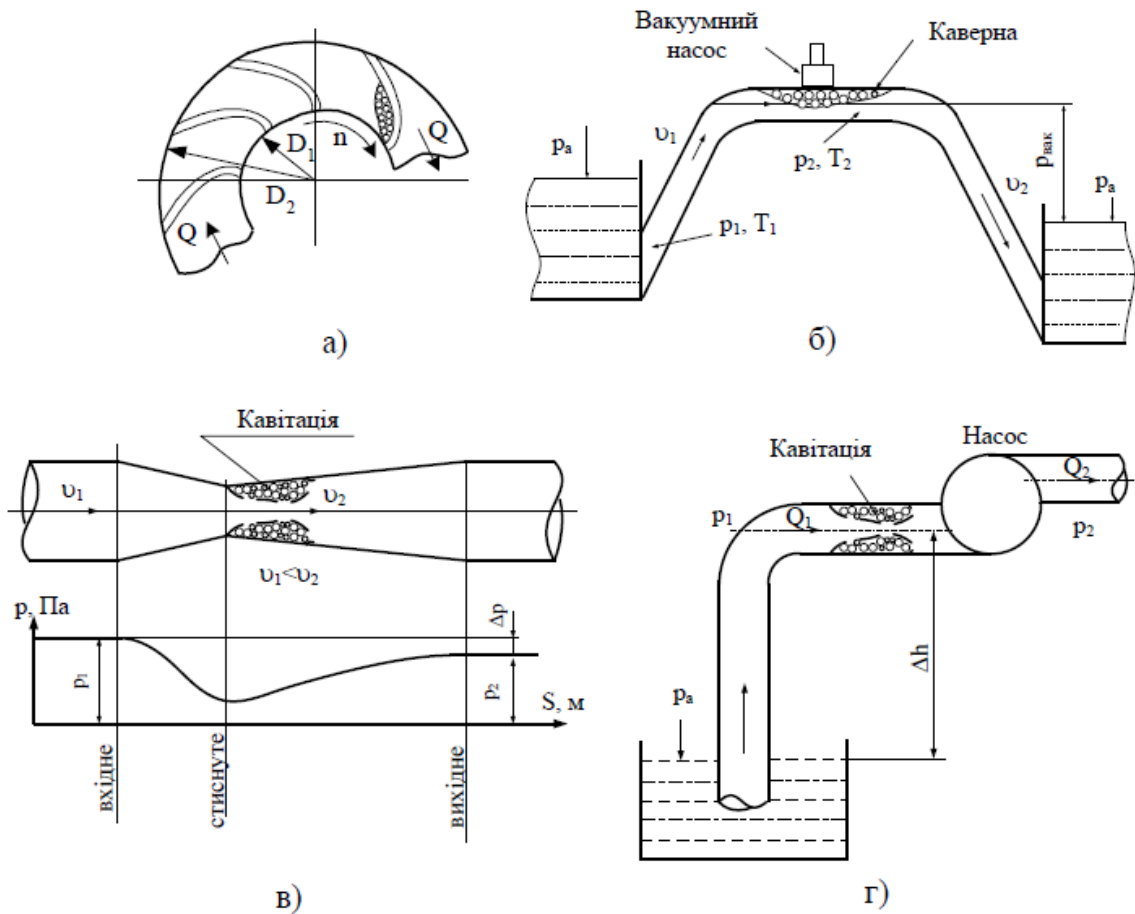
На місцевих опорах зміна температури або швидкості потоку викликає зростання коефіцієнта опору  $\xi$ , що також зменшує ефективність роботи системи (рис. 6.17).

Кавітаційні процеси викликають автоколивання тиску та витрати, амплітуда яких може у 2–3 рази перевищувати середній тиск у трубопроводі, а частота коливань перебуває у межах 1–60 Гц (рис. 6.18).

Існують два основні типи кавітації (рис. 6.19):

1. Гідродинамічна — виникає через локальне звуження потоку або різкі зміни напрямку руху, що зменшує тиск пропорційно квадрату швидкості.

2. Акустична — спостерігається при проходженні звукових хвиль через рідину, які створюють періодичні області розрідження.



а) у робочому колесі насоса; б) у сифоновому трубопроводі; у) на місцевому опорі; г) у всмоктувальному патрубку насоса  
 Рисунок 6.15 – Місця локалізації кавітації в НК

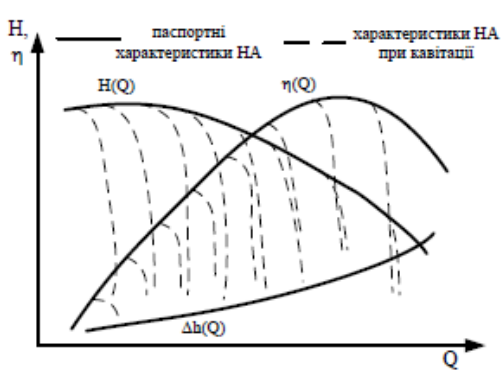


Рисунок 6.16 – Вплив кавітації на характеристики насоса

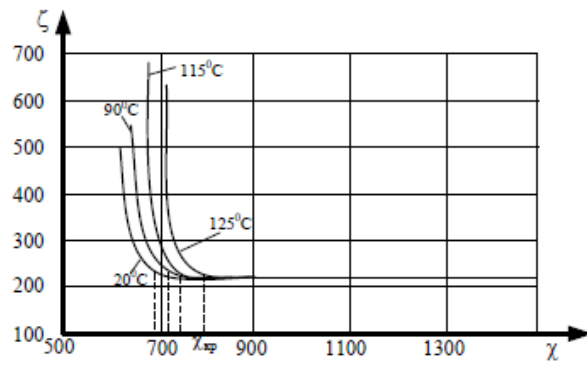
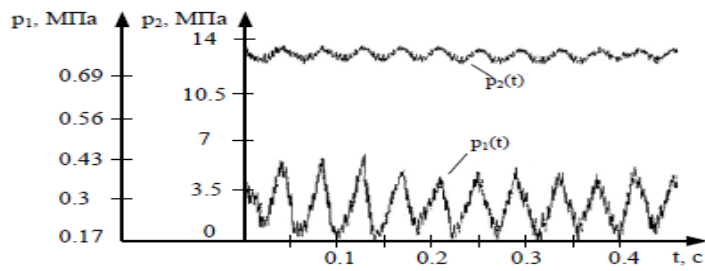
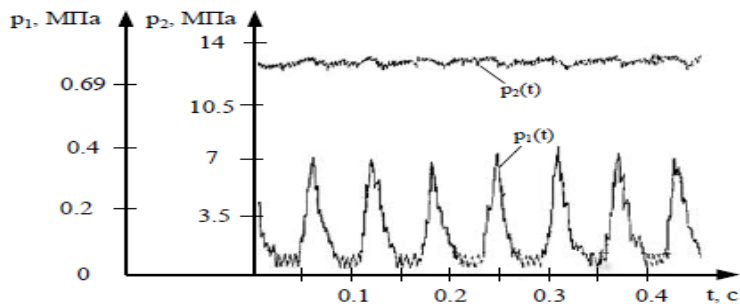


Рисунок 6.17 – Залежність коефіцієнта опору регулювального клапана від числа кавітації



а)



б)

а)  $p_2 = 13$  МПа,  $p_1 = 0,3 \pm 0,122$  МПа,  $f=20$  Гц;

б)  $p_2 = 13$  МПа,  $p_1 = 0,2 \pm 0,18$  МПа,  $f=13,3$  Гц

Рисунок 6.18 – Криві зміни тиску на вході та виході з насоса при частоті обертання валу  $350 \text{ с}^{-1}$

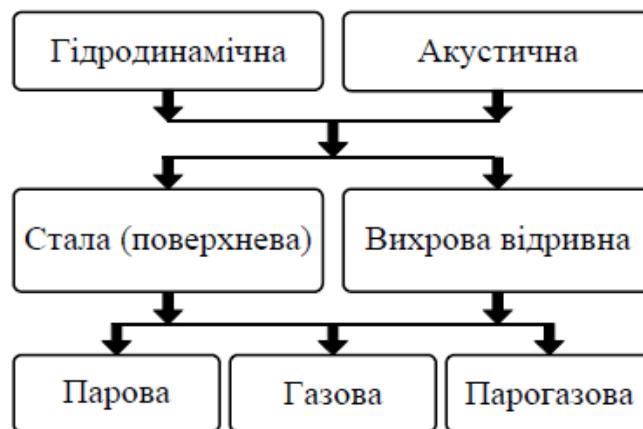


Рисунок 6.19 – Види кавітації

До основних параметрів кавітаційних явищ належать:

– число кавітації

$$\chi = \frac{2(p - p_{\text{пари}})}{\rho v^2}$$

– кавітаційний коефіцієнт опору

$$C_k = k\chi$$

- кавітаційний запас

$$\Delta h = \frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} - \frac{p_{\text{пари}}}{\rho g};$$

- об'єм розриву суцільності потоку в  $i$ -й точці трубопроводу в момент  $j$

$$V_{i,j} = V_{i,j-1} + \Delta Q_{i,j} \Delta t$$

де  $v$  – вхідна швидкість рідини;  $k$  – коефіцієнт кавітації;  $\Delta Q_{i,j}$  – середнє значення витрат прилеглих ділянок;  $\Delta t$  – час існування кавітації.

Попри численні дослідження, єдиного критерію для визначення меж виникнення кавітації в насосних системах не існує.

Оцінка впливу кавітації на втрати потужності та енергетичні характеристики насоса залишається важливим напрямом сучасних досліджень.

### **Помпаж**

Помпаж — це небезпечний нестійкий режим роботи насоса, який супроводжується різкими коливаннями подачі та напору, що можуть призвести до гідравлічних ударів, вібрації й механічних пошкоджень.

У цьому стані насос по чергово переходить від подачі рідини до її зворотного руху, утворюючи пульсуючий потік.

Помпаж зазвичай виникає у насосів, які мають характеристику напору з лівою западаючою ділянкою, тобто коли на кривій  $H(Q)$  існує максимум при  $Q > 0$ . Таку форму мають, наприклад, тихохідні насоси.

Нестійка робота можлива під час пуску, зниження рівня води у нижньому резервуарі або при раптовому відкритті клапанів.

Динамічні навантаження, що виникають у помпажному режимі, настільки значні, що експлуатація насоса в цій зоні неприпустима.

Розглянемо систему, до складу якої входить насос і бак великої висоти (рис. 6.20). Якщо для певного режиму виконується умова

$$H_{\text{мережі}} < H_0$$

де  $H_0$  — напір холостого ходу, то насос працює стійко (точка 1 на характеристиці  $H(Q)$ ). Якщо ж витрата споживача  $Q_{\text{спож}}$  менша за подачу насоса  $Q_n$ , рівень у баку підвищується, а подача зменшується до  $Q_2$ .

Подальше накопичення води викликає зростання тиску до лінії 2–2, і при цьому насос втрачає здатність підтримувати потік.

Як тільки напір у системі перевищує  $H_0$ , насос втрачає стовп рідини, і потік починає рух у зворотному напрямку (якщо відсутній зворотний клапан).

Після зниження рівня води робота відновлюється з подачею, що відповідає точці 3 на характеристиці.

Якщо умови не змінюються, процес повторюється періодично — насос переходить у циклічний режим коливань подачі та напору.

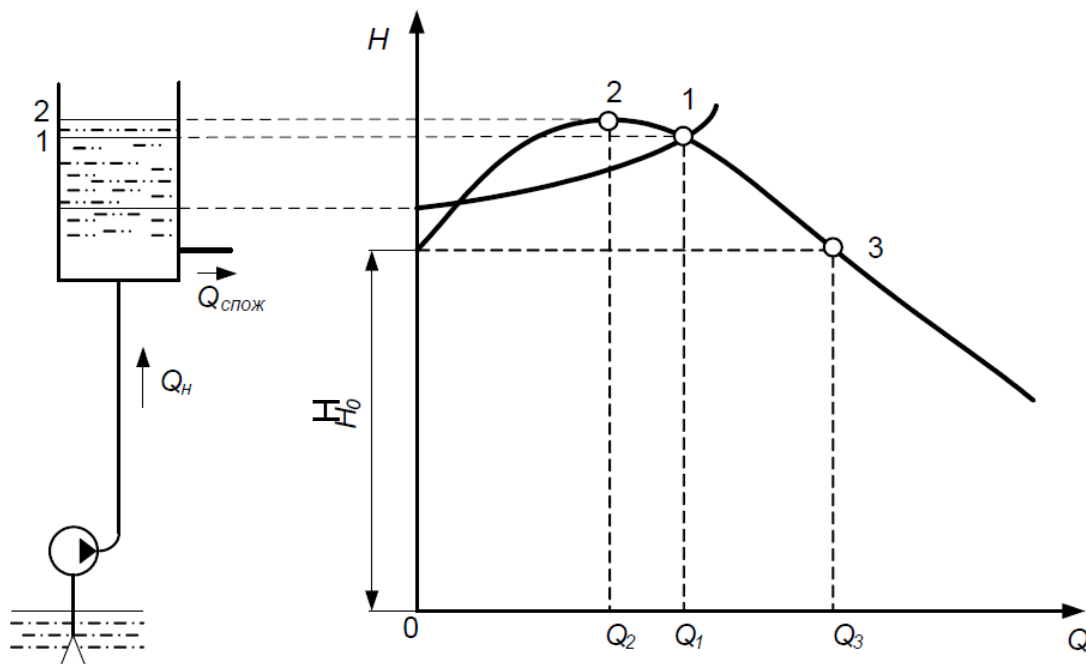


Рисунок 6.20 – Схема роботи (а) та характеристика (б) насоса при нестійкій роботі

#### Запобігання помпажу

Щоб уникнути переходу системи у зону нестійкої роботи, необхідно забезпечити умову:

$$H_{\text{мережі}} < H_0$$

для всіх робочих режимів.

У практиці це досягається:

- правильним вибором типу насоса (із пологою характеристикою  $H(Q)$ );
- установленням зворотних клапанів;
- плавним регулюванням швидкості обертання електродвигуна;
- використанням гідроаккумуляторів або баків стабілізації тиску.

#### Гідравлічний удар

Гідравлічний удар — це явище різкого підвищення тиску в трубопроводі, що виникає при раптовому гальмуванні або зупинці потоку рідини. Його поява пов'язана з перетворенням кінетичної енергії рухомої рідини в потенційну енергію тиску. Якщо тиск у момент удару перевищує допустимі межі, це може призвести до пошкодження труб, розриву з'єднань, руйнування арматури чи насоса.

#### Механізм виникнення гідравлічного удару

Розглянемо горизонтальний трубопровід постійного діаметра, у якому рідина рухається зі середньою швидкістю  $v$ . Якщо засувку або клапан, розташований на трубопроводі, різко закрити, то шар рідини, який безпосередньо прилягає до арматури, майже миттєво зупиняється.

Внаслідок стисливості рідини й пружності стінок трубопроводу процес гальмування поширюється вздовж потоку у вигляді хвилі підвищеного тиску.

Швидкість поширення цієї хвилі визначається швидкістю звуку в рідині  $c$ , яка залежить від модуля об'ємної пружності рідини  $K$  і густини  $\rho$ :

$$c = \sqrt{\frac{K}{\rho}}$$

Причини виникнення

Гідравлічний удар може з'являтися у таких випадках:

- швидке закриття або відкриття запірної арматури (засувки, клапанів, кранів);
- раптова зупинка насосів або втрата живлення електродвигуна;
- аварійне розривання потоку при наявності повітряних пробок або кавітації;
- неправильне керування режимами у системах із довгими трубопроводами.

Особливо небезпечні удари у довгих магістралях, де маса рідини значна і навіть незначна зміна швидкості потоку викликає високий тиск.

Наслідки гідравлічного удару

Якщо не застосовувати спеціальні заходи захисту, гідравлічний удар може призвести до:

- розриву стінок трубопроводів;
- деформації фланцевих і різьбових з'єднань;
- пошкодження робочих коліс насосів;
- виникнення вібрацій і шумів, що скорочують строк служби обладнання.

Запобігання гідравлічним ударами

Щоб мінімізувати ризик гідравлічного удару, у системах водопостачання та промислових насосних комплексах застосовують:

- гідроакумулятори та повітряні баки, які компенсують надлишковий тиск;
- плавне керування швидкістю закриття засувки (збільшення часу закриття);
- частотне регулювання пуску та зупинки електропривода;
- обвідні лінії з клапанами, що запобігають зворотному потоку;
- автоматичне блокування насосів у разі аварійного зниження тиску.

Гідравлічний удар є однією з ключових проблем експлуатації насосних систем. Його аналіз і моделювання входять до обов'язкових розрахунків при проєктуванні трубопровідних мереж високого тиску.

## Турбулентність потоку рідини

При аналізі напірного переміщення рідини розрізняють два режими її руху:

### 1. Ламінарний режим

Ламінарна течія характеризується впорядкованим, шаровим рухом частинок, коли сусідні шари ковзають один відносно одного без змішування. Профіль швидкостей при цьому має параболічну форму, і втрати енергії зумовлені переважно силами в'язкості.

### 2. Турбулентний режим

При турбулентній течії рух рідини стає хаотичним, з утворенням вихрових структур різних розмірів. Внаслідок цього відбувається інтенсивне перемішування шарів, пульсації швидкості й тиску, що призводить до збільшення гідравлічних втрат. Турбулентний потік має більш плоский профіль швидкостей і є типовим для більшості промислових трубопроводів.

Для оцінки режиму руху рідини в гідродинаміці використовують безрозмірний критерій (число) Рейнольдса.

Якщо  $Re < 2300$ , течія вважається ламінарною;

якщо  $Re > 4000$  — турбулентною;

у проміжку  $2300 \leq Re \leq 4000$  має місце перехідний режим.

Різний характер руху рідини приводить до різних залежностей зміни гідравлічного опору  $i$ , як наслідок, втрат тиску (енергії).

Види течії істотно впливають на залежність між втратами тиску та швидкістю потоку:

- для ламінарного режиму:

$$h_{\text{вТ}} \sim v$$

- для турбулентного:

$$h_{\text{вТ}} \sim v^{1.75-2.0}$$

При турбулентному режимі відбуваються пульсації швидкості і тиску в потоці рідини. У зв'язку з істотною відмінністю величини втрат тиску встановлення й аналіз характеру руху рідини є важливим завданням при проведенні гідравлічних розрахунків.

Турбулізація потоку рідини в трубі зумовлена багатьма чинниками. Розвиток турбулентності залежить від:

- геометрії трубопроводу (вигини, звуження, шорсткість стінок);
- швидкості течії рідини;
- фізичних властивостей середовища (в'язкість, густина);
- наявності сторонніх збурень — вібрацій, гідравлічних ударів тощо.

Порівняльний аналіз показує, що зміна властивостей рідини має менший вплив, ніж конструктивні параметри трубопроводу.

У промислових системах температура та тиск зазвичай змінюються в обмежених межах (наприклад, від 0,2 до 26 °С для систем водопостачання), тому головну роль відіграють швидкість потоку та шорсткість стінок.

Турбулентність є основною властивістю рухомої рідини. З точки зору фізики, турбулентність – це тривимірний нестационарний рух, у якому внаслідок розширення вихорів створюється безперервний розподіл пульсацій швидкості в інтервалі довжин хвиль від мінімальних, що визначаються в'язкими силами, до максимальних, які визначаються граничними умовами течії.

Основним механізмом генерації енергії турбулентності є утворення вихорів, що є тривимірним процесом, тому всі розвинені турбулентні течії є тривимірними. За допомогою нелінійних взаємодій великі вихоріві утворення передають частину своєї енергії меншим, унаслідок чого реалізується каскадний механізм передачі енергії.

Турбулентність виникає мимоволі, коли сусідні ділянки середовища знаходяться поруч або проникають одна в одну, за наявності перепаду тиску або за наявності сили тяжіння, або коли ділянки середовища обтікають непроникні поверхні. Турбулентність також може виникати за наявності випадкової примусової сили. Зазвичай зовнішня випадкова сила і сила тяжіння діють одночасно.

Миттєві значення швидкості, тиску й температури при цьому коливаються навколо середніх величин, що створює пульсуючий характер потоку.

Турбулентність є невід'ємною властивістю більшості рідинних потоків у технічних системах, і її врахування є обов'язковим під час розрахунків насосних і трубопровідних комплексів.

#### Витік у трубопровідній мережі

Порушення герметичності трубопроводу — одна з найпоширеніших причин аварійних ситуацій у насосних комплексах. Витік рідини може виникати через дефекти зварних швів, корозійне пошкодження, руйнування ущільнень, втому матеріалу, або гідравлічний удар. Навіть незначні витіки призводять до втрат робочої рідини, зниження тиску, порушення стабільності подачі та додаткових енергетичних витрат.

Аналіз показав, що в середньому по Україні витіки і невраховані втрати води за рік складають 15–30 % від загального водоспоживання.

Виникнення витіку призводить до:

- зменшення тиску у трубопроводі;
- зміни напрямку руху рідини поблизу пошкодження;
- зниження ККД насосного агрегату;
- можливого виникнення кавітації у зоні дефекту;
- гідроударів через періодичне заповнення й спорожнення порожнин.

Відстань від контрольної точки трубопровідної мережі до місця витoku визначається залежністю:

$$x = \frac{tc}{2}$$

де  $t$  – час проходження хвилі тиску від контрольної точки виміру до витoku і назад;  $c$  – швидкість звуку в рідині.

Для своєчасного виявлення витоків застосовують:

- акустичні методи (за різницею часу приходу хвиль тиску);
- вимірювання балансу витрати на вході й виході системи;
- високочастотні сенсори тиску та вібрацій;
- термографічний контроль (тепловізори);
- автоматизовані системи SCADA для безперервного моніторингу.

Зменшення подачі на 5 – 10% внаслідок навіть незначних витоків може призвести до зростання питомих енергозатрат на 15–20%, що підкреслює необхідність постійного моніторингу стану мережі.

Для забезпечення герметичності та довговічності трубопровідних систем необхідно:

- використовувати корозійностійкі матеріали та захисні покриття;
- передбачати компенсатори температурних деформацій;
- регулярно виконувати випробування на щільність;
- впроваджувати автоматизовані системи діагностики витоків

(АСДВ).

Дані положення є принципово важливими при побудові системи ідентифікації аварійних режимів у насосному комплексі для запобігання розвитку нештатних ситуацій і підвищення надійності роботи електрогидравлічного устаткування.

Висновки.

1. Насосні установки є одним із найпоширеніших типів енергетичного обладнання в промисловості, від ефективності роботи яких залежить економічність та надійність технологічних процесів у гірничо-металургійному комплексі.

2. Основними параметрами, що визначають роботу насосів, є подача ( $Q$ ), напір ( $H$ ), потужність ( $N$ ) та коефіцієнт корисної дії ( $\eta$ ). Їх співвідношення визначається експериментальними характеристиками, що дозволяють оцінити робочу зону найвищої енергоефективності.

3. Вибір електропривода для насосної установки повинен ґрунтуватися на пускових і динамічних характеристиках агрегату, а також на умовах експлуатації. Найбільш доцільними є асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором, а для потужних систем — синхронні машини із сучасними тиристорними збуджувачами.

4. Стійка робота насосної станції забезпечується узгодженням характеристики насоса з характеристикою мережі. Неправильне поєднання цих параметрів може призвести до помпажу, кавітації або гідравлічних ударів, що значно скорочують ресурс обладнання.

5. Найефективнішим способом регулювання продуктивності є зміна частоти обертання електродвигуна за допомогою перетворювачів частоти, що дозволяє плавно змінювати подачу без значних енергетичних втрат. Дросельні методи або зміна кількості насосів мають вищі втрати потужності та знижують загальний ККД системи.

6. Сучасні тенденції розвитку насосних систем пов'язані з використанням активних регуляторів параметрів, енергорекупераційних пристроїв, цифрових систем керування (SCADA) та інтелектуальної діагностики, що забезпечують адаптивне управління режимами й моніторинг технічного стану обладнання.

7. Для підвищення надійності насосних комплексів необхідно враховувати нестационарні режими роботи — пуск, зупинку, аварійне вимкнення, зміну тиску та витрати. Їх моделювання дозволяє передбачити критичні стани й запобігти виникненню аварій.

8. Дотримання умов гідродинамічної стійкості, своєчасне виявлення витоків, а також боротьба з турбулентністю та кавітацією є необхідною передумовою забезпечення довговічності й енергоефективності насосних установок.

Контрольні питання до теми 6.

1. Яке основне призначення насосних установок у промислових системах?
2. За якими ознаками класифікують насоси?
3. У чому полягає принцип дії відцентрового насоса?
4. Що визначає область раціональної роботи насоса?
5. Як формується сумарна характеристика при паралельному та послідовному з'єднанні насосів?
6. Які основні вимоги висуваються до електродвигуна насосного агрегату?
7. Коли доцільно використовувати синхронні електродвигуни для приводу насосів?
8. Як визначається характеристика трубопровідної мережі?
9. Які основні складові втрат напору в трубопроводі?
10. У чому суть дросельного регулювання подачі насоса?
11. Чому регулювання частоти обертання є енергетично найефективнішим методом?
12. Що таке перехідні процеси в насосних системах і коли вони виникають?
13. Які наслідки має аварійне вимкнення енергоживлення насоса?
14. За яких умов виникає кавітація і чим вона небезпечна?
15. Що називають помпажем насоса?

16. Яка фізична природа гідравлічного удару?
17. Як визначається число Рейнольдса і що воно характеризує?
18. Як виявляють місце витoku в трубопроводі?
19. Які методи підвищення енергоефективності насосних станцій застосовують сьогодні?
20. Які сучасні системи автоматизованого моніторингу використовують для діагностики насосних комплексів?

Використана література.

1. Коренькова Т. В., Сердюк О. О., Ковальчук В. Г., Сергієнко С.А. Енергозберігаючі режими роботи насосних і вентиляторних установок з автоматизованим електроприводом : навчальний посібник, 2-ге видання, перероблене і доповнене. Кременчук : Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, 2023. 194 с.

2. Коренькова Т. В., Сердюк О. О., Ковальчук В. Г. Режими роботи насосних та вентиляторних установок із автоматизованим електроприводом : навч. посібник. Кременчук : ПП Щербатих О. В., 2013. 200 с.

3. Шевчук С. П., Попович О. М., Світлицький В. М. Насосні, вентиляторні та пневматичні установки. Київ : НТУУ «КПІ», 2010. 308 с.

4. ДСТУ 4132–2002. Насоси відцентрові загальнопромислового застосування. Вимоги до проектування, виготовлення, постачання, монтажування та експлуатування. Звід правил. Київ : Держспоживстандарт України, 2002. 30 с.

5. Насосні та повітродувні станції : навч. посібник / Т. О. Шевченко, Ю. В. Ярошенко, М. М. Яковенко, В. М. Беляєва; Харк. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. Харків: ХНУМГ, 2014. 195 с.

6. Грабко В. В., Мошноріз М. М. Метод та засоби оптимізації роботи електроприводів насосної станції водопостачання : монографія. Вінниця : ВНТУ, 2011. 138 с.

## *ТЕМА 7. ІНЖИНІРИНГ ВЕНТИЛЯТОРНИХ СИСТЕМ.*

Типи промислових вентиляторів та їх призначення. Електромеханічне забезпечення вентиляційних установок. Системи регулювання продуктивності вентиляторів. Вплив режимів роботи на вибір електродвигуна. Захист і діагностика несправностей. Застосування в гірничих підприємствах.

Загальні відомості про вентиляторні системи та їх роль у промислових процесах.

Вентиляційні системи є невід'ємною складовою технологічної інфраструктури промислових підприємств, забезпечуючи необхідні параметри мікроклімату, газообміну та безпеки виробничого середовища. У гірничих і металургійних комплексах вони відіграють критично важливу роль, оскільки підтримують нормальні умови для роботи обладнання й персоналу, відводять пил, газу, теплоту та продукти згорання, а також створюють необхідний тиск для переміщення повітряних мас по виробках, шахтах і цехах.

Ефективність вентиляційних систем визначається комплексом взаємопов'язаних факторів: конструкцією вентилятора, характеристиками електроприводу, системою керування, а також умовами експлуатації. Їхній інжиніринг передбачає не лише вибір типу вентилятора, а й розрахунок повітропроводів, визначення енергоспоживання, побудову систем регулювання продуктивності, аналіз енергоефективності та надійності роботи в умовах конкретного виробництва.

Функції та завдання вентиляційних систем

Основними функціями промислової вентиляції є:

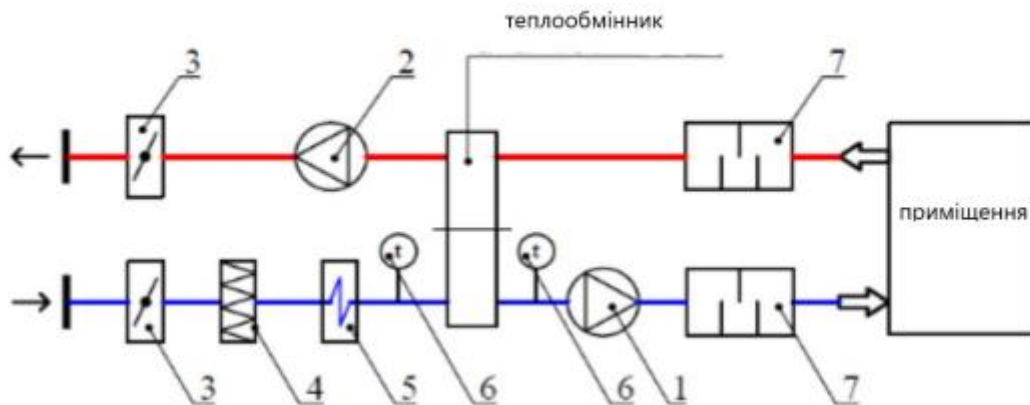
- забезпечення необхідного повітрообміну для підтримання нормативного складу повітря;
- видалення пилу, шкідливих газів, аерозолів та тепловиділень;
- регулювання температурного режиму й вологості;
- запобігання утворенню вибухонебезпечних або токсичних сумішей;
- створення комфортних умов праці та безпечного середовища.

Для гірничих підприємств вентиляція має також захисну функцію, оскільки від її безперервної роботи залежить життя людей і безпека всього виробництва. Головні вентиляційні установки шахт повинні забезпечувати задану кількість свіжого повітря на всіх горизонтах, своєчасно відводити метан, вуглекислий газ і продукти вибухів, підтримуючи концентрації шкідливих речовин у межах допустимих норм.

Основні елементи вентиляторної системи

Типова система вентиляції (рис.7.1) промислового підприємства може складатися з таких елементів:

1. Вентилятор – основний агрегат, який створює різницю тисків і переміщує повітря.
2. Повітропроводи – канали для транспортування повітряних потоків до робочих зон.
3. Заслінки, клапани, дифузори – регульовальні елементи, що дозволяють змінювати витрату повітря.
4. Фільтри та пиловловлювачі – для очищення повітря.
5. Двигун і система керування – електромеханічна частина, яка визначає динаміку, швидкість обертання та енергетичні характеристики системи.
6. Системи захисту та діагностики – контролюють температуру, вібрації, навантаження й інші параметри.



1 -припливний вентилятор; 2 -витяжний вентилятор; 3 - повітряний клапан; 4 - фільтр жорсткої очистки; 5 - калорифер; 6 - датчик температури; 7 -шумоглушник.

Рисунок 7.1 – Приклад схеми вентиляційної установки промислового підприємства з можливістю рекуперації тепла.

#### Фізичні основи переміщення повітря вентилятором

Принцип дії вентилятора ґрунтується на перетворенні механічної енергії обертання робочого колеса в енергію потоку повітря. При обертанні лопатей створюється відцентрова сила, що змушує повітря переміщуватися від центра колеса до периферії. У результаті на вході вентилятора утворюється зона розрідження, а на виході – зона підвищеного тиску.

Загальна потужність, споживана вентилятором, визначається рівнянням енергетичного балансу:

$$N = \frac{Q \cdot \Delta p}{\eta}$$

де  $N$  – споживана потужність вентилятора, Вт;

$Q$  – витрата повітря, м<sup>3</sup>/с;

$\Delta p$  – повний тиск, створюваний вентилятором, Па;

$\eta$  – коефіцієнт корисної дії вентилятора.

### Характеристики вентиляторів

Для опису роботи вентиляторів використовують їхні аеродинамічні характеристики, що показують залежності основних параметрів від витрати повітря:

- залежність повного тиску ( $\Delta p = f(Q)$ );
- залежність споживаної потужності ( $N = f(Q)$ );
- залежність ККД ( $\eta = f(Q)$ ).

Аеродинамічні характеристики вентилятора повинні будуватися за даними аеродинамічних випробувань.

У загальному випадку характеристика вентилятора (рис. 7.2)- це графічна залежність повного тиску  $P_v$ , потужності на валу  $N$  і ККД // від подачі  $Q$  при постійній швидкості обертання робочого колеса (РК), з певним діаметром РК і відомою щільністю середовища, що переміщується і аеродинамічною схемою, т. е.

Типова характеристика вентилятора наведена на рис.7.2.

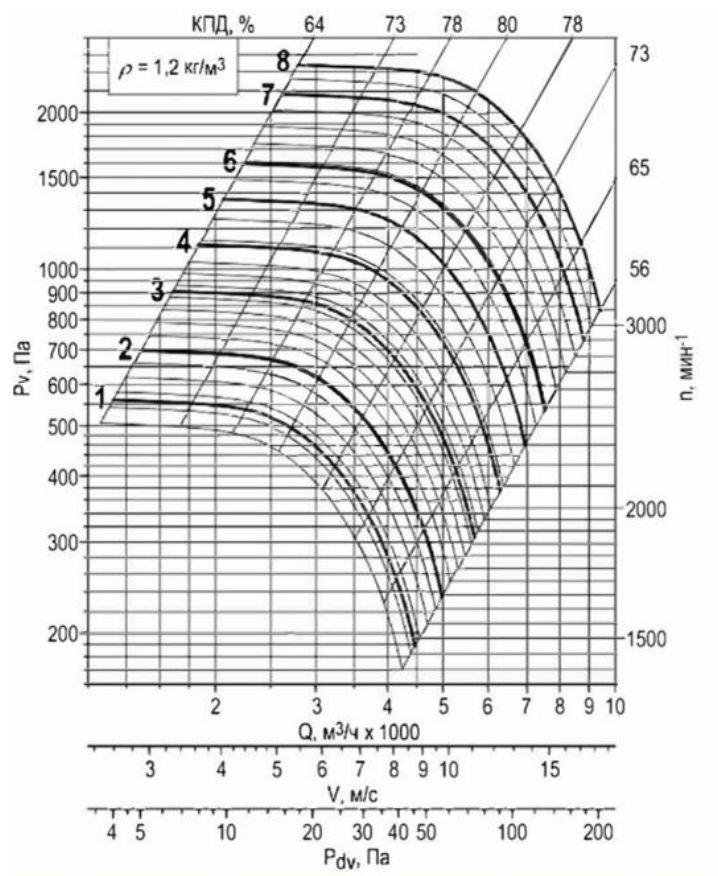


Рисунок 7.2 – Аеродинамічна характеристика вентилятора.

Коефіцієнт подібності для вентиляторів визначається рівняннями:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2}, \quad \frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2, \quad \frac{N_1}{N_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3$$

де(  $Q$  ) – витрата повітря, м<sup>3</sup>/с;  
(  $H$  ) – напір (повний тиск), Па;  
(  $N$  ) – споживана потужність, Вт;  
(  $n$  ) – частота обертання, об/с.

Ці закони подібності показують, що продуктивність вентилятора пропорційна швидкості обертання, напір – квадрату швидкості, а потужність – кубу швидкості. Цей факт має вирішальне значення для вибору системи керування, зокрема при застосуванні частотних перетворювачів.

Показники ефективності вентиляційної системи

До основних показників, що характеризують ефективність вентиляційної системи, належать:

- Продуктивність (  $Q$  ), м<sup>3</sup>/с – кількість повітря, що переміщується вентилятором.
- Повний тиск (  $\Delta p$  ), Па – різниця між тисками на виході та вході вентилятора.
- Коефіцієнт корисної дії (  $\eta$  ), який показує частку корисної потужності, витраченої на створення потоку.
- Питомі енергетичні витрати (  $E$  ), кВт·год/м<sup>3</sup>, що визначають енергоефективність системи.

Визначення енергетичної ефективності базується на співвідношенні:

$$E = \frac{N \cdot t}{Q \cdot t} = \frac{N}{Q}$$

де  $N$  – середня споживана потужність,  $Q$  – продуктивність потоку.

Інженерні підходи до проектування вентиляторних систем

Інжиніринг вентиляторних систем охоплює:

1. Аналіз технологічних потреб – визначення необхідного повітрообміну.
2. Розрахунок аеродинамічних параметрів – визначення втрат тиску у повітропроводах, фільтрах, клапанах.
3. Вибір типу вентилятора – з урахуванням витрати, напору, середовища (пил, газ, вибухонебезпека).
4. Розрахунок електродвигуна – визначення потужності, частоти обертання, способу пуску.
5. Проектування системи регулювання – механічне або електронне керування швидкістю.
6. Інтеграція систем діагностики та автоматизації – контролери, датчики, частотні перетворювачі.

Результатом інжинірингового проекту є комплексна система, що відповідає вимогам енергоефективності, безпеки й надійності, з оптимізованими характеристиками вентиляційного процесу.

Загальні тенденції розвитку вентиляційних систем

Сучасні тенденції проектування вентиляторних систем передбачають:

- перехід до енергоощадних систем із регульованим електроприводом;
- застосування цифрових систем моніторингу та дистанційного керування;
- використання аеродинамічно вдосконалених конструкцій робочих коліс;
- інтеграцію в автоматизовані системи управління технологічними процесами (АСУ ТП);
- впровадження систем діагностики стану для попередження аварій і планування ремонту.

Класифікація промислових вентиляторів і галузі застосування

Вибір типу вентилятора визначається умовами експлуатації, необхідним об'ємом повітря, створюваним тиском, а також фізико-хімічними властивостями повітряного середовища. У промисловості застосовується широкий спектр вентиляторів, що відрізняються конструкцією, принципом дії та характеристиками.

Класифікація вентиляторів дозволяє систематизувати їх за основними ознаками, що є базою для правильного технічного вибору.

Класифікація за напрямом руху повітря

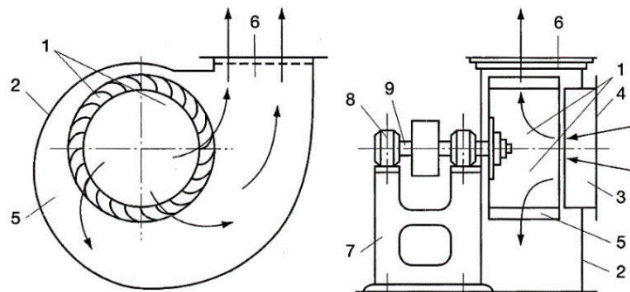
– Радіальні вентилятори (центробіжні) (рис. 7.3)

У таких вентиляторах повітря надходить у центр робочого колеса та викидається під дією відцентрової сили в радіальному напрямку.

Основні характеристики:

- високий створюваний тиск (від 300 до 15000 Па);
- стабільність роботи в умовах забрудненого повітря;
- можливість реверсивної роботи (зміна напрямку потоку).

Недоліком є більші енергетичні витрати порівняно з осьовими вентиляторами.



1 – лопатеве колесо, 2 – корпус, 3 – всмоктувальний патрубок, 4 – вхідний патрубок, 5 – канал між лопатками, 6 – вихідний патрубок.

Рисунок 7.3 – Схема радіального вентилятора

Типова залежність тиску від витрати для радіального вентилятора описується формулою:

$$\Delta p = K \left( \frac{n}{n_0} \right)^2 \left( 1 - \left( \frac{Q}{Q_{\max}} \right)^2 \right)$$

де

$K$  – експериментальний коефіцієнт;

$n$  – поточна швидкість обертання, об/с;

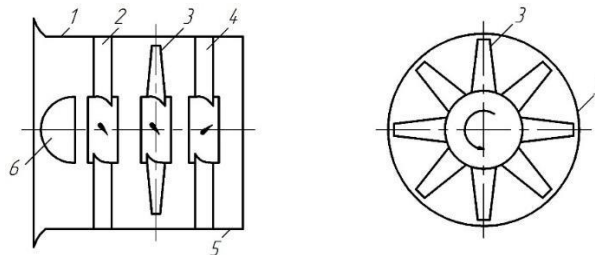
$n_0$  – номінальна швидкість;

$Q_{\max}$  – максимальна витрата повітря.

– Осьові вентилятори

У них повітря рухається паралельно осі обертання робочого колеса. Створюють менший тиск (до 3000 Па), але забезпечують значно більшу витрату повітря при високому ККД.

Використовуються переважно для систем вентиляції шахт, тунелів, виробничих цехів і систем охолодження.



1- колектор; 2- входной направляющий аппарат; 3-рабочее колесо;4- выходной направляющий аппарат; 5-корпус; 6-обтекатель

Рисунок 7.4 – Принципова схема осьового вентилятора

Для осьових вентиляторів залежність тиску від витрати апроксимується рівнянням:

$$\Delta p = \Delta p_{\max} \left( 1 - \frac{Q}{Q_{\max}} \right)$$

де  $\Delta p_{\max}$  — тиск при нульовій витраті (режим «заглушки»).

– 3. Діагональні (змішаного потоку)

Поєднують риси радіальних і осьових вентиляторів Потік повітря рухається під кутом до осі, що дозволяє отримати підвищений тиск при компактній конструкції.

Діаметральні вентилятори (рис.7.5.), або як ще їх називають, діагональні вентилятори, мають робоче колесо барабанного типу і несиметричний коліноподібний корпус. Діагональні вентилятори мають конструкцію з несиметричним розташуванням робочого колеса діаметральні вентилятори, вони ж діагональні вентилятори, що забезпечує утворення потоку повітря в бік меншого перерізу. Діаметральні вентилятори з широкими колесами можуть приєднуватися безпосередньо до повітропроводів, які мають січення у формі витягнутого прямокутника і можуть створювати значні

тиски навіть при невисоких окружних швидкостях робочих коліс, однак мають низький ККД.



Рисунок 7.5 – Зовнішній вигляд діагонального вентилятора

Такі вентилятори широко застосовуються в системах з обмеженим простором (шахтні локальні установки, технологічні kabіни, транспортні тунелі).

Класифікація за створюваним тиском

Залежно від повного тиску, який створює вентилятор, розрізняють:

- Вентилятори низького тиску – до 1000 Па;
- Вентилятори середнього тиску – від 1000 до 3000 Па;
- Вентилятори високого тиску – понад 3000 Па.

Вентилятори високого тиску застосовують у системах аспірації, пневмотранспорту та для головних вентиляційних установок шахт, де потрібен великий тиск для подолання аеродинамічного опору повітропроводів.

Класифікація за призначенням і умовами експлуатації

1. Загальновиробничі вентилятори

Використовуються для обміну повітря у цехах, складах, енергетичних об'єктах. Основні вимоги – продуктивність, енергоефективність, низький рівень шуму.

2. Вибухозахищені вентилятори

Застосовуються в шахтах, газових виробництвах, вибухонебезпечних зонах. Мають спеціальне конструктивне виконання з іскробезпечними елементами.

Вибухозахист забезпечується матеріалами (бронза, алюмінієві сплави) та електродвигунами з маркуванням Exd або Exe.

3. Корозійностійкі вентилятори

Використовуються в агресивних середовищах (кислотні випари, вологе повітря, морські установки). Робочі колеса виготовляють із полімерів, нержавіючої сталі чи покривають захисними шарами.

4. Пилові вентилятори

Призначені для транспортування запиленого повітря, газів із твердими частками. Відзначаються посиленою конструкцією лопатей і корпусу.

5. Димососи

Застосовуються в металургії, енергетиці, котельних установках для відведення продуктів згорання. Створюють високий тиск і працюють при температурах до 400–500 °С.

Класифікація за конструктивним виконанням

За конструкцією робочого колеса вентилятори бувають:

- з лопатями, загнутими назад – забезпечують високий ККД, економічність;
- з лопатями, загнутими вперед – створюють більший тиск, але мають нижчий ККД;
- з радіальними лопатями – стійкі до запиленого середовища.

За розташуванням корпусу та вала:

- одностороннього всмоктування – повітря надходить з одного боку;
- двостороннього всмоктування – потік входить із двох сторін, що підвищує продуктивність.

За кількістю ступенів стиснення:

- одноступеневі вентилятори;
- двоступеневі (послідовне з'єднання робочих коліс) – для створення більшого тиску.

Основні технічні параметри вентиляторів

Для кожного вентилятора в технічній документації зазначаються:

- Витрата повітря  $Q$ , м<sup>3</sup>/с;
- Повний тиск  $\Delta p$ , Па;
- Потужність на валу  $N_{\text{в}}$ , кВт;
- Коефіцієнт корисної дії  $\eta$ ;
- Швидкість обертання  $n$ , об/хв;
- Шумові характеристики (рівень звукового тиску у дБА).

ККД вентилятора визначається співвідношенням:

$$\eta = \frac{Q \cdot \Delta p}{N_{\text{в}}}$$

де  $N_{\text{в}}$  — потужність, підведена до вала вентилятора.

Галузі застосування промислових вентиляторів

1. Металургія:
  - дуттєві системи доменних печей,
  - охолодження сталевих заготовок,
  - аспіраційні установки прокатних і зварювальних цехів.
2. Гірнична промисловість:
  - головні й допоміжні вентиляційні установки шахт,
  - дегазаційні системи,
  - провітрювання горизонтів і забоїв.
3. Енергетика:
  - подача повітря до котлів,

- відведення продуктів згоряння,
- охолодження генераторів і турбін.
- 4. Хімічна та нафтогазова промисловість:
  - транспортування парів, газів і вибухонебезпечних сумішей.
- 5. Будівельна галузь та вентиляція споруд:
  - тунелі, склади, очисні споруди, системи кондиціонування.

#### Особливості вибору типу вентилятора

При виборі типу вентилятора необхідно враховувати:

- характер середовища: вологість, запыленість, вибухонебезпека;
- необхідний тиск і витрату повітря;
- режим роботи: постійний, змінний, пускові навантаження;
- енергоефективність і спосіб регулювання;
- умови монтажу: просторові обмеження, напрямок потоку, можливість обслуговування.

Зазвичай попередній вибір типу вентилятора здійснюється за аеродинамічними характеристиками, а потім виконується уточнення за паспортними параметрами з урахуванням коефіцієнтів запасу:

$$N_{\text{дв}} = \frac{Q \cdot \Delta p}{\eta_{\text{в}} \cdot \eta_{\text{п}}}$$

де

$N_{\text{дв}}$  — необхідна потужність електродвигуна,

$\eta_{\text{в}}$  — ККД вентилятора,

$\eta_{\text{п}}$  — ККД передавального механізму (муфта, ремінна передача тощо).

#### Електромеханічне забезпечення вентиляційних установок

Електромеханічна частина вентиляційної системи є основною рушійною ланкою, яка забезпечує перетворення електричної енергії у механічну та створює необхідні умови для руху повітряних мас. Від правильного вибору типу електродвигуна, способу його пуску, системи керування та захисту залежить не лише енергоефективність установки, а й надійність її експлуатації, стабільність повітряного потоку та безпека виробництва.

#### Основні вимоги до електроприводу вентиляторів

Електропривід вентиляційних систем повинен забезпечувати:

- плавний пуск і зупинку агрегату без перевантажень мережі;
- можливість регулювання швидкості обертання у широкому діапазоні;
- стабільність роботи при коливаннях напруги або навантаження;
- високу енергоефективність у часткових режимах;

- роботу у складних умовах (пил, волога, підвищена температура, вибухонебезпека);
- мінімальні витрати на обслуговування.

Для головних вентиляторних установок гірничих підприємств характерні великі потужності електродвигунів (від 160 кВт до 1000 кВт і більше), що потребує застосування спеціальних схем пуску та регулювання.

Типи електродвигунів, що використовуються у вентиляторних системах

### 1. Асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором

Найпоширеніший тип завдяки простоті, надійності та низькій вартості.

Основні переваги:

- відсутність контактних кілець;
- мінімальне технічне обслуговування;
- можливість роботи з частотним перетворювачем.

Недолік — високий пусковий струм, який у 5–7 разів перевищує номінальний. Тому для потужних вентиляторів застосовують плавні пускачі (Soft Starter) або частотні перетворювачі (VFD).

### 2. Асинхронні двигуни з фазним ротором

Застосовуються у вентиляторах середньої та великої потужності, де необхідно обмежити пусковий струм або плавно регулювати момент.

Резистори, увімкнені у коло ротора, дозволяють змінювати пускові характеристики двигуна:

$$M = M_{\max} \cdot \frac{2sR'_2}{R'^2_2 + (sX'_2)^2}$$

де

$M$  — момент на валу,

$s$  — ковзання,

$R'_2, X'_2$  — приведені до статорного кола опір і реактивний опір ротора.

Збільшення опору ротора дозволяє підвищити пусковий момент і зменшити пусковий струм.

Однак такі двигуни вимагають регулярного технічного обслуговування контактних кілець і щіткового апарату, тому поступово витісняються електроприводами з частотним регулюванням.

### 3. Синхронні двигуни

Використовуються у вентиляторах великої потужності (понад 500 кВт), де важлива висока енергоефективність.

Переваги:

- високий ККД (до 0,97);
- стабільна швидкість обертання, незалежно від навантаження;
- можливість корекції коефіцієнта потужності (робота з випередженням).

Недоліком є складність пуску — двигун повинен розігнатися до синхронної швидкості перед вмиканням збудження. Для цього застосовуються асинхронні обмотки або допоміжні пускові пристрої.

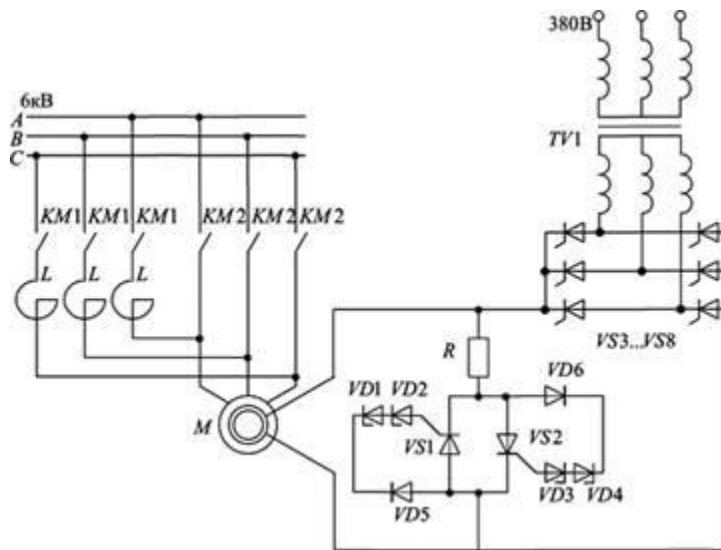


Рисунок 7.6 – Електрична схема підключення синхронного двигуна вентилятора

### Способи пуску електродвигунів вентиляторів

У залежності від потужності та типу електродвигуна застосовуються різні схеми пуску:

1. Безпосередній пуск від мережі (Direct-On-Line, DOL)

Використовується для малопотужних двигунів (до 10–15 кВт).

Простий і дешевий спосіб, але супроводжується великим пусковим струмом.

2. Пуск за схемою «зірка–трикутник» (Y–Δ)

Зменшує пусковий струм у 3 рази, оскільки на кожен обмотку у режимі «зірки» подається напруга ( $U/\sqrt{3}$ ).

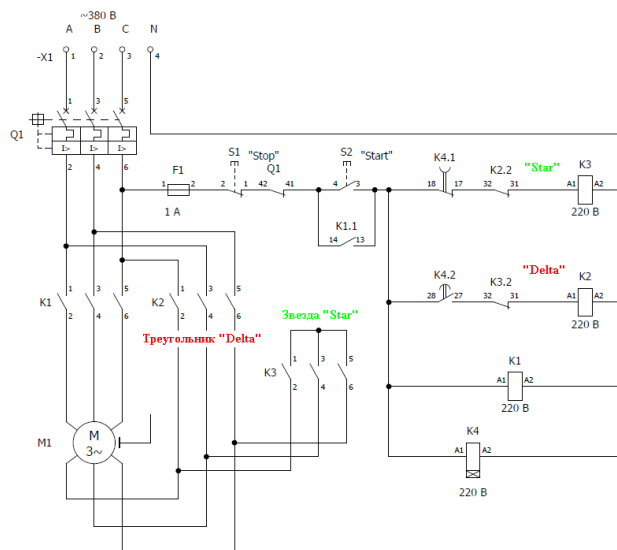


Рисунок 7.7 – Схема пуску за схемою зірка–трикутник

3. Пуск за допомогою автотрансформатора  
Дозволяє обмежити пусковий струм до 40–60 % від номінального. Застосовується для двигунів середньої потужності (до 250 кВт).
4. Пуск з використанням частотного перетворювача  
Забезпечує плавний розгін, обмеження струму і можливість регулювання швидкості. Є найбільш сучасним і енергоефективним способом.

#### Частотно-регульований електропривід вентилятора

Частотне регулювання здійснюється шляхом зміни частоти живлення електродвигуна за допомогою перетворювача частоти (ПЧ).

Основні переваги такого керування:

- плавний пуск і зупинка;
- зниження пускових струмів у 4–6 разів;
- регулювання продуктивності вентилятора без механічних втрат;
- суттєве зменшення споживання електроенергії (до 40 %);
- можливість інтеграції в системи автоматизації (АСУ ТП, SCADA).

Залежність потужності від швидкості обертання визначається законом куба:

$$N \propto n^3$$

Зменшення швидкості обертання на 20 % зменшує споживану потужність майже на 50 %. Це пояснює високу енергоефективність частотного регулювання у вентиляторних системах.

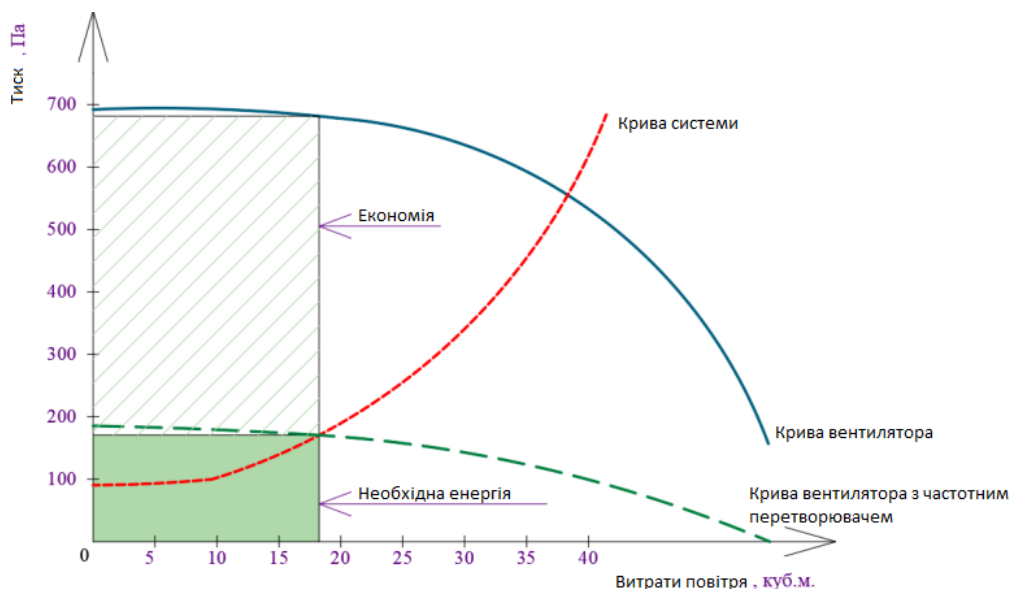


Рисунок 7.8 – Енергозбереження при частотному регулюванні вентилятора

#### Електромеханічні елементи приводу вентилятора

1. Муфти та редуктори.

Передають момент від двигуна до вала вентилятора. Застосовують еластичні або зубчасті муфти, що компенсують невеликі перекося валів.

2. Підшипникові вузли.

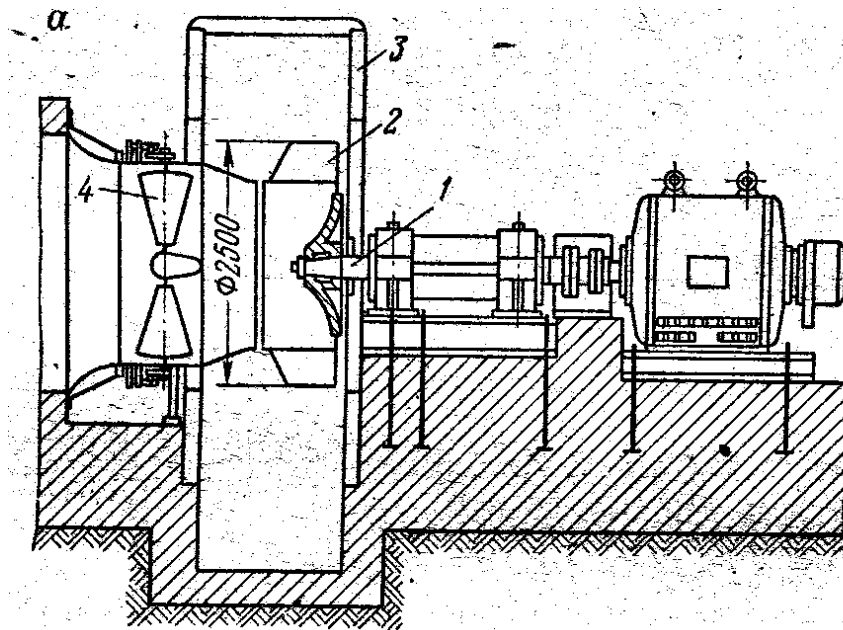
Забезпечують надійне обертання вала. Використовуються підшипники кочення або ковзання з мастильною системою.

3. Системи охолодження.

У потужних двигунах застосовується примусова вентиляція або рідинне охолодження.

4. Фундаментна рама та антивібраційні опори.

Зменшують динамічні навантаження на конструкцію і підвищують довговічність вузлів.



1 - вал, 2 - робоче колесо; 3 - кор апапарат, 4 – направляючий апарат  
Рисунок 7.9 – Конструктивна схема електромеханічного вузла вентилятора

Схеми електричного керування

Сучасні системи управління вентиляторами включають:

- місцеве керування — пускові кнопки, тумблери, сигналізація;
- дистанційне керування — через контролери PLC або панелі HMI;
- автоматичне керування — підтримання заданих параметрів (тиску, температури, витрати) за допомогою датчиків і регуляторів PID.

Приклад закону регулювання тиску за допомогою ПІД-регулятора:

$$U(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

де  $e(t)$  — відхилення фактичного тиску від заданого;

$K_p, K_i, K_d$  — коефіцієнти пропорційної, інтегральної та диференціальної складових.

Вибір електродвигуна за потужністю вентилятора

Необхідна потужність електродвигуна визначається за формулою:

$$N_{\text{дв}} = \frac{Q \cdot \Delta p}{\eta_{\text{в}} \cdot \eta_{\text{п}} \cdot \eta_{\text{дв}}}$$

де

$\eta_{\text{в}}$  – ККД вентилятора;

$\eta_{\text{п}}$  – ККД передачі (муфти або редуктора);

$\eta_{\text{дв}}$  – ККД електродвигуна.

Враховується також коефіцієнт запасу потужності ( $k_3 = 1.1 \div 1.2$ ), який компенсує можливі перевантаження у процесі роботи.

Сумісність електроприводу з умовами експлуатації

При виборі електродвигуна враховуються:

- температурний клас ізоляції (F, H);
- ступінь захисту корпусу (IP55, IP65);
- вибухозахищене виконання (Exd, Exe) для шахт і газових виробництв;
- вологозахищення та пилозахист;
- режим роботи (S1 – тривалий, S2 – короткочасний, S3 – повторно-короткочасний).

Системи регулювання продуктивності вентиляторів

Ефективне керування продуктивністю вентиляційних установок має важливе значення для забезпечення стабільного мікроклімату, підтримання необхідного тиску в повітропроводах і оптимізації енергоспоживання.

У більшості промислових вентиляторних систем споживання електроенергії становить 20–40 % від загальних витрат підприємства, тому впровадження енергоефективних методів регулювання продуктивності є пріоритетним завданням сучасного інжинірингу.

Загальні принципи регулювання

Продуктивність вентилятора визначається його аеродинамічними характеристиками, які описуються так званими законами подібності:

$$Q \propto n, \quad \Delta p \propto n^2, \quad N \propto n^3$$

де

$Q$  — витрата повітря, м<sup>3</sup>/с;

$\Delta p$  — створюваний тиск, Па;

$N$  — споживана потужність, Вт;

$n$  — частота обертання робочого колеса.

З цих співвідношень випливає, що навіть невелике зниження швидкості обертання суттєво зменшує споживану потужність. Наприклад, зниження швидкості на 20 % зменшує потужність майже на 50 %.

Цей принцип лежить в основі частотного регулювання електроприводу.

Методи регулювання продуктивності вентиляторів

Методи регулювання поділяють на механічні, електричні та комбіновані. Їх вибір залежить від типу вентилятора, діапазону зміни навантаження та вимог до стабільності параметрів.

1. Механічне регулювання

а) Заслінкове регулювання (дроселювання)

Здійснюється шляхом зміни опору повітропроводу за допомогою шиберів, заслінок або клапанів

При прикритті заслінки тиск у системі зростає, а витрата повітря зменшується.

Робоча точка вентилятора зміщується уздовж його характеристики, однак ККД при цьому різко падає.

Залежність споживаної потужності при дроселюванні можна виразити як:

$$N_2 = N_1 \left( \frac{Q_2}{Q_1} \right)^3 \left( \frac{\eta_1}{\eta_2} \right)$$

де  $(\eta_1, \eta_2)$  — ККД вентилятора при початковій і зменшеній витратах.

Недолік цього способу — високі втрати енергії через збільшення опору потоку.

Перевага — простота конструкції та низька вартість.

б) Регулювання напрямом лопатей (поворотні лопатки)

Зміна кута установки лопатей в осьових вентиляторах дозволяє керувати кутом атаки повітряного потоку

Регулювання може бути:

- *ручним* (у нерухомому стані);
- *автоматичним* (під час роботи вентилятора).

Такий спосіб забезпечує високий ККД у всьому діапазоні навантажень, однак має складну механіку та потребує точного балансування ротора.

в) Направляючий апарат перед вентилятором

Встановлення напрямних лопатей перед входом у робоче колесо створює попередній закрут потоку. Це дозволяє зменшити подачу без суттєвих втрат енергії порівняно з заслінковим методом.

Недоліком є складність конструкції та більші капітальні витрати.

## 2. Електричне регулювання

Електричні методи керування забезпечують зміну частоти обертання електродвигуна, що безпосередньо впливає на витрату та тиск вентилятора.

### а) Частотне регулювання

Найефективніший метод сучасного енергозбереження.

Продуктивність вентилятора регулюється зміною частоти живлення двигуна за допомогою перетворювача частоти (ПЧ):

$$f = \frac{n_p \cdot n}{60}$$

де

$f$  — частота живлення, Гц;

$n_p$  — число пар полюсів;

$n$  — швидкість обертання, об/хв.

При зменшенні частоти відбувається пропорційне зниження обертів двигуна та витрати повітря.

Споживана потужність при цьому визначається як:

$$N = N_0 \left( \frac{n}{n_0} \right)^3$$

Переваги:

- найвищий ККД серед усіх методів регулювання;
- відсутність механічних втрат;
- плавний пуск і гальмування;
- можливість автоматизації та дистанційного контролю.

Недоліки: висока початкова вартість, необхідність фільтрації гармонік, вимоги до електромагнітної сумісності.

### б) Регулювання напругою живлення

Застосовується у малопотужних однофазних або трифазних двигунах. Зменшення напруги призводить до зниження моменту і швидкості обертання.

Залежність моменту від напруги описується формулою:

$$M \propto U^2$$

Недолік — значні втрати енергії та погіршення ККД, тому метод майже не використовується у промислових системах.

### в) Керування опором у роторному колі

Актуальне для асинхронних двигунів з фазним ротором.

Регулювання здійснюється зміною додаткового опору ( $R_d$ ) у роторному колі, що змінює ковзання двигуна:

$$s = \frac{R'_2 + R_d}{X'_2}$$

Зі збільшенням опору зменшується швидкість обертання і потужність вентилятора.

Метод простий, але має значні втрати енергії на резисторах, тому доцільний лише у системах із рідким регулюванням швидкості.

### 3. Комбіновані системи регулювання

У великих вентиляційних установках застосовують поєднання механічних та електричних методів.

Наприклад, грубе регулювання здійснюється частотним перетворювачем, а точне — поворотом лопатей.

Такі системи дозволяють одночасно оптимізувати енергоспоживання та забезпечити стабільність технологічних параметрів.

### Енергетичний аналіз способів регулювання

Для оцінки ефективності застосовують коефіцієнт енергозбереження:

$$k_e = \frac{N_{\text{непер}} - N_{\text{пер}}}{N_{\text{непер}}} \times 100\%$$

де

$N_{\text{непер}}$  — потужність вентилятора без регулювання (при постійній швидкості);

$N_{\text{пер}}$  — потужність при заданому способі регулювання.

Типові значення ( $k_e$ ):

- заслінкове — 5–10 %;
- направляючі апарати — 15–20 %;
- поворот лопатей — 25–30 %;
- частотне регулювання — до 50 % і більше.

### Автоматизовані системи регулювання

У сучасних вентиляторних установках регулювання здійснюється автоматично за допомогою мікропроцесорних контролерів.

Типова система містить:

- датчики тиску, витрати, температури, струму;
- контролер (PLC) для обробки сигналів і реалізації закону керування;
- перетворювач частоти (ПЧ) або привід із зворотним зв'язком;
- людиномашинний інтерфейс (HMI) для візуалізації параметрів;
- систему SCADA для моніторингу та аналізу трендів.

Регулювання може здійснюватися за одним із законів:

- підтримання постійного тиску у повітропроводі;
- підтримання постійної витрати повітря;
- адаптивне керування залежно від навантаження технологічного об'єкта.

У найсучасніших системах застосовується цифровий двоконтурний регулятор, який підтримує заданий тиск при мінімальному енергоспоживанні:

$$P_{\text{зад}} - P_{\text{факт}} \xrightarrow{\text{PID}} U_{\text{кер}} \xrightarrow{\text{VFD}} n_{\text{дв}} \xrightarrow{\text{вентилятор}} Q, \Delta p$$

Вплив режимів роботи на вибір електродвигуна

Робота вентиляційних систем характеризується значними змінами продуктивності, тривалим часом безперервного навантаження та вимогами до плавного регулювання швидкості. Тому правильний вибір електродвигуна визначає не лише стабільність повітряного потоку, а й енергоефективність, довговічність та надійність усієї установки.

Характер навантаження вентиляторного приводу

Для вентиляторів характерне м'яке навантаження, при якому момент опору зростає пропорційно квадрату швидкості обертання:

$$M_{\text{оп}} = k \cdot n^2$$

де

$M_{\text{оп}}$  — момент опору, Н·м;

$n$  — частота обертання, об/с;

$k$  — коефіцієнт пропорційності, що залежить від параметрів вентилятора та густини повітря.

Закон квадратичної залежності пояснюється тим, що динамічний тиск повітря пропорційний квадрату швидкості потоку, а отже, і квадрату швидкості обертання лопатей вентилятора.

Робоча характеристика електроприводу вентилятора

Рівновага між моментом електродвигуна  $M_{\text{дв}}$  і моментом опору вентилятора  $M_{\text{оп}}$  визначає робочу точку системи:

$$M_{\text{дв}} = M_{\text{оп}}.$$

Якщо момент двигуна перевищує момент опору, вентилятор прискорюється; якщо менший — сповільнюється. У сталому режимі обидва моменти врівноважені.

Для асинхронного двигуна момент визначається рівнянням:

$$M_{\text{дв}} = \frac{3U^2 R'_2}{\omega_s [(R_1 + R'_2/s)^2 + (X_1 + X'_2)^2]}$$

де

$U$  — лінійна напруга, В;

$R_1, X_1$  — активний і реактивний опори статора;

$R'_2, X'_2$  — приведені до статора опори ротора;

$s$  — ковзання;

$\omega_s$  — синхронна кутова швидкість, рад/с.

Побудова характеристик (  $M_{дв} = f(n)$  ) і (  $M_{оп} = f(n)$  ) дозволяє оцінити стійкість роботи та динамічні властивості системи.

Закони подібності при зміні швидкості

При зміні швидкості обертання вентилятора діють закони подібності, які зв'язують основні параметри:

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{n_2}{n_1},$$
$$\frac{\Delta p_2}{\Delta p_1} = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2,$$
$$\frac{N_2}{N_1} = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^3$$

Ці співвідношення показують, що навіть невелике зниження швидкості значно зменшує споживану потужність. Наприклад, при зменшенні швидкості на 25 % потужність зменшується майже вдвічі:

$$\frac{N_2}{N_1} = (0.75)^3 = 0.42$$

Звідси випливає, що електродвигуни вентиляторів доцільно експлуатувати у режимі частотного регулювання, оскільки це забезпечує найбільший енергетичний ефект при часткових навантаженнях.

Вибір потужності електродвигуна

Необхідна потужність електродвигуна визначається за формулою:

$$N_{дв} = \frac{Q \cdot \Delta p}{\eta_v \cdot \eta_{п} \cdot \eta_{дв}}$$

де

$\eta_v$  — ККД вентилятора;

$\eta_{п}$  — ККД передавального механізму (муфти, редуктора);

$\eta_{дв}$  — ККД електродвигуна.

З урахуванням запасу потужності:

$$N_{виб} = N_{дв} \cdot k_3, \quad k_3 = 1.1 \div 1.2$$

Запас потужності компенсує перевантаження при запуску, зміні тиску або коливаннях живлення.

Вибір типу двигуна за режимом навантаження

Характеристика вентилятора визначає форму навантаження двигуна.

Виділяють кілька типових режимів:

1. Безперервний рівномірний режим (S1)

Двигун працює з постійним навантаженням тривалий час.

Використовуються переважно асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором.

2. Безперервний змінний режим (S3–S6)

Навантаження змінюється циклічно (залежно від температури, вологості, зміни технологічних процесів).

Доцільно застосовувати частотно-регульовані приводи.

3. Короткочасний режим (S2)

Використовується у допоміжних або резервних вентиляторах.

Потрібен запас потужності для короткочасних перевантажень.

4. Реверсивний режим

Для систем, що можуть працювати у двох напрямках потоку (наприклад, резервні вентиляційні системи шахт).

Використовують двигуни з можливістю реверсу або подвійного живлення.

Теплові умови роботи електродвигуна

При виборі двигуна необхідно враховувати тепловий режим.

Вентилятори, що працюють у запиленому або високотемпературному повітрі, мають гірші умови охолодження, тому слід застосовувати двигуни з підвищеним класом ізоляції (F або H) та спеціальними системами охолодження (тип IC411, IC416 тощо).

Допустиме перевищення температури обмоток визначається за стандартами:

$$\Delta T_{\text{доп}} = T_{\text{к}} - T_{\text{с}} = f(\text{клас ізоляції})$$

де

$T_{\text{к}}$  — температура обмоток, °C;

$T_{\text{с}}$  — температура навколишнього середовища.

Приклад: для класу ізоляції F допустиме перевищення температури становить ( 105°C ).

Вибір частоти обертання двигуна

Оптимальна швидкість обертання вентилятора визначається компромісом між ефективністю, рівнем шуму та механічними навантаженнями.

Для промислових систем найчастіше застосовуються стандартні швидкості:

- 750 об/хв (8-полюсні двигуни);
- 1000 об/хв (6-полюсні);
- 1500 об/хв (4-полюсні).

Високошвидкісні двигуни (3000 об/хв) мають менші габарити, але створюють більший шум і вібрацію.

Швидкість вентилятора можна визначити через частоту живлення:

$$n = \frac{60f(1-s)}{p}$$

де

$f$  — частота живлення, Гц;

$s$  — ковзання;

$p$  — кількість пар полюсів.

Динамічні режими і пускові моменти

Під час пуску вентилятор створює значний момент інерції, тому важливо забезпечити відповідний пусковий момент двигуна:

$$M_{\text{пуск}} \geq (1.1 \div 1.3)M_{\text{оп,макс}}$$

Для великих вентиляторів застосовують плавні пускачі або перетворювачі частоти, які зменшують механічні навантаження і забезпечують стабільний розгін.

Час пуску визначається із рівняння динаміки обертального руху:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_{\text{дв}} - M_{\text{оп}}$$

де  $J$  — момент інерції системи.

Звідси тривалість пуску:

$$t_{\text{п}} = \int_{\omega_0}^{\omega_{\text{н}}} \frac{J}{M_{\text{дв}} - M_{\text{оп}}} d\omega.$$

Коефіцієнт навантаження і енергоефективність.

Для оцінки ефективності двигуна використовують коефіцієнт завантаження:

$$k_{\text{н}} = \frac{P_{\text{факт}}}{P_{\text{ном}}}$$

Оптимальним вважається режим  $k_{\text{н}} = 0.7 \div 0.9$ .

При роботі на нижчих рівнях ККД двигуна зменшується, а втрати у сталі та міді зростають.

Залежність ККД від навантаження описується апроксимацією:

$$\eta = \eta_{\text{макс}}[1 - c(1 - k_{\text{н}})^2]$$

де  $c$  — емпіричний коефіцієнт (0.3–0.5).

Системи захисту, моніторингу та діагностики вентиляторних систем

Сучасні вентиляторні установки промислових підприємств — це складні електромеханічні комплекси, що працюють у важких умовах: пил, волога, високі температури, агресивні гази, а також тривалий час безперервної експлуатації. Для забезпечення їхньої надійної роботи необхідно застосовувати комплекс систем захисту, моніторингу та технічної діагностики, які дозволяють своєчасно виявляти відхилення параметрів, запобігати аваріям і планувати технічне обслуговування.

Основні завдання систем захисту та діагностики

1. Контроль робочих параметрів електроприводу (струм, напруга, температура, швидкість, вібрація).
2. Виявлення та усунення відхилень до моменту виникнення аварійних ситуацій.
3. Запобігання перевантаженням двигуна і механічним пошкодженням вентилятора.
4. Автоматичне відключення системи при перевищенні критичних значень.
5. Збір і збереження діагностичної інформації для аналізу та планування ремонтів.
6. Інтеграція в систему АСУ ТП для централізованого моніторингу стану обладнання.

Види захистів електродвигунів вентиляторів

1. Тепловий захист

Здійснюється за допомогою термодатчиків у обмотках статора або термореле.

Найчастіше використовуються сенсори типу РТС або РТ100, сигнал яких надходить до контролера або частотного перетворювача.

При перевищенні граничної температури двигун зупиняється автоматично.

Теплове навантаження описується рівнянням теплового балансу:

$$C \frac{dT}{dt} = P_{\text{вт}} - hA(T - T_0)$$

де

$C$  — теплоємність обмоток;

$P_{\text{вт}}$  — втрати потужності;

$hA(T - T_0)$  — відведення тепла в навколишнє середовище.

2. Захист від перевантаження за струмом

Контролюється перевищення струму вище допустимого значення:

$$I_{\phi} > k_{\Pi} \cdot I_{\text{ном}}$$

де  $k_{\Pi} = 1.1 \div 1.3$ .

Реалізується за допомогою електронних реле струму або модулів частотного перетворювача.

При короткочасному перевищенні система може зменшити швидкість вентилятора, при тривалому — зупинити його.

### 3. Захист від зниження напруги (недонапруги)

При зменшенні напруги живлення двигун втрачає момент, що може призвести до зупинки вентилятора або перегріву.

Автоматичний блок контролю напруги здійснює відключення при ( $U < 0.8U_{ном}$ ).

### 4. Захист від перекосу фаз і обриву

Нерівномірність напруг у фазах спричиняє зростання струмів у одній із фаз і перегрів обмоток.

Для запобігання цьому використовуються реле контролю фаз, що реагують на асиметрію понад 5–10 %.

### 5. Захист від зворотного напрямку обертання

Особливо актуальний для головних шахтних вентиляторів, де зміна напрямку потоку може створити небезпечну ситуацію.

Контроль здійснюється за допомогою реле послідовності фаз або енкодера швидкості.

### 6. Захист від вібрації та розбалансування ротора

Перевищення допустимого рівня вібрацій є ознакою дефектів підшипників, муфт або лопатей.

Сигнал від вібросенсорів (акселераторів) обробляється системою моніторингу, і при перевищенні порогу вібрацій вентилятор автоматично зупиняється.

Допустимий рівень вібрацій регламентується стандартами:

$$v_{доп} = 4.5, \text{мм/с (для великих машин)}$$

Моніторинг і контроль параметрів електромеханічної системи

Моніторинг виконується у реальному часі з використанням датчиків, контролерів та програмного забезпечення SCADA.

Контрольовані параметри:

Параметр	Тип датчика	Нормовані межі
Температура обмоток	РТ100, РТС	80–120 °С
Струм статора	Шунт, ТТ	0.8–1.2 × Іном
Вібрація	Акселерометр	≤ 4.5 мм/с
Частота обертання	Енкодер	±5 % від номіналу
Температура підшипників	Термопара	≤ 90 °С
Тиск повітря	Датчик тиску (4–20 мА)	Залежно від системи

Дані з датчиків збираються контролером і передаються до системи SCADA, де оператор може відслідковувати стан обладнання, отримувати попередження та аналізувати тенденції.

Вібраційна діагностика вентиляторних систем

Призначення:

Вібраційна діагностика дозволяє виявляти дефекти підшипників, розбалансування ротора, невідцентрованість муфт, розхитування кріплень, знос лопатей та інші відхилення.

Методика:

Вимірюються віброшвидкість ( $v$ ), вібропереміщення ( $s$ ) або віброакселерація ( $a$ ).

Між цими параметрами існує співвідношення:

$$a = \omega^2 s, \quad v = \omega s$$

де  $\omega = 2\pi f$  — кругова частота вібрацій.

Спектральний аналіз сигналів дозволяє визначити тип дефекту:

- Пік на частоті  $1 \times n$  — дисбаланс;
- $2 \times n$  — дефект муфти або еліптичність вала;
- Високочастотні коливання — пошкодження підшипників.

Теплова діагностика

Для контролю стану обмоток, підшипників і з'єднань використовується інфрачервона термографія.

Тепловізор дозволяє виявити локальні перегріву, спричинені:

- неякісними контактами у клемних коробках;
- підвищеним опором з'єднань;
- пошкодженнями ізоляції;
- асиметрією навантаження.

Температурна різниця між фазами не повинна перевищувати  $10^\circ\text{C}$ .

Контроль енергетичних параметрів

Для підвищення енергоефективності системи моніторингу здійснюють:

- вимірювання миттєвої потужності  $P = \sqrt{3}UI \cos \varphi$ ;
- розрахунок спожитої енергії  $W = \int P(t)dt$ ;
- визначення коефіцієнта потужності  $\cos \varphi$ ;
- аналіз гармонічних спотворень напруги та струму.

Високий рівень гармонік призводить до перегріву двигуна та спотворення сигналів датчиків, тому застосовуються фільтри Л–С або активні компенсатори.

Системи автоматичного аварійного захисту

При перевищенні встановлених порогових значень параметрів система виконує:

1. попереджувальну сигналізацію (жовтий рівень);
2. автоматичне відключення (червоний рівень).

Типовий алгоритм аварійного відключення вентилятора:

1. Виявлення параметра ( $x_i > x_{\text{доп}}$ );

2. Передача сигналу до контролера PLC;
3. Зупинка двигуна через ПЧ або контактор;
4. Блокування повторного пуску до усунення причини;
5. Запис події у журнал SCADA.

#### Інтегровані системи моніторингу стану

Великі вентиляційні комплекси обладнуються інтегрованими системами Condition Monitoring System (CMS), які об'єднують у собі функції:

- збору діагностичних даних у реальному часі;
- автоматичної оцінки технічного стану;
- прогнозування ресурсу вузлів (підшипників, ізоляції, муфт);
- передавання даних на сервер технічної підтримки підприємства.

Система CMS може взаємодіяти з модулями ERP або MES, забезпечуючи предиктивне технічне обслуговування — тобто ремонт за станом, а не за календарним графіком.

#### Застосування вентиляторних систем у гірничих підприємствах

Системи вентиляції у гірничій промисловості є ключовим елементом забезпечення безпечних умов праці, стабільного мікроклімату та ефективного видалення шкідливих газів і пилу.

Від правильної організації повітрообміну залежить не лише продуктивність роботи шахт, а й життя людей, тому інжиніринг вентиляторних систем у гірничих умовах має стратегічне значення.

#### Призначення вентиляції в шахтах

Основні функції шахтної вентиляції:

1. Постачання свіжого повітря до робочих зон.
2. Видалення метану, вуглекислого газу, пилу, оксидів азоту, вологи.
3. Регулювання температури і вологості повітря.
4. Розведення вибухонебезпечних сумішей до безпечних концентрацій.
5. Підтримання нормального кисневого балансу у виробках.

Порушення роботи вентиляційної системи може призвести до вибуху, пожежі або отруєння персоналу. Тому вимоги до таких систем регламентуються Правилами безпеки у вугільних шахтах України та міжнародними стандартами ISO 21909, IEC 60079.

#### Класифікація вентиляційних установок шахт

1. Головні вентиляційні установки (ГВУ)

Призначені для провітрювання всієї шахти. Зазвичай встановлюються на поверхні біля головного стовбура.

Характеризуються великою продуктивністю (до 1000–3000 м<sup>3</sup>/с) і високим тиском (до 5000 Па).

У складі: два вентилятори — основний та резервний (у режимі  $N+1$ ).

## 2. Допоміжні (місцеві) вентилятори (МВУ)

Забезпечують провітрювання окремих виробок, горизонтів, тупикових вибою.

Продуктивність — 5–100 м<sup>3</sup>/с, тиск — до 2000 Па.

Використовуються разом із гнучкими вентиляційними трубопроводами.

## 3. Аварійні та реверсивні установки

Призначені для зміни напрямку потоку повітря при аварії (пожежі, вибуху).

Забезпечують реверсування повітря протягом  $\leq 10$  хвилин, відповідно до вимог безпеки.

Типи вентиляторів, що застосовуються у шахтах

У гірничій промисловості використовують:

- осьові вентилятори типу ВЦД, ВМЭ, ВОД, ВОДМ — для головних установок;
- радіальні вентилятори типу ВРП, ВРШ — для допоміжних і аспіраційних систем;
- вибухозахищені вентилятори типу ВОБ, ВМПВ — у вугільних шахтах з метановиділенням.

Основні вимоги до вентиляторів:

- виконання вибухозахищене (Exd);
- стійкість до абразивного пилу;
- можливість реверсивної роботи;
- високий ККД при змінному навантаженні (до 0.85–0.90);
- низький рівень шуму та вібрацій.

Електромеханічні особливості шахтних вентиляторів

Електродвигуни головних вентиляторів мають потужність від 160 до 1000 кВт, напругу 6–10 кВ, ступінь захисту IP55 або IP65, а також виконання ВР або ВРВ (вибухозахищене, рудничне).

Зазвичай застосовуються асинхронні двигуни з фазним ротором або двигуни, керовані через частотні перетворювачі.

Схема електроживлення передбачає:

- резервне підключення до двох незалежних ліній живлення;
- автоматичне перемикавання на резерв при знеструмленні;
- можливість ручного або дистанційного керування з диспетчерського пункту.

Регулювання продуктивності шахтних вентиляторів

Регулювання здійснюється залежно від глибини шахти, кількості працюючих горизонтів і концентрації газів.

Основні методи:

1. Поворот лопатей направляючого апарата (механічне регулювання);
2. Зміна частоти живлення двигуна (електричне регулювання через ПЧ);
3. Комбіноване керування – для систем з великою інерційністю повітряного потоку.

Частотне регулювання дозволяє економити до 40 % електроенергії, що особливо важливо для головних вентиляторних установок, які працюють безперервно.

#### Безпека експлуатації вентиляційних систем

Безпечна робота вентиляційних систем шахт забезпечується:

- автоматичним контролем параметрів повітря:
- концентрації метану, кисню, температури, тиску;
- автоматичним реверсом:
- при перевищенні допустимої концентрації метану відбувається зміна напрямку потоку для видалення газів;
- аварійним живленням:
- на випадок відключення основної лінії;
- дублюванням основних елементів:
- резервний двигун і вентилятор, система керування, канали зв'язку.

Система контролю концентрації метану побудована за принципом безперервного моніторингу. Якщо рівень метану перевищує 1 %, сигнал подається до диспетчера; при 1,5 % — система автоматично зупиняє роботу обладнання та виконує реверсування потоку.

#### Системи моніторингу та дистанційного керування

Головні вентиляційні установки оснащуються сучасними системами автоматизації, що забезпечують:

- контроль параметрів у реальному часі;
- архівування даних про тиск, витрату, швидкість, струм;
- автоматичне керування швидкістю через частотний перетворювач;
- інтеграцію з SCADA-системою диспетчерського пункту;
- можливість віддаленого керування через мережу Ethernet або GSM.

#### Приклад розрахунку параметрів вентиляційної системи шахти

Для спрощеної оцінки параметрів вентилятора можна використати вираз:

$$N = \frac{Q \cdot \Delta p}{\eta_B}$$

Нехай ( $Q = 1000, \text{ м}^3/\text{с}$ ), ( $\Delta p = 3000, \text{ Па}$ ), ( $\eta_B = 0.85$ ).

Тоді необхідна потужність вентилятора:

$$N = \frac{1000 \times 3000}{0.85} = 3.53 \times 10^6, \text{ Вт} = 3530, \text{ кВт}$$

Отже, для забезпечення роботи головної вентиляційної установки потрібен двигун потужністю близько 3,6 МВт, який може бути реалізований як два паралельно працюючих двигуни по 1800 кВт.

Особливості експлуатації і технічного обслуговування

1. Щоденний контроль:
  - візуальний огляд стану вентилятора, двигуна, муфт;
  - перевірка рівня вібрацій, температури підшипників, струму двигуна.
2. Періодичне технічне обслуговування:
  - очищення лопатей від пилу;
  - змащування підшипників;
  - перевірка балансування ротора;
  - калібрування датчиків і систем автоматики.
3. Капітальний ремонт:
  - перевірка ізоляції обмоток двигуна;
  - заміна підшипників, ущільнень;
  - відновлення балансування та центрування вузлів.

Приклади сучасних систем у гірничій промисловості

- Система “Шахта–Вентиляція 4.0” (Україна) – цифровий комплекс моніторингу, що інтегрує SCADA, датчики метану, частотні приводи Altivar Process і контролери Modicon M580.
- Система VOD-16 (Польща) – головна установка із двома осьовими вентиляторами, частотним регулюванням і резервним живленням 10 кВ.
- Система ABB ACS880-Mine Vent Control (Фінляндія) – централизоване керування вентиляцією підземних шахт на базі VFD з адаптивним алгоритмом зміни швидкості залежно від кількості працюючих забоїв.

Висновки.

Вентиляторні системи є одним із ключових елементів енергетичної та технологічної інфраструктури гірничо-металургійних підприємств. Вони забезпечують безпечні умови праці, стабільність технологічних процесів, а також формують значну частку енергоспоживання виробництва.

Інжиніринг таких систем передбачає комплексне поєднання рішень з механічної, електротехнічної, інформаційної складових та автоматизації.

Основні підсумки вивчення теми

1. Вентиляторні системи виконують функції переміщення повітря, видалення шкідливих газів, охолодження технологічних установок і забезпечення мікроклімату у виробничих приміщеннях та шахтах.
2. Типи вентиляторів поділяються за напрямом потоку (осьові, радіальні, діагональні), створюваним тиском (низького, середнього, високого) та конструктивними особливостями (загнуті вперед або назад лопаті, двостороннє всмоктування).
3. Електромеханічне забезпечення включає вибір типу двигуна (асинхронний, синхронний), схеми пуску, способи регулювання швидкості, механічні з'єднання (муфти, редуктори), системи охолодження та опори.
4. Регулювання продуктивності може бути механічним (заслінки, направляючі апарати, поворот лопатей) або електричним (зміна частоти живлення).
5. Найефективнішим є частотно-регульований електропривід, що забезпечує економію енергії до 50 % у порівнянні з нерегульованими системами.
6. Вибір електродвигуна здійснюється з урахуванням закону квадратичної залежності моменту опору від швидкості обертання, коефіцієнтів запасу, умов охолодження та динамічних характеристик.
7. Енергетична ефективність двигуна досягає максимуму при завантаженні 70–90 % від номінальної потужності.
8. Системи захисту та діагностики включають тепловий, струмовий, фазний, вібраційний і температурний контроль, що реалізується через мікропроцесорні контролери, частотні перетворювачі та SCADA-системи.
9. Вібраційна та теплова діагностика дозволяють виявляти ранні ознаки пошкоджень і запобігати аваріям.
10. Гірничі підприємства використовують головні, допоміжні та аварійні вентиляційні установки.
11. Головні вентилятори великої потужності (1–3 МВт) працюють безперервно, забезпечуючи подачу свіжого повітря у виробки та відведення метану.
12. Умови їх експлуатації вимагають вибухозахищеного виконання, подвійного живлення, автоматичного реверсу й резервування обладнання.
13. Цифровізація вентиляторних систем спрямована на інтеграцію частотних приводів, систем моніторингу стану (Condition Monitoring Systems) і предиктивного обслуговування в єдину інформаційну інфраструктуру підприємства.

#### Висновкові положення

- Вентиляторна установка — це комплексний електромеханічний об'єкт, робота якого залежить від точності розрахунків, правильного вибору приводу й системи керування.

- Використання енергоощадних технологій та автоматизованих систем управління забезпечує оптимальний баланс між продуктивністю, безпекою та енергоспоживанням.
- Інженер повинен володіти знаннями в галузі аеродинаміки, електромеханіки, автоматизації та діагностики, що дозволить проектувати надійні й ефективні системи вентиляції для гірничих і металургійних підприємств.

Контрольні питання до теми 7.

1. Які основні функції виконують вентиляторні системи у промислових підприємствах?
2. У чому полягає різниця між осьовими, радіальними та діагональними вентиляторами?
3. За якими основними параметрами класифікуються промислові вентилятори?
4. Які чинники визначають ефективність вентиляційної системи?
5. Які типи електродвигунів найчастіше застосовуються у вентиляторних установках і чому?
6. У чому полягає перевага частотно-регульованого електроприводу перед механічними способами регулювання продуктивності?
7. Поясніть фізичний зміст «законів подібності» для вентиляторів і наведіть відповідні математичні співвідношення.
8. Які схеми пуску електродвигунів застосовуються у вентиляторних системах різної потужності?
9. Як впливає швидкість обертання вентилятора на його продуктивність, тиск і споживану потужність?
10. У яких випадках доцільно використовувати асинхронні двигуни з фазним ротором?
11. Які основні методи механічного регулювання продуктивності вентиляторів ви знаєте?
12. Назвіть основні параметри, що контролюються системами моніторингу вентиляційних установок.
13. Які типи захистів реалізуються в електродвигунах вентиляторів?
14. У чому полягає призначення та особливості головних і допоміжних вентиляторних установок шахт?
15. Які переваги надає впровадження цифрових систем моніторингу стану (Condition Monitoring) у гірничих вентиляторних комплексах?

Використана література.

1. Коренькова Т. В., Сердюк О. О., Ковальчук В. Г., Сергієнко С.А. Енергозберігаючі режими роботи насосних і вентиляторних установок з автоматизованим електроприводом : навчальний посібник, 2-ге видання, перероблене і доповнене. Кременчук : Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, 2023. 194 с.

2. Коренькова Т. В., Сердюк О. О., Ковальчук В. Г. Режими роботи насосних та вентиляторних установок із автоматизованим електроприводом : навч. посібник. Кременчук : ПП Щербатих О. В., 2013. 200 с.

3. Шевчук С. П., Попович О. М., Світлицький В. М. Насосні, вентиляторні та пневматичні установки. Київ : НТУУ «КПІ», 2010. 308 с.

4. ДСТУ 4132–2002. Насоси відцентрові загальнопромислового застосування. Вимоги до проектування, виготовлення, постачання, монтажування та експлуатування. Звід правил. Київ : Держспоживстандарт України, 2002. 30 с.

5. Насосні та повітродувні станції : навч. посібник / Т. О. Шевченко, Ю. В. Ярошенко, М. М. Яковенко, В. М. Беляєва; Харк. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. Харків: ХНУМГ, 2014. 195 с.

## ТЕМА 8. ІНЖИНІРИНГ КОМПРЕСОРНИХ СИСТЕМ.

Види компресорів (поршневі, відцентрові, гвинтові). Вибір електроприводів і схем керування. Особливості роботи в динамічних режимах. Методи енергозбереження при експлуатації компресорів. Надійність і безпека компресорних установок. Модернізація компресорних станцій.

### Загальні відомості про компресорні системи

Компресорні системи є важливою складовою сучасних промислових підприємств, зокрема гірничо-металургійного комплексу. Вони забезпечують стиснення та транспортування повітря або газів, необхідних для технологічних процесів, пневматичного транспорту, охолодження, продувки, керування механізмами, а також для забезпечення безпечного середовища праці.

Компресор — це машина, призначена для підвищення тиску газу шляхом зменшення його об'єму або надання йому кінетичної енергії, що згодом перетворюється в потенційну. За своєю суттю компресор є зворотним аналогом двигуна внутрішнього згоряння: замість розширення газу, що виконує роботу, у компресорі газ стискується за рахунок зовнішньої механічної енергії.

### Роль компресорних систем у промисловості

У гірничих, металургійних та хімічних процесах стиснене повітря виконує такі функції:

- енергетичну – привід пневматичних механізмів (молотів, клапанів, циліндрів, гальмівних систем);
- технологічну – забезпечення процесів продувки конверторів, спікання агломерату, транспортування сипких матеріалів;
- охолоджувальну – подача повітря в системи вентиляції, охолодження печей, апаратів і насосів;
- захисну – створення надлишкового тиску в електричних шафах для запобігання потраплянню пилу чи вибухонебезпечних газів.

На сучасних підприємствах системи стисненого повітря є розгалуженими інженерними мережами з централізованим постачанням, що містять декілька компресорних станцій, пов'язаних з ресиверами, осушувачами, фільтрами, трубопроводами та регулюючою апаратурою.

### Основні фізичні процеси при стисканні газів

Процес стиску повітря можна описати рівнянням поліотропи:

$$pV^n = \text{const},$$

де  $p$  — тиск,

$V$  — об'єм,

$n$  — показник поліотропи (характеризує тип процесу: ізотермічний, адіабатичний чи проміжний).

Робота, що витрачається на стискання газу, визначається інтегралом:

$$A = \int_{V_1}^{V_2} p, dV = \frac{n}{n-1} p_2 V_2 \left[ 1 - \left( \frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right],$$

де

$p_1, V_1$  — параметри газу на вході;

$p_2, V_2$  — на виході.

Якщо процес стиску відбувається ізотермічно ((  $n = 1$  )), то робота мінімальна:

$$A_{\text{ізот}} = p_1 V_1 \ln \frac{p_2}{p_1},$$

а при адіабатичному стиску ((  $n = k$  )), робота більша:

$$A_{\text{ад}} = \frac{k}{k-1} p_1 V_1 \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right],$$

де  $k = \frac{c_p}{c_v}$  — показник адіабати, для повітря  $k = 1,4$ .

Таким чином, для зниження енергетичних витрат важливо забезпечити умови, близькі до ізотермічного стиску — тобто ефективне охолодження циліндрів або ступенів компресора.

Показники ефективності компресорів

Головними параметрами, що характеризують роботу компресора, є:

- Подача  $Q$  — об'єм газу, поданий у магістраль за одиницю часу, м<sup>3</sup>/с;

- Тиск нагнітання  $p_2$  — кінцевий тиск після стиску;

- Ступінь стиску:

$$\pi = \frac{p_2}{p_1};$$

- Потужність компресора:

$$N = \frac{A}{t} = \frac{p_2 V_2 n}{(n-1)t} - \left( \frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{n-1}{n}};$$

- Коефіцієнт корисної дії (ККД):

$$\eta = \frac{A_{\text{ізот}}}{A_{\text{реальн}}}.$$

Сумарний ККД компресорної установки визначається з урахуванням електричних, механічних і термодинамічних втрат:

$$\eta_{\text{заг}} = \eta_{\text{ел}} \cdot \eta_{\text{мех}} \cdot \eta_{\text{терм}}.$$

Типові значення:

- $\eta_{\text{ел}} = 0,9-0,95$ ;
- $\eta_{\text{мех}} = 0,95-0,97$ ;
- $\eta_{\text{терм}} = 0,7 - 0,8$ .

Отже, загальний ККД компресорної установки зазвичай становить  $\eta_{\text{заг}} = 0,55-0,70$ .

Основні елементи компресорної системи

Сучасна компресорна установка включає кілька взаємопов'язаних підсистем:

1. Компресорний агрегат — механічна частина (поршневий, гвинтовий, відцентровий або інший тип).
2. Електропривід — електродвигун постійного або змінного струму.
3. Система керування — забезпечує автоматичне підтримання тиску, послідовність пуску та зупинки.
4. Осушувальна й фільтраційна система — для очищення стисненого повітря від пилу, вологи, масла.
5. Ресивери (повітряні баки) — стабілізують тиск у системі.
6. Трубопровідна мережа — транспортує повітря до споживачів.
7. Системи діагностики та безпеки — вимірюють температуру, тиск, вібрацію, забезпечують аварійне вимкнення.

Типові параметри промислових компресорних станцій

Для орієнтиру наведено діапазони робочих параметрів основних промислових компресорів табл. 8.1.

Таблиця 8.1 - Типові параметри промислових компресорних станцій

Тип компресора	Подача Q, м <sup>3</sup> /хв	Тиск нагнітання p <sub>2</sub> , МПа	Потужність двигуна, кВт	ККД, %
Поршневий	1–100	0,5–40	5–500	60–70
Відцентровий	100–15000	0,3–1,5	200–5000	75–85
Гвинтовий	0,5–200	0,3–1,0	3–500	70–85

Ці дані демонструють, що вибір типу компресора залежить від необхідного тиску, подачі, режиму роботи та вимог до стабільності тиску.

Втрати енергії у системі стисненого повітря

У реальних умовах значна частина енергії витрачається на подолання втрат:

- втрати на стискання (неізотермічність процесу);
- втрати в трубопроводах (тертя, турбулентність, місцеві опори);
- втрати через витоки повітря у з'єднаннях;
- втрати в електродвигуні (омічні, магнітні, вентиляційні);
- втрати у приводі (передача, ремені, муфти).

Сумарні втрати можна подати рівнянням енергетичного балансу:

$$P_{\text{вх}} = P_{\text{кор}} + P_{\text{вт}} = P_{\text{кор}} + (P_{\text{мех}} + P_{\text{терм}} + P_{\text{ел}} + P_{\text{гід}}),$$

де  $P_{\text{вх}}$  — споживана потужність,  $P_{\text{кор}}$  — корисна потужність,  $P_{\text{вт}}$  — втрати різних видів.

Зменшення цих втрат є одним із головних напрямків енергозбереження в компресорних станціях.

Тенденції розвитку компресорних технологій

Сучасні тенденції розвитку компресорних систем зосереджені на:

- підвищенні енергоефективності шляхом впровадження частотно-регульованих електроприводів (ЧРП);
- інтелектуалізації керування — впровадження ПЛК, SCADA, IoT-систем;
- оптимізації конструкцій з використанням нових матеріалів та зменшенням маси ротора;
- зниженні шуму та вібрацій;
- застосуванні рекупераційних систем для повторного використання тепла стиснення;
- розвитку модульних компресорних станцій з дистанційним моніторингом;
- переході на цифрове проектування (інжинірингні цифрові двійники, CAD/CAE-моделі компресорів).

Економічна доцільність використання стисненого повітря

Вартість 1 м<sup>3</sup> стисненого повітря на підприємстві може становити 0,02–0,05 кВт·год електроенергії. Це означає, що неефективна робота компресора прямо впливає на собівартість продукції.

Для підприємства, яке споживає 10 000 м<sup>3</sup> повітря на годину, перевтрата енергії на 10 % призводить до щорічних втрат у сотні тисяч кВт·год.

Інжиніринг компресорних систем передбачає не лише технічне проектування, а й оптимізацію експлуатаційних витрат, енергетичного балансу та надійності.

Класифікація компресорів

Класифікація компресорів ґрунтується на фізичному принципі стиску, конструктивних особливостях, робочих параметрах і сферах застосування. Правильне розуміння типів компресорів дозволяє обґрунтовано здійснювати вибір обладнання для конкретного технологічного процесу.



Рисунок 8.1 – Загальна класифікація компресорів за принципом дії

### Загальні принципи класифікації

Компресори можна класифікувати за такими основними ознаками:

1. За принципом дії:
  - *об'ємні* (поршневі, гвинтові, пластинчасті, мембранні);
  - *динамічні* (відцентрові, осьові, діагональні).
2. За кількістю ступенів стиску:
  - одноступеневі;
  - двоступеневі;
  - багатоступеневі (3–6 ступенів).
3. За способом охолодження:
  - повітряного охолодження;
  - водяного охолодження;
  - комбіновані системи.
4. За режимом роботи:
  - постійного навантаження (безперервні);
  - змінного навантаження (регульовані);
  - резервні (автоматичний пуск при аварії).
5. За типом приводу:
  - з електричним приводом (найпоширеніші у промисловості);
  - з турбоприводом (газові або парові турбіни);
  - із приводом від двигунів внутрішнього згоряння.
6. За тиском нагнітання:
  - низького тиску:  $p_2 \leq 1,5$  МПа,

- середнього тиску:  $1,5 < p_2 \leq 10$  МПа,
- високого тиску:  $p_2 > 10$  МПа.

7. За подачею:

- малі (до  $10 \text{ м}^3/\text{хв}$ ),
- середні ( $10\text{--}100 \text{ м}^3/\text{хв}$ ),
- великі (понад  $100 \text{ м}^3/\text{хв}$ ).

Об'ємні компресори

Об'ємні компресори стискають газ шляхом зменшення об'єму робочої камери. При цьому газова маса, захоплена у визначений об'єм, витісняється після стиску при підвищеному тиску.

Основна рівність енергетичного балансу для об'ємних машин:

$$p_1 V_1 = p_2 V_2,$$

а робота стиску визначається виразом:

$$A = \int_{V_1}^{V_2} p \, dV.$$

До об'ємних компресорів належать:

- поршневі (одноступеневі або багатоступеневі);
- гвинтові (роторні з парою гвинтів);
- пластинчасті (роторні з висувними лопатками);
- мембранні (з гнучкою перегородкою для герметичних середовищ).

Переваги об'ємних компресорів:

- високий тиск стиску (до  $40\text{--}50$  МПа);
- незалежність продуктивності від тиску нагнітання;
- надійність при важких умовах експлуатації.

Недоліки:

- наявність пульсацій потоку;
- складність балансування;
- більші вібрації та шум;
- необхідність змащення рухомих частин.

Динамічні компресори

Динамічні компресори (турбокомпресори) стискають газ завдяки передачі кінетичної енергії від робочих лопатей до потоку, який потім гальмується в дифузорі, перетворюючи кінетичну енергію на потенційну.

Основне рівняння потоку у відцентровому компресорі:

$$\Delta h = u_2 c_{u2} - u_1 c_{u1},$$

де  $u$  — окружна швидкість лопаток,  
 $c_u$  — проекція швидкості газу на напрямок обертання.

Це рівняння, відоме як рівняння Ейлера для турбомашин, визначає приріст ентальпії потоку.

Типи динамічних компресорів:

- *відцентрові* — з потоком, що рухається від центра до периферії;
- *осьові* — потік рухається паралельно осі обертання;
- *діагональні* (радіально-осьові) — комбінований напрям потоку.

Переваги:

- висока продуктивність;
- сталість подачі;
- відсутність пульсацій;
- мала маса при великій потужності.

Недоліки:

- ефективність різко знижується при зменшенні навантаження;
- складність конструкції;
- чутливість до забруднення повітря.

Таблиця 8.2 – Порівняльна характеристика компресорів за принципом дії

Параметр	Об'ємні	Динамічні
Принцип дії	Зменшення об'єму робочої камери	Перетворення кінетичної енергії на тиск
Робочий тиск	Високий (до 50 МПа)	Низький – середній (до 2 МПа)
Продуктивність	Обмежена	Дуже висока
Пульсації потоку	Є	Відсутні
Регулювання продуктивності	Просте (через об'єм)	Складніше (лопати, байпас, ПЧ)
Знос деталей	Вищий	Менший
Вібрації	Значні	Незначні
Сфера застосування	Металургія, гідравліка, гірництво	Турбокомпресори, вентиляція, енергетика

Класифікація за кількістю ступенів стиску

З метою підвищення енергоефективності застосовують багатоступеневі компресори, у яких стискання відбувається послідовно в кількох циліндрах або колесах, а між ступенями повітря охолоджується в проміжних холодильниках.

Робота стиску у багатоступеновому компресорі визначається як сума робіт окремих ступенів:

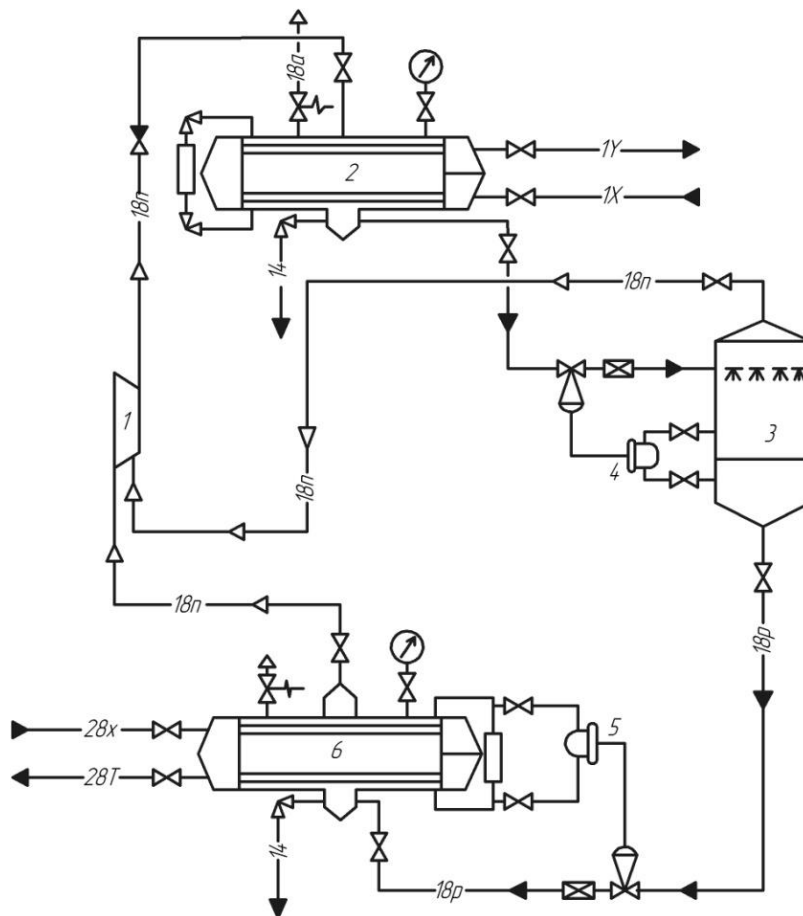
$$A_{\Sigma} = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{n_i - 1} p_{2i} V_{2i} - \left( \frac{p_{1i}}{p_{2i}} \right)^{\frac{n_i - 1}{n_i}}$$

Оптимальний тиск після кожного ступеня стиску повинен забезпечувати рівномірність навантаження між ступенями:

$$p_{2i} = p_1 \left( \frac{p_k}{p_1} \right)^{\frac{i}{k}},$$

де  $p_k$  — кінцевий тиск після останнього ступеня,  $k$  — кількість ступенів.

Це дозволяє зменшити енергоспоживання на 10–15 % у порівнянні з одноступеневим стисненням.



1 – віддільник рідини; 2 – компресор ступеня низького тиску; 3, 9 – маслороздільники; 4 – проміжна ємкість; 5 – компресор ступеня високого тиску; 6, 7 – колектори; 8 – рідинна лінія.

Рисунок 8.2 – Схема двоступеневого поршневого компресора з проміжним охолодженням

#### Класифікація за способом охолодження

Під час стиску газу його температура може підвищуватися до 150–250 °С, тому необхідне охолодження:

- повітряне охолодження — використовується у малих компресорах, зазвичай примусове вентилятором;
- водяне охолодження — ефективне для великих агрегатів, забезпечує стабільність температури;

- комбіноване охолодження — одночасне використання водяного та повітряного охолодження для різних вузлів.

Температура на виході компресора при поліотропному стиску розраховується за формулою:

$$T_2 = T_1 \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}},$$

де  $T_1, T_2$  — температури на вході та виході відповідно.

Класифікація за видом газу

Окрім повітря, компресори використовуються для стискання різних газів:

- азоту ( $N_2$ ) — для інертного середовища у металургії;
- кисню ( $O_2$ ) — для продувки конверторів;
- водню ( $H_2$ ) — у хімічних процесах;
- природного газу ( $CH_4$ ) — у транспортних і компресорних станціях;
- холодильних агентів (фреонів, аміаку).

Для агресивних або вибухонебезпечних газів застосовують герметичні мембранні або безмасляні компресори, що забезпечують ізоляцію робочого середовища.

Газ 	Типи компресорів	Приклади застосування	Ключові вимоги
Повітря	Поршневі, гвинтові	Будівництво, автосервіс, виробництво.	Висока продуктивність, надійність, доступність.
Азот	Безмасляні поршневі, бустери	Електроніка, фармацевтика, харчова промисловість.	Чистота газу, високий тиск.
Кисень	Медичні, бустерні	Медичні установи, аерація.	Висока чистота, безпека, надійність.
Природний газ	Поршневі, центробіжні	Газокомпресорні станції, паливні системи.	Стійкість до вибухів, високий тиск.
Хімічні гази	Спеціалізовані безмасляні, поршневі	Хімічна промисловість, виробництво полімерів.	Хімічна стійкість, запобігання забрудненню.

Рисунок 8.3 – Галузеві типи компресорів для різних робочих газів.

Узагальнення класифікації

Таким чином, компресори можна представити у вигляді багаторівневої системи класифікації:

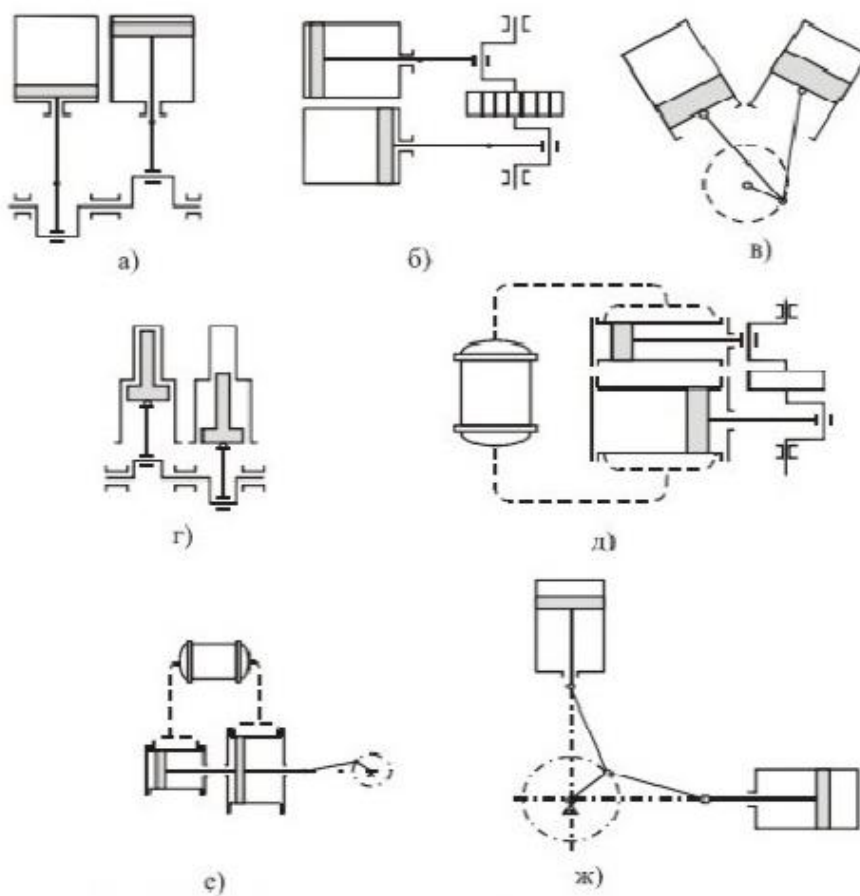
Компресори =  $\begin{cases} \text{Об'ємні} \rightarrow \text{Поршневі, Гвинтові, Пластинчасті, Мембранні} \\ \text{Динамічні} \rightarrow \text{Відцентрові, Осьові, Діагональні} \end{cases}$

Кожен тип має свою область оптимального застосування, визначену технологічними параметрами процесу, вимогами до тиску, подачі та стабільності.

Для металургійних і гірничих підприємств найбільш характерними є поршневі, гвинтові та відцентрові компресори, які забезпечують широкий діапазон тисків і надійну роботу в складних промислових умовах.

#### Будова та принцип дії поршневих компресорів

Поршневі компресори є найстарішими і водночас одними з найнадійніших типів об'ємних машин. Їх застосовують у гірничій, металургійній, хімічній, нафто- і газопереробній промисловості для отримання високих тисків (до 40–50 МПа) при відносно невеликих подачах.



а – одноступеневий компресор подвійної дії з вертикальним розташуванням циліндрів; б – одноступеневий компресор подвійної дії з горизонтальним розташуванням циліндрів; в – компресор простої дії з V-образним розташуванням циліндрів; г – компресор з диференціальними поршнями; д – двоступеневий компресор з паралельним розташуванням циліндрів (компаунд); е – двоступеневий компресор з послідовним розташуванням циліндрів (тандем); ж – кутовий

Рисунок 8.4 – Типові схеми розташування циліндрів поршневого компресора

## Принцип дії

Поршневий компресор працює на основі зворотно-поступального руху поршня у циліндрі, який періодично змінює об'єм робочої камери.

У процесі одного оберту колінчастого вала відбувається два основні такти:

1. Всмоктування: поршень рухається вниз, створюючи розрідження; відкривається всмоктувальний клапан, і повітря надходить у циліндр.
2. Стискання та нагнітання: поршень рухається вгору, тиск зростає, всмоктувальний клапан закривається, відкривається нагнітальний — стиснене повітря подається в ресивер.

Цикл повторюється з частотою, що визначається обертами вала компресора.

## Конструктивна схема

Основні елементи поршневого компресора:

- Циліндр — робоча камера стиску, виготовляється з високолегованого чавуну або сталі;
- Поршень — забезпечує зворотно-поступальний рух, ущільнений компресійними кільцями;
- Клапанна система — автоматично відкриває та закриває всмоктувальні й нагнітальні отвори;
- Шатунно-кривошипний механізм — перетворює обертальний рух вала на поступальний рух поршня;
- Змащувальна система — зменшує тертя й знос деталей;
- Охолоджувальна система — запобігає перегріванню;
- Електропривід — найчастіше асинхронний двигун.

## Термодинамічний цикл поршневого компресора

Процес стискання у циліндрі можна подати у вигляді діаграми  $p$ – $V$ , яка складається з чотирьох характерних ділянок:

1.  $a$ – $b$  – всмоктування при тиску  $p_1$  ;
2.  $b$ – $c$  – поліотропне стискання  $pV^n = \text{const}$  ;
3.  $c$ – $d$  – нагнітання при тиску  $p_2$  ;
4.  $d$ – $a$  – розширення залишкового газу у зазорі (впливає на втрати).

Робота одного циклу визначається як площа, обмежена кривою циклу:

$$A_{\text{цикл}} = \int_{V_1}^{V_2} p, dV = \frac{n}{n-1} p_2 V_2 - \left( \frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{n-1}{n}}$$

При переході до багатоступеневого стиску загальна робота зменшується, оскільки кожен ступінь має менший перепад тиску, а охолодження між ступенями наближає процес до ізотермічного.

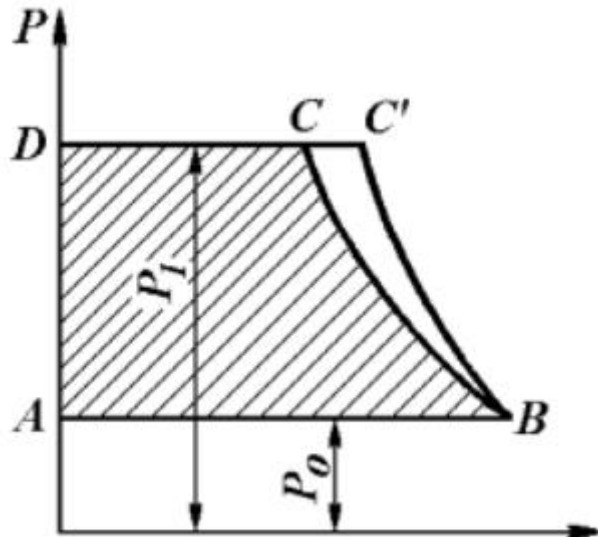


Рисунок 8.5 – p–V діаграма одноступеневого поршневого компресора

#### Втрати та коефіцієнт подачі

У реальних компресорах фактична подача менша за теоретичну через:

- наявність шкідливого простору (зазору між поршнем і головкою циліндра);
- нагнітальні опори клапанів;
- нагромадження газу, що не встигає вийти;
- витіки через ущільнення.

Визначається коефіцієнт подачі:

$$\lambda = \frac{Q_{\text{факт}}}{Q_{\text{теор}}} = 1 - \frac{V_3}{V_{\text{ц}}} \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1}{n}} - 1,$$

де  $V_3$  — об'єм шкідливого простору,  $V_{\text{ц}}$  — робочий об'єм циліндра.  
Типові значення  $\lambda = 0,75-0,9$ .

#### Потужність поршневого компресора

Потужність, необхідна для стискання газу:

$$N = \frac{n}{n-1} \cdot p_2 Q \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1,$$

де

$Q$  — подача, м<sup>3</sup>/с;

$p_1, p_2$  — тиск на вході та виході;

$n$  — показник політропи.

Для реального компресора враховують ККД:

$$N_{\text{дв}} = \frac{N}{\eta_{\text{заг}}}$$

Вибір кількості ступенів стиску

Під час стискання до високих тисків вигідно застосовувати дво- або триступеневі компресори.

Енергетичний вигаш пояснюється тим, що частина теплоти відводиться між ступенями, знижуючи температуру газу перед наступним стиском.

Оптимальний розподіл тиску між ступенями визначається умовою рівності робіт стиску:

$$p_{2i} = p_1 \left( \frac{p_k}{p_1} \right)^{\frac{i}{k}},$$

де  $p_k$  — кінцевий тиск,  $k$  — кількість ступенів.

При такому розподілі робота мінімальна, а температура після кожного ступеня практично однакова.

Охолодження поршневих компресорів

Охолодження здійснюється для:

- зниження температури циліндрів і поршнів;
- запобігання розкладу мастила;
- покращення умов змащення;
- підвищення ККД.

Використовують:

- водяне охолодження сорочок циліндрів;
- повітряне охолодження ребристих поверхонь;
- проміжні холодильники у багатоступеневих схемах.

Температура після ступеня охолодження визначається як:

$$T'_2 = T_1 + (T_2 - T_1) \eta_{\text{охл}},$$

де  $\eta_{\text{охл}}$  — ефективність охолодження (0,7–0,9).

Змащування і мастильні матеріали

Змащення необхідне для зниження тертя і герметизації ущільнень.

Використовуються системи:

- краплинного змащення — для малопотужних компресорів;
- циркуляційного змащення — для великих агрегатів.

Вибір мастила здійснюється за:

- в'язкістю (оптимальна при 40–60 °С);
- хімічною стабільністю;
- низькою схильністю до коксоутворення.

Для безмасляних компресорів застосовують композитні ущільнення або графітові кільця.

Особливості багатоступневих поршневих компресорів

У дво- та триступневих схемах кожен ступінь складається з окремого циліндра, поршня та клапанів. Після кожного стиску газ надходить у проміжний охолоджувач, потім у наступний ступінь.

Робота всіх ступенів визначається сумою:

$$A_{\Sigma} = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{n_i - 1} p_{2i} V_{2i} - \left( \frac{p_{1i}}{p_{2i}} \right)^{\frac{n_i-1}{n_i}}$$

Багатоступеневі компресори забезпечують:

- зниження енергоспоживання;
- підвищення надійності;
- зменшення температури деталей;
- можливість роботи з різними газами.

Характеристики поршневих компресорів

Основні характеристики роботи:

- Залежність подачі від частоти обертання:
- 

$$Q = Q_0 \frac{n}{n_0},$$

де  $Q_0, n_0$  — номінальні значення.

- Залежність потужності від тиску:

$$N = N_0 \left( \frac{p_2}{p_{2,0}} \right)^{\frac{n-1}{n}}.$$

- ККД у функції ступеня стиску:

$$\eta = \eta_0 - k_{\eta} \ln \frac{p_2}{p_1}.$$

Таблиця 8.3 - Приклади параметрів для типових промислових поршневих компресорів

Модель	Кількість ступенів	Тиск, МПа	Подача, м <sup>3</sup> /хв	Потужність, кВт	ККД, %
2ВМ4-20/8	2	0,8	20	160	68
ВП-10/15	3	1,5	10	90	70
4ВМ10-25/9	4	2,5	9	250	73

Динамічні навантаження

Унаслідок зворотно-поступального руху поршня виникають інерційні сили, які впливають на балансування та вібрацію.

Рівняння руху поршня:

$$x = r(1 - \cos \varphi) + \frac{r^2}{2l}(1 - \cos 2\varphi),$$

де  $r$  — радіус кривошипа,  $l$  — довжина шатуна,  $\varphi$  — кут повороту колінчастого вала.

Сила інерції поршня:

$$F_i = m\omega^2 r \left( \cos \varphi + \frac{r}{l} \cos 2\varphi \right).$$

Для зменшення вібрацій застосовують противаги, демпфери та гнучкі муфти.

Переваги та недоліки поршневих компресорів

Переваги:

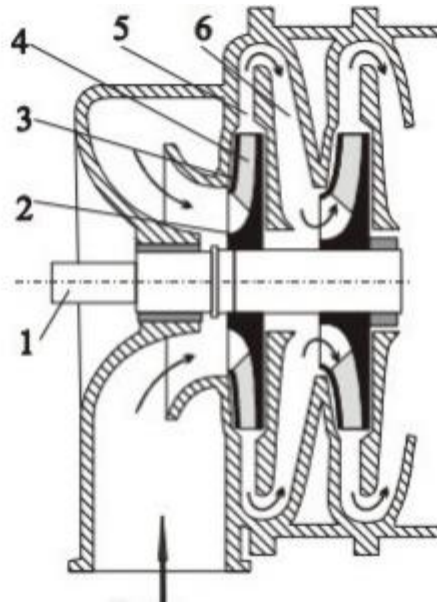
- широкий діапазон тисків;
- висока ефективність при малих подачах;
- простота технічного обслуговування;
- можливість стискання різних газів.

Недоліки:

- пульсації тиску;
- високий рівень шуму й вібрацій;
- складність балансування;
- потреба в частому обслуговуванні клапанів і ущільнень.

Відцентрові компресори: конструкція, принцип роботи, характеристики

Відцентрові компресори належать до класу динамічних компресорів і працюють за принципом перетворення кінетичної енергії обертального руху робочого колеса у потенційну енергію тиску газу. Вони широко застосовуються в системах стисненого повітря великих промислових підприємств, газоперекачувальних станціях, енергетиці та вентиляційних установках металургійних цехів.



1- насаджені робочі колеса, 2 і 3 – диски, 4- робочі лопатки, 5 – дифузорі, 6- зворотний напрямний апарат

Рисунок 8.6 – Схема відцентрового компресора з дифуззором і спіральним корпусом

#### Принцип роботи відцентрового компресора

Газ надходить у центр робочого колеса через вхідний направляючий апарат. Під дією відцентрової сили, створеної обертанням колеса, газ рухається від центра до периферії, набуваючи високої швидкості. У дифуззорі швидкість потоку зменшується, а кінетична енергія перетворюється на потенційну — відбувається підвищення тиску.

Основне рівняння Ейлера для турбомашин описує приріст ентальпії потоку:

$$\Delta h = u_2 c_{u2} - u_1 c_{u1},$$

де

$u_1, u_2$  — окружні швидкості лопаток на вході та виході;

$c_{u1}, c_{u2}$  — коллові складові абсолютної швидкості потоку газу.

З урахуванням втрат реальний приріст тиску становить:

$$\Delta p = \rho \eta_{ад} (u_2 c_{u2} - u_1 c_{u1}),$$

де  $\eta_{ад}$  — адіабатичний ККД, який для промислових компресорів сягає 0,8–0,85.

#### Конструкція відцентрового компресора

Основні елементи конструкції:

1. Робоче колесо – головний елемент, що передає енергію газу. Має 12–24 вигнутих лопаток, виготовлених з жароміцних сталей.
2. Направляючий апарат (НА) – регулює напрямок потоку перед входом у колесо.
3. Дифузор – канал, у якому потік сповільнюється, а тиск підвищується.

4. Спіральний корпус – збирає потік після дифузора та направляє до нагнітального патрубку.
5. Підшипниковий вузол – забезпечує підтримку ротора і балансування.
6. Система ущільнень – запобігає витоку газу.
7. Привідний електродвигун – передає момент обертання через муфту.

Ротор відцентрового компресора обертається з великою швидкістю —  $n = 3000\text{--}20000$  об/хв, що вимагає високої точності балансування.

Для потужних установок використовують багатоступеневі компресори (до 10 ступенів), де повітря стискується послідовно у кількох колесах, розташованих на одному валу.

Енергетичний аналіз процесу стиску

Розглянемо процес стиску повітря у відцентровому компресорі.

Приріст повної енергії потоку визначається як:

$$\Delta h_t = \frac{(c_2^2 - c_1^2)}{2} + (h_2 - h_1),$$

де

$c_1, c_2$  — абсолютні швидкості на вході та виході з колеса.

Для адіабатичного процесу стиску:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k\eta_{ад}}},$$

а робота, необхідна для стиску одиниці маси газу:

$$A = c_p T_1 \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k\eta_{ад}}} - 1$$

Типові значення параметрів для повітряного компресора:

- $T_1 = 293$  К,
- $p_1 = 0,1$  МПа,
- $p_2 = 0,6$  МПа,
- $k = 1,4$ ,
- $\eta_{ад} = 0,82$ .

Підставивши у формулу, отримаємо  $A \approx 93$  кДж/кг.

Характеристики відцентрового компресора

Характеристика компресора — це залежність подачі ( $Q$ ), тиску ( $p_2$ ), споживаної потужності ( $N$ ) і ККД від частоти обертання ( $n$ ).

1. Характеристика подачі (Q–p):
  - зі зростанням тиску подача зменшується;
  - при певному зниженні подачі настає зона нестійкої роботи (помпаж).
2. Характеристика потужності (N–p):
  - потужність зростає зі збільшенням тиску до певного максимуму;
  - після зниження подачі — різке падіння потужності.
3. ККД компресора:
  - має максимум у зоні номінальної подачі (0,8–1,0 від  $Q_{\text{ном}}$ );
  - при відхиленні від цієї зони ефективність знижується.

Помпаж і стійкість роботи

Помпаж — це періодичне зворотно-поступальне переміщення потоку повітря в компресорі при зниженні подачі нижче критичного значення.

Причиною є зрив потоку на лопатках, що викликає різке падіння тиску й коливання витрати.

Умова настання помпажу визначається співвідношенням:

$$\frac{\partial p_2}{\partial Q} = 0.$$

Для запобігання помпажу застосовують:

- перепускні (байпасні) клапани;
- направляючі апарати змінного кута;
- автоматичне регулювання частоти обертання двигуна (ЧРП);
- антипомпажні системи, що відводять надлишкове повітря в обхід.

Закони подібності для відцентрових компресорів

Закони подібності дозволяють визначати робочі параметри компресорів при зміні швидкості обертання або діаметра колеса:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1 D_1^3}{n_2 D_2^3},$$

$$\frac{p_{2,1}}{p_{2,2}} = \left( \frac{n_1 D_1}{n_2 D_2} \right)^2,$$

$$\frac{N_1}{N_2} = \left( \frac{n_1 D_1}{n_2 D_2} \right)^3.$$

Ці залежності дають змогу масштабувати результати експериментів на моделі до реальної машини.

## Енергетичні втрати у відцентровому компресорі

Втрати енергії поділяються на:

1. гідродинамічні втрати – тертя та турбулентність у каналах;
2. аеродинамічні втрати – зриви потоку на лопатках;
3. механічні втрати – тертя в підшипниках, ущільненнях, муфтах;
4. втрати у приводі – електричні втрати двигуна.

Сумарний ККД:

$$\eta_{\text{заг}} = \eta_{\text{гідр}} \cdot \eta_{\text{аер}} \cdot \eta_{\text{мех}} \cdot \eta_{\text{ел}},$$

де для сучасних агрегатів

$$\eta_{\text{заг}} = 0,75-0,85.$$

### Приклад розрахунку параметрів

Нехай необхідно визначити потужність, потрібну для відцентрового компресора, що подає повітря з параметрами:

- $Q = 10 \text{ м}^3/\text{с}$ ,
- $p_1 = 0,1 \text{ МПа}$ ,
- $p_2 = 0,6 \text{ МПа}$ ,
- $\eta_{\text{ад}} = 0,82$ ,
- $\eta_{\text{мех}} = 0,95$ .

Потужність стиску:

$$N = \frac{k}{k-1} \frac{p_1 Q}{\eta_{\text{ад}}} \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1$$

Підставивши (  $k = 1,4$  ), отримаємо:

$$N = \frac{1,4}{0,4} \cdot \frac{0,1 \times 10^5 \times 10}{0,82} [(6)^{0,286} - 1] = 650 \text{ кВт (приблизно)}.$$

Таблиця 8.4 – Типові параметри промислових відцентрових компресорів

Тип компресора	Кількість ступенів	Подача, м <sup>3</sup> /хв	Тиск, МПа	Потужність, кВт	ККД, %
ВК-3-11	3	300	0,7	450	80
ВК-5-16	5	500	1,0	900	82
ВК-8-20	8	1000	1,5	1800	84

### Переваги та обмеження

Переваги:

- висока продуктивність при малих габаритах;
- плавна подача без пульсацій;
- низький рівень шуму;
- тривалий ресурс підшипників;

- мінімальна потреба в обслуговуванні.

Недоліки:

- обмеження за тиском (до 2 МПа);
- складність регулювання подачі;
- чутливість до забруднення повітря;
- висока вартість ремонту.

Галузі застосування

Відцентрові компресори використовуються у:

- системах технологічного повітропостачання металургійних цехів;
- установках охолодження повітря для доменних печей;
- компресорних станціях для пневмотранспорту;
- системах вентиляції шахт;
- енергетичних турбінних установках.

Гвинтові компресори та їх експлуатаційні переваги

Гвинтові компресори належать до групи об'ємних роторних машин і забезпечують безперервне стискання повітря без пульсацій потоку. Їх конструкція відзначається простотою, компактністю та високою надійністю, що робить їх незамінними у сучасних промислових системах стисненого повітря.

Принцип роботи гвинтового компресора

Основа компресора складають два взаємно зчеплені ротори — ведучий і ведений, профіль яких утворює замкнені об'єми. При обертанні роторів повітря засмоктується у міжлопатеві порожнини, переміщується уздовж осі компресора, а об'єм камери поступово зменшується — газ стискається.

Процес стиску проходить у три фази:

1. Всмоктування — повітря надходить через всмоктувальний отвір при обертанні ротора.
2. Стискання — об'єм порожнини між роторами і корпусом зменшується, тиск газу зростає.
3. Нагнітання — після досягнення необхідного тиску відкривається випускний отвір, і стиснене повітря надходить у систему.

Математичний опис процесу стиску

У гвинтовому компресорі процес наближається до поліотропного стиску, який можна описати залежністю:

$$pV^n = \text{const},$$

де  $n = 1,15-1,25$  — показник поліотропи (залежно від ступеня охолодження).

Робота, витрачена на стискання одиниці маси повітря:

$$A = \frac{n}{n-1} RT_1 \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1,$$

де

$R$  — газова стала,

$T_1$  — температура на вході,

$p_1, p_2$  — тиск на вході та виході.

При  $T_1 = 293$  К,  $p_1 = 0,1$  МПа,  $p_2 = 0,8$  МПа,  $R = 1,2$ :

$$A \approx 80 \text{ кДж/кг.}$$

Конструкція гвинтового компресора

Основні складові частини:

- Корпус — литий з алюмінієвих або чавунних сплавів, містить робочу порожнину;
- Ведучий ротор — має 4–6 виступів;
- Ведений ротор — має на один-два виступи більше, обертається синхронно через шестерні або безконтактно;
- Підшипники — сприймають осьові й радіальні зусилля;
- Система ущільнень — запобігає витoku повітря та мастила;
- Масляна система — змащує й охолоджує ротори, ущільнює зазори;
- Фільтри та осушувачі — очищують повітря від домішок і вологи.

Типи гвинтових компресорів

1. Маслозаповнені — у робочий простір подається мастило, яке:
  - ущільнює зазори;
  - охолоджує газ;
  - змащує деталі.
  - Після нагнітання повітря проходить через сепаратор, який відділяє мастило.
2. Безмасляні — ротори не контактують, зазори мінімальні (0,05–0,1 мм), синхронізація здійснюється через зубчасту передачу. Застосовуються в електроніці, фармацевтиці, харчовій промисловості.

Енергетичний розрахунок гвинтового компресора

Потужність, необхідна для стискання:

$$N = \frac{p_2 Q}{\eta_{\text{заг}}} \cdot \frac{n}{n-1} - \left( \frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{n-1}{n}},$$

де  $\eta_{\text{заг}} = \eta_{\text{мех}} \cdot \eta_{\text{об'єм}} \cdot \eta_{\text{ел}}$ .

Типові значення:

- $\eta_{\text{мех}} = 0,95$ ,
- $\eta_{\text{об'єм}} = 0,9$ ,
- $\eta_{\text{ел}} = 0,9$ ,
- що дає  $\eta_{\text{заг}} \approx 0,77$ .

Коефіцієнт об'ємної ефективності

Подача реального компресора менша за теоретичну через втрати на витоки, нагрів і зворотні потоки повітря. Об'ємна ефективність:

$$\eta_V = \frac{Q_{\text{факт}}}{Q_{\text{теор}}} = 1 - C_{\text{вт}} - C_{\text{звор}},$$

де

$C_{\text{вт}}$  — частка втрат через зазори (0,03–0,05),

$C_{\text{звор}}$  — частка втрат при витісненні (0,02–0,04).

У сучасних гвинтових компресорах ( $\eta_V = 0,9-0,95$ ).

Системи охолодження

Під час роботи температура газу може сягати 180–200 °С, тому застосовують:

- Масляне охолодження — мастило відводить тепло від роторів і корпусу;
- Водяне охолодження — використовується у потужних промислових компресорах;
- Повітряне охолодження — для малопотужних агрегатів.

Температура на виході визначається:

$$T_2 = T_1 \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}}.$$

При  $n = 1,2$  і  $p_2/p_1 = 8$  температура зростає в 1,5–1,7 рази, тому ефективно охолодження критично важливе.

Особливості роботи з частотним регулюванням

Гвинтові компресори добре сумісні з частотно-регульованими електроприводами (ЧРП). Залежність споживаної потужності від частоти обертання ротора визначається кубічним законом:

$$P \propto n^3.$$

Отже, при зниженні швидкості обертання на 20 % споживана потужність зменшується майже на 50 %. Це забезпечує значну економію енергії при змінному навантаженні.

## Віброакустичні та експлуатаційні властивості

Через відсутність клапанів і поршнів гвинтові компресори мають низький рівень вібрацій і шуму (до 70 дБ), що дозволяє встановлювати їх без спеціальних фундаментів.

Вони працюють без пульсацій тиску, а завдяки відсутності інерційних мас — без значних коливань моменту на валу.

Таблиця 8.5 – Типові параметри гвинтових компресорів

Модель	Тиск, МПа	Подача, м <sup>3</sup> /хв	Потужність, кВт	Тип охолодження	ККД, %
Atlas Copco GA30	0,8	5,5	30	повітряне	83
Kaeser SK 22	1,0	4,0	22	повітряне	82
Ingersoll-Rand R90	1,0	15,0	90	водяне	85
ALUP Largo 45	1,0	8,0	45	масляне	84

### Переваги гвинтових компресорів

- Безперервна подача повітря без пульсацій;
- Висока енергоефективність  $\eta_{\text{зар}} \approx 0,8$ ;
- Компактність і низький рівень шуму;
- Простота монтажу й обслуговування;
- Тривалий ресурс (до 60 000 годин роботи без капремонту);
- Можливість автоматизації та дистанційного керування;
- Висока стабільність параметрів при змінних навантаженнях.

### Недоліки гвинтових компресорів

- Вища вартість у порівнянні з поршневыми аналогами;
- Обмежений робочий тиск (до 1,5–2,0 МПа);
- Чутливість до чистоти повітря і мастила;
- Вимога до точного виготовлення профілю роторів і мінімальних зазорів;
- Необхідність регулярного обслуговування фільтрів і сепараторів.

### Галузі застосування

Гвинтові компресори використовуються у:

- металургії (пневмосистеми прокатних станів, доменних цехів, транспортерів);
- гірничих підприємствах (системи продувки і пилопригнічення);
- харчовій і фармацевтичній промисловості;
- електронному виробництві (безмасляні компресори);
- автоматизованих системах керування.

## Електро механічне забезпечення компресорних систем

Компресорна установка є типовим прикладом електро механічного комплексу, у якому механічна, електрична та пневматична частини тісно взаємопов'язані.

Ефективність роботи всієї системи значною мірою визначається правильним вибором електродвигуна, схем пуску, систем регулювання швидкості, а також засобів контролю, захисту та автоматизації.

### Основні функції електро механічної системи

Електро механічне забезпечення компресора виконує такі функції:

1. Передача електричної енергії до механічного вала компресора.
2. Забезпечення необхідного моменту і частоти обертання ротора.
3. Реалізація плавного пуску й зупинки для зниження динамічних навантажень.
4. Захист електродвигуна від перевантажень, коротких замикань і перегріву.
5. Можливість регулювання продуктивності компресора шляхом зміни швидкості обертання.
6. Забезпечення автоматизованого керування та діагностики стану.

Таблиця 8.6 – Типи електродвигунів, застосовуваних у компресорних системах

Тип двигуна	Потужність, кВт	Переваги	Недоліки	Застосування
Асинхронний з короткозамкненим ротором	2–400	Простота, надійність, низька вартість	Великі пускові струми	Гвинтові, поршневі компресори
Асинхронний з фазним ротором	100–2000	Високий пусковий момент, регулювання опором	Високі втрати, складність обслуговування	Відцентрові компресори великої потужності
Синхронний з контактним збудженням	500–5000	Високий ККД, корекція $\cos\phi$	Складність збудження	Великі промислові компресорні станції
Синхронний з постійними магнітами	до 500	Висока ефективність, малий момент інерції	Висока ціна	Енергоощадні системи з ЧРП

### Вибір потужності електродвигуна

Потужність електродвигуна повинна забезпечувати необхідну механічну роботу стискання повітря з урахуванням усіх втрат.

Загальна формула визначення потужності:

$$P_{\text{дв}} = \frac{p_2 Q}{\eta_{\text{заг}}} \cdot \frac{n}{n-1} - \left( \frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{n-1}{n}},$$

де

$$\eta_{\text{заг}} = \eta_{\text{ел}} \cdot \eta_{\text{мех}} \cdot \eta_{\text{комп}}.$$

Для промислових компресорів типові значення:

- $\eta_{\text{ел}} = 0,92,$
- $\eta_{\text{мех}} = 0,95,$
- $\eta_{\text{комп}} = 0,75-0,85.$

Зазвичай потужність двигуна обирають із запасом 10–20 % від розрахункової для компенсації пускових перевантажень.

#### 8.6.4. Розрахунок моменту на валу

Необхідний момент обертання на валу двигуна:

$$M = \frac{P_{\text{дв}}}{\omega},$$

де

$P_{\text{дв}}$  — потужність у Вт,

$\omega$  — швидкість обертання, об/хв.

Наприклад, при  $P_{\text{дв}} = 90$  кВт і  $n_{\text{об}} = 1500$  об/хв момент дорівнює  $M = 572$  Н·м.

#### Особливості пуску електродвигунів компресорів

Під час пуску компресора виникають значні інерційні й пневматичні навантаження, що можуть призвести до перевищення струму та механічних перевантажень.

Пусковий струм асинхронного двигуна:

$$I_{\text{п}} = k_{\text{п}} I_{\text{н}}, \quad \text{де } k_{\text{п}} = 5-7.$$

Для його обмеження застосовують:

1. Автотрансформаторний пуск – зниження напруги на обмотках під час пуску.
2. Схему “зірка–трикутник” – для двигунів із шістьма виводами.
3. Пускові реостати – для двигунів із фазним ротором.
4. Плавний пуск (Soft Starter) – електронне обмеження пускового струму.
5. Пуск через частотний перетворювач (ЧРП) – найсучасніше рішення, що забезпечує мінімальний струмовий удар.

#### Частотне регулювання швидкості

Регулювання швидкості обертання електродвигуна за допомогою частотних перетворювачів (ПЧ) дозволяє оптимізувати роботу компресора відповідно до потреб у повітрі.

Залежності:

$$Q \propto n, \quad p \propto n^2, \quad P \propto n^3.$$

Таким чином, навіть незначне зниження частоти призводить до значної економії енергії.

Енергетичний ефект при регулюванні від 100 % до 80 % швидкості:

$$\frac{P_{80}}{P_{100}} = \left( \frac{n_{80}}{n_{100}} \right)^3 = (0,8)^3 = 0,512.$$

Отже, зменшення швидкості на 20 % дозволяє зекономити майже 50 % енергії.

Захист і автоматика електропривода

Система керування компресорної установки містить такі елементи захисту:

- Теплові реле – від перевантаження по струму;
- Автоматичні вимикачі – від короткого замикання;
- Контроль фаз – при обриві або зсуві фаз;
- Датчики температури – у підшипниках і обмотках;
- Датчики тиску і рівня мастила – для запобігання аваріям;
- Аварійні вимикачі – для негайної зупинки установки.

Керування здійснюється через ПЛК (програмований логічний контролер), який контролює послідовність пуску, підтримує тиск у магістралі, регулює частоту обертання двигуна та забезпечує аварійні відключення.

Енергетичний баланс електромеханічної системи

Сумарна енергетична ефективність установки визначається:

$$\eta_{\text{сист}} = \eta_{\text{ел}} \cdot \eta_{\text{мех}} \cdot \eta_{\text{комп}}$$

Якщо  $\eta_{\text{ел}} = 0,93$ ,  $\eta_{\text{мех}} = 0,96$ ,  $\eta_{\text{комп}} = 0,8$ ,

то  $\eta_{\text{сист}} = 0,715$ .

Тобто лише близько 70 % спожитої електроенергії перетворюється на корисну роботу стиску, решта втрачається у вигляді тепла, тертя й турбулентності.

Саме тому впровадження частотного регулювання, рекуперації тепла та регулярного технічного обслуговування є основними заходами підвищення ефективності.

Автоматизовані системи керування компресорною станцією

Сучасні станції використовують інтелектуальні системи керування, що включають:

- ПЛК (Siemens, Schneider Electric, Omron) — координація пуску й зупинки агрегатів;
- HMI-панелі — індикація параметрів, графічний контроль;
- SCADA-систему — моніторинг і архівація даних;
- Датчики тиску, температури, струму, вібрації;
- Систему Master–Slave — автоматичне чергування компресорів для рівномірного зносу.

Вибір електропривода та системи керування

Вибір електропривода компресора є одним з ключових етапів проектування компресорної установки. Від нього залежать енергетична ефективність, стабільність тиску у пневмосистемі, динаміка пуску, рівень шуму та надійність експлуатації.

Оптимальне рішення досягається шляхом поєднання правильно підбраного електродвигуна, системи пуску та регулювання, а також логіки автоматизованого керування.

Критерії вибору електропривода

Основними критеріями вибору є:

1. Потужність – повинна відповідати механічному навантаженню компресора з урахуванням ККД і втрат.
2. Частота обертання – визначається типом компресора (для гвинтових — 3000–9000 об/хв, для відцентрових — до 20000 об/хв).
3. Пускові властивості – здатність забезпечити момент при пуску без перевищення допустимих струмів.
4. Регулювання продуктивності – можливість змінювати подачу без зупинки компресора.
5. Енергоефективність і cosφ – для зменшення споживання реактивної потужності.
6. Надійність і вартість обслуговування.

Варіанти електроприводів для компресорів

1. Асинхронний нерегульований привід
  - Простий, дешевий, але не дозволяє гнучко змінювати продуктивність.
  - Придатний для компресорів постійного навантаження.
2. Асинхронний регульований (з частотним перетворювачем)
  - Забезпечує плавне регулювання швидкості ( $n$ ) у межах 30–100 % номіналу.
  - Найпоширеніший варіант у сучасних компресорних системах.
3. Синхронний привід з постійними магнітами (PMSM)
  - Має найвищий ККД (до 95 %) і стабільну роботу при низьких швидкостях.
  - Використовується у високоефективних гвинтових компресорах.

#### 4. Привід постійного струму (DC-drive)

- Застосовується у старих системах або спеціальних установках.
- Має гарні пускові характеристики, але потребує постійного технічного догляду.

Таблиця 8.7 – Порівняння типів електроприводів компресорів

Тип	Регулювання	Діапазон швидкості	ККД, %	Надійність	Вартість
Асинхронний нерегульований	–	100 %	88–91	Висока	Низька
Асинхронний з ПЧ	Плавне	30–100 %	90–93	Висока	Середня
PMSM з ПЧ	Плавне	10–100 %	94–96	Висока	Висока
DC-drive	Плавне	10–100 %	85–88	Середня	Висока

#### Вибір системи керування

Система керування повинна забезпечувати:

- підтримання стабільного тиску у магістралі;
- автоматичний пуск і зупинку при зміні навантаження;
- захист двигуна та компресора від перевантажень;
- енергозбереження через оптимізацію частоти обертання;
- діагностику стану системи та передавання даних до SCADA.

Типові варіанти систем керування:

1. Релейно-контакторна схема — для простих установок.
2. Мікропроцесорна система — з ПЛК або вбудованим контролером.
3. Інтелектуальна система (Smart Control) — із частотним регулюванням, Master–Slave-режимом, віддаленим моніторингом.

#### Алгоритми регулювання продуктивності

Регулювання подачі повітря в компресорі може здійснюватися кількома методами:

1. Дроселювання (всмоктувальний клапан)
  - Просте, але неекономічне.
  - Потужність зменшується не пропорційно подачі.
2. Байпас (рециркуляція)
  - Частина стисненого повітря повертається на вхід.
  - Використовується як допоміжний антипомпажний режим.
3. Покрокове регулювання
  - Послідовне відключення циліндрів або ступенів стиску.
  - Ефективно для поршневих компресорів.
4. Частотне регулювання
  - Найефективніше з точки зору енергозбереження.
  - Подача змінюється пропорційно швидкості  $Q \propto n$ , а потужність —  $P \propto n^3$ .

## Алгоритм підтримання тиску у магістралі

Система керування підтримує робочий тиск ( $p$ ) у межах заданого діапазону ( $p_{\min}, p_{\max}$ ).

Принцип роботи можна подати у вигляді логічного алгоритму:

Якщо  $p < p_{\min} \Rightarrow$  увімкнути компресор;

Якщо  $p > p_{\max} \Rightarrow$  вимкнути або зменшити швидкість.

При використанні частотного регулювання тиск підтримується за законом пропорційного керування:

$$f = f_{\text{ном}} \cdot \frac{p_{\text{зад}}}{p_{\text{факт}}},$$

де  $f$  — частота вихідної напруги перетворювача.

Приклад побудови системи керування гвинтовим компресором  
Система містить:

- Електродвигун 90 кВт, 400 В, 1500 об/хв;
- Частотний перетворювач (Altivar 930 або Siemens G120);
- Датчики тиску, температури, струму;
- ПЛК (наприклад, Schneider M340 або Siemens S7-1200);
- НМІ-панель для індикації параметрів;
- Реле тиску для аварійного вимкнення.

Алгоритм роботи:

1. Після команди «Пуск» двигун розганяється плавно (5–10 с).
2. Контролер вимірює тиск у ресивері.
3. Якщо  $p < p_{\text{зад}}$ , збільшує частоту перетворювача.
4. При досягненні  $p_{\text{зад}}$  — стабілізує швидкість.
5. Якщо  $p > p_{\max}$  — зменшує частоту або зупиняє компресор.
6. Ведеться архівація параметрів і передача даних у SCADA.

Таблиця 8.8 – Порівняння режимів керування компресорами

Режим	Опис	Енергоефективність	Застосування
On/Off (вкл./викл.)	Компресор вмикається при падінні тиску і вимикається при перевищенні	Низька	Малі системи
Load/Unload (навантаження/холостий хід)	Робота при зниженому навантаженні з перепуском повітря	Середня	Поршневі компресори
Variable Speed Drive (VSD)	Зміна швидкості двигуна за частотою	Висока	Гвинтові компресори
Intelligent Sequencing	Координація кількох компресорів у станції	Дуже висока	Компресорні станції

Вибір частотного перетворювача

Вибір ПЧ здійснюється за:

- номінальною потужністю двигуна;
- типом навантаження (момент  $\propto n^2$ );
- способом охолодження (повітряне, рідинне);
- наявністю функцій PID-регулювання тиску;
- інтерфейсами обміну (Modbus, Profibus, Ethernet/IP).

Рекомендовані моделі:

- Schneider Electric Altivar Process ATV930;
- Siemens SINAMICS G120;
- Danfoss VLT 5000;
- ABB ACS880.

Переваги інтегрованих систем керування

- Зменшення енергоспоживання на 20–40 %;
- Автоматичне балансування навантаження між кількома агрегатами;
- Можливість віддаленого моніторингу через SCADA або IoT-платформи;
- Виявлення несправностей у режимі реального часу;
- М'який пуск/зупинка, що подовжує ресурс обладнання.

Робота компресорів у динамічних режимах

Компресорні установки у промислових умовах рідко працюють у сталому навантаженні.

У більшості випадків вони перебувають у динамічних режимах — під час пуску, зупинки, зміни подачі, регулювання тиску або перемикання між агрегатами компресорної станції.

Динамічні процеси визначають механічні, електричні та пневматичні характеристики системи, впливаючи на надійність, вібраційність і енергоефективність.

Загальні особливості динамічних режимів

До динамічних режимів належать:

1. Пуск компресора – переведення двигуна зі стану спокою в робочий режим.
2. Розгін і стабілізація швидкості – досягнення номінальної частоти обертання.
3. Зміна продуктивності – при регулюванні тиску або частоти.
4. Робота в режимі холостого ходу – без нагнітання повітря.
5. Гальмування та зупинка – кероване або аварійне.
6. Помпажні коливання – нестійкий режим для відцентрових компресорів.

Механічна модель компресора

Руховий момент компресора описується рівнянням динаміки:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_{\text{дв}} - M_{\text{н}},$$

де

$J$  — момент інерції всіх обертових частин,

$\omega$  — кутова швидкість,

$M_{\text{дв}}$  — електромагнітний момент двигуна,

$M_{\text{н}}$  — момент навантаження від компресора.

Величина  $M_{\text{н}}$  для об'ємних компресорів змінюється протягом циклу, а для гвинтових та відцентрових — практично постійна.

Момент навантаження компресора

Момент навантаження залежить від тиску в циліндрі або камері сти-ску та геометрії механізму.

Для поршневих компресорів:

$$M_{\text{н}} = \frac{p \cdot S \cdot r}{2 \cdot \pi \cdot \eta_{\text{мех}}} \sin \varphi,$$

де

$p$  — тиск у циліндрі,

$S$  — площа поршня,

$r$  — радіус кривошипа,

$\varphi$  — кут повороту вала.

Для гвинтового компресора:

$$M_{\text{н}} = M_0 \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1}{n}},$$

де  $M_0$  — момент при атмосферному тиску,  $n$  — показник поліот-ропи.

Цей момент має плавний характер, що забезпечує стабільну роботу двигуна без значних пульсацій.

Електромеханічний перехідний процес

Під час пуску асинхронного двигуна відбувається перехід від нуля до номінальної частоти.

Диференціальне рівняння енергетичного балансу:

$$J \frac{d\omega}{dt} = \frac{3}{\omega_s} \frac{E_2^2 R_2 / s}{(R_2 / s)^2 + X_2^2} - M_{\text{н}}(\omega),$$

де

$E_2$  — ЕРС ротора,

$R_2, X_2$  — активна і реактивна складова опору ротора,  
 $s$  — ковзання,  
 $\omega_s$  — синхронна швидкість.

Під час пуску  $s \approx 1$ , тому струм  $I_{\Pi} = 5 - 7I_H$ .

Тривалість перехідного процесу визначається моментом інерції й величиною пускового моменту.

Перехідні процеси при зміні навантаження

При зменшенні або збільшенні подачі компресора електропривід повинен швидко відреагувати на зміну моменту опору, щоб зберегти стабільну швидкість.

Залежність зміни частоти обертання від часу:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{M_{дв} - M_H}{J}.$$

У компресорах із частотним перетворювачем регулятор PID типу підтримує сталий тиск:

$$f(t) = f_0 + K_p(p_{зад} - p_{факт}) + K_i \int (p_{зад} - p_{факт}) dt.$$

Цей принцип забезпечує автоматичне відновлення рівноваги між моментом двигуна та навантаженням.

Коливання тиску у пневмосистемі

Зміна тиску у ресивері описується рівнянням масового балансу:

$$V \frac{dp}{dt} = RT(m_{вх} - m_{вих})$$

де

$V$  — об'єм ресивера,

$m_{вх}$  — масова витрата повітря з компресора,

$m_{вих}$  — витрата споживачів.

Для запобігання великим коливанням тиску  $\Delta p$  рекомендується:

$$V \geq (0,1-0,2) \cdot Q_{компр} \cdot t_{пер},$$

де  $t_{пер}$  — час реакції системи керування (2–5 с).

Вібраційні процеси

Під час роботи компресорів у динамічних режимах виникають вібрації, спричинені:

- інерційними силами рухомих частин;

- пульсаціями тиску;
- невірноваженістю ротора;
- резонансними явищами.

Амплітуда вібрацій:

$$A = \frac{F_d}{k_{ж} - m\omega^2},$$

де

$F_d$  — динамічна сила,

$k_{ж}$  — жорсткість системи,

$m$  — маса.

Для запобігання резонансу повинна виконуватись умова:

$$\omega_{роб} \neq \omega_0 = \sqrt{\frac{k_{ж}}{m}}.$$

Теплові процеси під час перехідних режимів

У динамічних режимах температура компресора різко змінюється через зміну тиску та частоти.

Залежність приросту температури:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{mc_p} (N_{вт} - Q_{охл}),$$

де

$N_{вт}$  — втрати потужності у вигляді тепла,

$Q_{охл}$  — потік тепла, відведений системою охолодження.

Надмірний нагрів знижує ефективність мастила й прискорює знос ущільнень, тому термоконтроль обов'язковий для всіх режимів.

Аварійні динамічні режими

До аварійних динамічних режимів належать:

- раптова зупинка двигуна;
- помпаж (зворотний потік) у відцентрових компресорах;
- гідравлічний удар при надлишковому тиску;
- відмова системи охолодження;
- збій датчиків або клапанів.

Для запобігання аваріям застосовуються:

- аварійні перепускні клапани;
- системи аварійного скиду тиску;
- дубльовані датчики;
- автоматичне гальмування електропривода.

Оптимізація динамічних процесів

Для покращення динамічних властивостей компресорної системи застосовують:

- частотне регулювання для керування швидкістю розгону;
- електронні системи м'якого пуску (Soft Start);
- демпфери крутильних коливань на валу;
- регулювання ПІД-параметрів у контролерах;
- збільшення об'єму ресивера для зменшення коливань тиску;
- встановлення датчиків вібрації з автоматичним вимкненням при перевищенні граничних рівнів.

Методи енергозбереження при експлуатації компресорів

Компресорні системи є одними з найенергоємніших споживачів електроенергії у промисловості.

У середньому до 30 % загальних витрат електроенергії підприємства припадає саме на виробництво стисненого повітря.

Тому впровадження методів енергозбереження — ключова умова підвищення ефективності експлуатації компресорних станцій та зниження експлуатаційних витрат.

Енергетичний баланс компресорної установки

Сумарна потужність, споживана компресором:

$$P_{\text{вх}} = P_{\text{кор}} + P_{\text{вт}},$$

де

$P_{\text{кор}}$  — корисна потужність, що йде на стискання повітря;

$P_{\text{вт}}$  — втрати у вигляді тепла, механічного тертя та неефективного стиску.

Енергетичний ККД системи:

$$\eta_{\text{ен}} = \frac{P_{\text{кор}}}{P_{\text{вх}}} = \eta_{\text{ел}} \cdot \eta_{\text{мех}} \cdot \eta_{\text{терм}}.$$

Для більшості промислових компресорів  $\eta_{\text{ен}}$  не перевищує 0.7, тобто приблизно 30 % енергії втрачається у вигляді тепла, що може бути використане повторно.

Основні напрямки енергозбереження

Енергозбереження досягається за такими напрямками:

1. Підвищення ефективності компресора — вибір оптимального типу й режиму роботи.
2. Оптимізація системи керування — частотне регулювання швидкості двигуна.
3. Зменшення втрат у повітропроводах — герметизація та скорочення довжини магістралей.

4. Рекуперація тепла від стисненого повітря.
5. Підвищення ефективності охолодження та очищення.
6. Раціональне використання пневмоенергії — уникнення роботи «на холостому ході».
7. Інтелектуальне керування компресорною станцією.

Частотне регулювання електропривода

Одним з найефективніших способів енергозбереження є частотне регулювання швидкості електродвигуна.

Оскільки для компресорів з постійним моментом:

$$P \propto n^3,$$

то навіть невелике зменшення швидкості обертання дає значну економію енергії.

Наприклад, при зниженні частоти з 50 Гц до 40 Гц (тобто на 20 %):

$$\frac{P_{40}}{P_{50}} = \left(\frac{40}{50}\right)^3 = 0,512,$$

тобто потужність зменшується на  $\approx 49$  %, а подача — лише на 20 %.

Використання багатоступеневого стиску та проміжного охолодження

При багатоступеному стисканні робота компресора зменшується за рахунок зниження температури газу між ступенями:

$$A_{\Sigma} = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{n_i - 1} p_{2i} V_{2i} - \left(\frac{p_{1i}}{p_{2i}}\right)^{\frac{n_i-1}{n_i}}$$

Оптимальний розподіл тиску забезпечує мінімальну сумарну роботу.

Це дозволяє зменшити енергоспоживання на 10–15 % у порівнянні з одноступеневим стиском.

Зменшення втрат у повітропроводах

Втрати тиску в трубопроводах визначаються формулою Дарсі–Вейсбаха:

$$\Delta p = \lambda \frac{L}{D} \frac{\rho v^2}{2},$$

де

$\lambda$  — коефіцієнт тертя (0,02–0,05),

$L$  — довжина трубопроводу,

$D$  — діаметр,

$v$  — швидкість потоку.

Кожне падіння тиску на 0,1 МПа призводить до зростання енергоспоживання компресора на  $\approx 10\%$ .

Тому регулярна перевірка герметичності, усунення витоків і очищення трубопроводів є важливою складовою енергозбереження.

Рекуперація тепла від стисненого повітря

Близько 80 % енергії, споживаної компресором, переходить у тепло, яке можна використовувати для нагріву води або повітря.

Корисна теплова потужність:

$$Q_{\text{тепл}} = P_{\text{вх}} \cdot (1 - \eta_{\text{ен}}).$$

Наприклад, при  $P_{\text{вх}} = 100$  кВт і  $\eta_{\text{ен}} = 0,7$ :

$$Q_{\text{тепл}} = 100 \cdot (1 - 0,7) = 30 \text{ кВт}.$$

Це еквівалентно нагріву 500 л води від 15 °С до 60 °С за годину.

Автоматизація та оптимізація навантаження

Сучасні системи керування з ПЛК та SCADA дозволяють автоматично:

- чергувати роботу компресорів у групі (Master–Slave);
- вмикати лише необхідну кількість агрегатів;
- стабілізувати тиск із мінімальним відхиленням;
- вимикати установки в режимі «холостого ходу»;
- аналізувати споживання повітря й прогнозувати навантаження.

Економічний ефект від автоматизації — до 15–20 % зменшення енерговитрат.

Зменшення холостих витрат

Компресори, що працюють у режимі холостого ходу (без нагнітання), продовжують споживати енергію, яка не перетворюється у корисну роботу.

Потужність холостого ходу:

$$P_{\text{хх}} = (0,25-0,35) \cdot P_{\text{ном}}.$$

Усунення тривалих періодів холостого ходу дозволяє економити до 10 % електроенергії.

Використання повітряних резервуарів (ресиверів)

Ресивери відіграють роль буфера тиску, що дозволяє зменшити частоту пусків компресора.

Необхідний об'єм ресивера:

$$V_p = \frac{Q_{\text{комп}} \cdot (p_{\text{max}} - p_{\text{min}})}{p_{\text{cp}}} \cdot t,$$

де

$Q_{\text{комп}}$  — подача компресора,

$t$  — час між увімкненнями,

$p_{\text{max}}, p_{\text{min}}$  — межі регулювання.

Оптимізація об'єму ресивера стабілізує тиск, зменшує кількість циклів «пуск–стоп» і продовжує ресурс електродвигуна.

Використання безмасляних технологій

Безмасляні гвинтові компресори не потребують масляних фільтрів і охолоджувачів, що зменшує втрати тиску та споживану потужність.

Відсутність опору у системі фільтрації дозволяє знизити тиск нагнітання на 0,05–0,1 МПа, що еквівалентно економії 5–8 % енергії.

Технічне обслуговування як фактор енергозбереження

Погіршення стану обладнання призводить до зростання втрат енергії.

Ефективність залежить від:

- чистоти фільтрів всмоктування (забруднення → +4 % споживання);
- стану мастила (+2–3 % при старінні);
- правильності натягу ременів (+1–2 % при розтягуванні);
- герметичності повітропроводів (втрати до 10 %).

Регулярне технічне обслуговування знижує енергоспоживання на 8–12 %.

Показники енергоефективності компресорної установки

Для оцінки енергоефективності застосовують питомий показник енергоспоживання:

$$E_{\text{пит}} = \frac{P_{\text{вх}}}{Q_{\text{вих}}}, \text{ Вт} \cdot \text{хв} / \text{м}^3.$$

Нормативні значення:

- для поршневих компресорів — 8–10 Вт·хв/м<sup>3</sup>;
- для гвинтових — 6–8 Вт·хв/м<sup>3</sup>;
- для відцентрових — 4–6 Вт·хв/м<sup>3</sup>.

Інтелектуальні системи енергоуправління

Сучасні компресорні станції інтегрують енергоменеджмент у SCADA.

Функції:

- моніторинг навантаження у реальному часі;
- автоматичний вибір оптимального поєднання компресорів;
- прогнозування споживання;

- передача даних до систем ERP підприємства;
- побудова звітів про ККД, втрати, рекуперацію.

Надійність і безпека компресорних установок

Надійність і безпека компресорних систем визначають безперервність технологічних процесів, вартість простоїв і рівень виробничих ризиків. Установки працюють під тиском, із підвищеними тепловими та динамічними навантаженнями, тому вимоги до конструкції, експлуатації й контролю — підвищені.

Основні поняття надійності

Позначимо випадкову відмову інтенсивністю  $\lambda$  (постійною на «плато» експлуатації).

Тоді функція безвідмовної роботи:

$$R(t) = \exp(-\lambda t),$$

середній напрацювання до відмови (MTBF):

$$\text{MTBF} = \frac{1}{\lambda},$$

готовність (availability) при середньому часі ремонту MTTR:

$$A = \frac{\text{MTBF}}{\text{MTBF} + \text{MTTR}}.$$

Для підсистем, з'єднаних послідовно (без резервування):

$$R_{\Sigma}(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t),$$

$$A_{\Sigma} \approx \prod_{i=1}^n A_i.$$

При холодному паралельному резервуванні двох однакових агрегатів:

$$R_{\parallel}(t) = 1 - (1 - R(t))^2 = 2R(t) - R^2(t).$$

Джерела відмов компресорних установок

1. Механічні вузли: підшипники (контактна втома, перегрів), муфти, ремінні передачі, ротори (розбаланс, задири).

2. Пневмовузли: клапани (поршневі), ущільнення (витоки), ресивери (корозія), фільтри/осушувачі (забруднення).

3. Електропривод: перегрів обмоток, перекіс фаз, перенапруги/просідання, знос ізоляції.

4. Автоматика: відмова датчиків тиску/температури/вібрації, збої ПЛК/ПЧ, помилки конфігурації.

5. Експлуатаційні чинники: недостатнє змащення, забруднене повітря, робота в зоні помпажу (динамічні компресори), часті пуски/зупинки.

Таблиця 8.9 – Типові відмови та їхні ознаки/наслідки

Вузол	Типова відмова	Ознака	Наслідок
Підшипник	Перегрів, втома доріжок	Підвищена вібрація, ( $T_{\text{підш}} \uparrow$ )	Заклинювання, аварійна зупинка
Ущільнення	Знос, витік	Зниження тиску, масляний туман	Втрати енергії, ризик забруднення
Клапани	Підклинювання, поломка пружин	Пульсації, падіння подачі	Перегрів циліндра, відмова
Ротор	Розбаланс, задир	1×, 2× об/в спектрі вібрацій	Руйнування лопаток/гвинтів
ПЧ/ПЛК	Перегрів, збій логіки	Аварійні відключення	Зупинка процесу, простої

Кількісна оцінка надійності вузлів

Під час експлуатації, залежно від стадії «кривої ванни», інтенсивність відмов описують розподілом Вейбулла:

$$R(t) = \exp \left[ - \left( \frac{t}{\eta} \right)^\beta \right],$$

$$h(t) = \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{t}{\eta} \right)^{\beta-1},$$

де  $\beta$  — показник форми (ранні відмови  $\beta < 1$ , випадкові  $\beta \approx 1$ , зношування  $\beta > 1$ ,  $\eta$  — масштаб.

За експлуатаційними журналами оцінюють  $\beta, \eta$  (метод лінеаризації) і прогнозують ресурси.

Оцінка готовності компресорної станції

Для станції з  $N$  робочими + 1 резервним однаковими агрегатами (гаряче резервування) ймовірність наявності хоча б одного працездатного:

$$A_{\text{стан}} \approx 1 - 1 - A_{\text{арг}}^{N+1},$$

де  $A_{\text{арг}}$  — готовність одного агрегату.

При  $A_{\text{арг}} = 0,96$  і  $N = 2$  маємо  $A_{\text{стан}} \approx 0,9999$  — практично безперервна подача.

Функціональна безпека та незалежні захисти

Принципи: захист у глибину, незалежність контурів безпеки, збійно-безпечні стани.

Критичні захисні функції:

- від перевищення тиску (механічний запобіжний клапан + електронний захист за (  $p$  ));
- від перегріву (підшипники, обмотки, нагнітання);
- антипомпаж (динамічні компресори);
- втрата мастила/охолодження (мінімальний рівень, витрата,  $\Delta T$  );
- електрозахист (КЗ, земляні замикання, асиметрія фаз).

Типова логіка аварійної зупинки:

$$\text{STOP авар} = (p > p_{\max}) \vee (T > T_{\max}) \vee (\text{OilLow}) \vee (\text{Vib} > \text{Vib}_{\max}) \vee (\text{EL\_Fault}).$$

Ризик-орієнтований аналіз (HAZOP/LOPA) — стисла методика

1. Ідентифікація небезпек: перевищення тиску, руйнування ресивера, пожежа мастила, вибух пилоповітряної суміші, токсичні гази.
2. Оцінка частоти/наслідків: матриця ризику.
3. Шари захисту: технічні (клапани, блокування), організаційні (SOP, інструктаж), адміністративні (дозволи, контроль).
4. LOPA: перевірка достатності шарів для зниження ризику до прийняттого.
5. План скорочення ризику: технічні модифікації + навчання персоналу.

Тиск і міцність: спрощені перевірочні оцінки

Для циліндричної оболонки ресивера (тонка стінка) кільцеві напруження:

$$\sigma_{\theta} = \frac{pD}{2t},$$

де  $p$  — внутрішній тиск,  $D$  — внутрішній діаметр,  $t$  — товщина стінки.

Коефіцієнт запасу:

$$n_{\sigma} = \frac{\sigma_{\text{доп}}}{\sigma_{\theta}} \geq n_{\text{мін}}.$$

Витрата через запобіжний клапан у стисливому режимі (задушений витік), орієнтовно:

$$\dot{m} = C_d A p_0 \sqrt{\frac{\gamma}{RT_0} \left( \frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}}}$$

де  $C_d$  — коефіцієнт витікання,  $A$  — площа сідла,  $\gamma$  — показник адиабати.

Використовується для попередньої оцінки розміру клапана.

Вібраційний та температурний моніторинг (CBM)

Стан-орієнтоване обслуговування (CBM) використовує онлайн-датчики:

- вібрації: RMS, спектр (1×, 2×, підшипникові дефекти — смуги BPFO/BPFI);
- температури: підшипники, обмотки, масло;
- тиску/потoku: підтвердження режимів;
- частоти обертання: зв'язок із енергоспоживанням;
- електричні сигнали: аналіз струмів (MCSA) для виявлення дефектів ротора/статора.

Проста межа спрацювання для вібрації:

$$\text{Alarm: } v_{\text{RMS}} > v_{\text{доп}}, \text{ Trip: } v_{\text{RMS}} > v_{\text{авар}}.$$

Пожежо- та вибухобезпека

Ризики: масляний туман, нагріті поверхні, іскроутворення, пил.

Технічні заходи:

- вентиляція (кратність повітрообміну),
- іскробезпечне виконання електрообладнання в небезпечних зонах,
- детектори диму/газу,
- огнезатримуючі клапани,
- заземлення/еквіпотенціалізація,
- виключення гарячих поверхонь (> 200–250 °C) у потоках масляного аерозолю.

Людський фактор і організаційні заходи

- SOP: стандартизовані операційні процедури пуск/зупинка/перемикання.
- RTW: система «дозвіл на роботи» (гарячі/висотні/в електроустановках).
- Навчання й атестація: перевірка знань операторів.
- 5S/TPM: порядок на робочому місці та профілактика простоїв.
- Розслідування інцидентів: аналіз причин (Root Cause Analysis) і запобіжні дії.

Періодичні випробування та калібрування

- Ресивери/трубопроводи: гідровипробування, неруйнівний контроль (УЗК, ВТ, ПВК), товщинометрія.
- Запобіжні клапани: перевірка тиску спрацювання, герметичності.
- Датчики/вимірювачі: калібрування за еталонами (тиск, температура, витрата).

- Електрика: перевірка ізоляції, захистів (криві спрацювання), випробування релейного захисту.

Інтервали визначають за настановами виробника + досвід

Мінімізація наслідків відмов (design for safety)

- Fail-safe позиції клапанів (відкрито/закрито за замовчуванням).
- Рознесення парних датчиків (унікати загальних причин відмови).
- Подвійне живлення ПЛК/ПЧ/SCADA (UPS + резерв).
- Вогнестійкі перегородки, захисні огорожі.
- Пасивний захист: розривні мембрани, шумоглушники, ловушки масла.
- Організаційні: обмеження доступу, маркування трубопроводів, чіткі теги.

Підсумкова чек-лист карта для експлуатації

1. Передпусковий огляд: витоки, рівень масла, фільтри, охолодження, електрошафи.
2. Функціональні тести: датчики ( p, T, v ), аварійні кнопки, запобіжні клапани.
3. Номінальний режим: контроль ( p, T, I, v ), порівняння з трендами.
4. Щотижневі перевірки: вібрація, температури, аналіз масла.
5. Щоквартальні: калібрування датчиків, перевірка ПЧ/ПЛК журналів.
6. Щорічні: гідровипробування (за графіком), НК корпусів, ревізія клапанів.

Модернізація компресорних станцій

Модернізація компресорних станцій (КС) є невід'ємною складовою підвищення ефективності виробництва та забезпечення надійного постачання стисненого повітря для промислових процесів.

Вона включає як оновлення обладнання, так і цифровізацію управління, впровадження енергозберігаючих технологій, систем діагностики та оптимізацію схем роботи.

Метою є підвищення продуктивності, зниження витрат електроенергії та підвищення надійності при мінімальних капітальних вкладеннях.

Загальні принципи модернізації

Основними принципами є:

1. Комплексність — модернізуються не окремі вузли, а вся система постачання стисненого повітря.
2. Енергоаудитна обґрунтованість — передусім аналіз енергоспоживання та втрат.

3. Етапність впровадження — від автоматизації до повної реконструкції.
4. Інтеграція з існуючими виробничими системами (MES, ERP, SCADA).
5. Окупність і мінімізація простоїв — реалізація без зупинки основних виробничих ліній.

#### Попередній енергетичний аудит

Перед модернізацією проводиться енергоаудит компресорної системи, який включає:

- вимірювання витрат повітря (  $Q$  ), тиску (  $p$  ), температури (  $T$  ), електроспоживання (  $P$  );
- аналіз витоків у повітропроводах (до 20 % від подачі);
- оцінку режимів навантаження (робота на холостому ході, циклічність);
- побудову профілю споживання повітря протягом доби/зміни;
- визначення питомої енергоемності (  $E_{\text{ПИТ}} = \frac{P_{\text{ВХ}}}{Q_{\text{ВИХ}}}$  );
- розрахунок потенційної економії після модернізації.

#### Напрямки модернізації

1. Механічна реконструкція — заміна компресорів старих типів (поршневих) на гвинтові або відцентрові.
2. Електромеханічна модернізація — установка частотно-регульованих приводів (VSD).
3. Автоматизація та диспетчеризація — ПЛК, HMI, SCADA.
4. Оптимізація магістралей — зменшення втрат тиску, розділення контурів.
5. Системи рекуперації тепла — використання тепла від стисненого повітря.
6. Інтелектуальні системи керування — Master–Slave, Energy Manager, AI-аналітика.

Таблиця 8.10 – Основні напрями модернізації

Напря́м	Очікуваний ефект	Економія енергії, %
Частотне регулювання	Адаптація під навантаження	20–35
Рекуперація тепла	Використання 70–80 % втрат	10–15
Автоматизація керування	Зменшення часу холостого ходу	10–20
Нові компресори	Вищий ККД	15–25
Оптимізація повітропроводів	Менше втрат тиску	5–10

Впровадження частотно-регульованих електроприводів (VSD Retrofit)

Найбільш поширений варіант модернізації — установка частотного перетворювача для існуючого компресора.

Це дозволяє плавно регулювати продуктивність за принципом:

$$Q = Q_{\text{НОМ}} \frac{n}{n_{\text{НОМ}}},$$
$$P = P_{\text{НОМ}} \left( \frac{n}{n_{\text{НОМ}}} \right)^3.$$

Таким чином, при зниженні швидкості на 20 % потужність зменшується на 49 %.

Додатково забезпечується м'який пуск, зниження пускових струмів і продовження ресурсу двигуна.

#### Система керування типу Master–Slave

Для станцій з кількома компресорами застосовується принцип централізованого керування:

- один контролер («Master») координує роботу кількох підлеглих («Slave»);
- вибирає оптимальну кількість працюючих машин залежно від тиску;
- забезпечує рівномірний розподіл напрацювання.

#### Впровадження систем моніторингу та діагностики

Сучасні рішення (наприклад, EcoStruxure, Compressed Air Manager, Siemens Energy Analyzer) дозволяють:

- контролювати тиск, температуру, вібрацію, струми,  $\cos\phi$  у реальному часі;
- формувати тренди, звіти, енергетичні карти;
- відстежувати витрати та ефективність окремих компресорів;
- використовувати аналітику на базі AI для прогнозування несправностей;
- віддалений доступ через Web-інтерфейс або SCADA.

#### Впровадження рекупераційних систем

Рекуперація тепла дозволяє використовувати енергію нагрітого масла або повітря для:

- опалення приміщень,
- нагріву технологічної води,
- попереднього підігріву повітря горіння в котлах.

#### Модернізація повітропроводів і пневмомереж

- збільшення діаметра трубопроводів → зниження втрат за Дарсі–Вейсбахом;
- ліквідація «глухих» відгалужень → рівномірний розподіл тиску;
- ізоляція магістралей → зменшення конденсатоутворення;
- установка автоматичних осушувачів і вологомірів;

- контроль герметичності з ультразвуковими детекторами.  
Зменшення втрат тиску на 0,1 МПа → економія  $\approx$  10 % енергії.

Перехід до інтелектуальної компресорної станції (Smart Air System)  
Smart Air System базується на поєднанні:

- датчиків тиску/температури/потoku (IIoT);
- контролера з оптимізатором навантаження;
- SCADA з модулем енергоуправління;
- аналітики на базі машинного навчання.

Переваги:

- автоматична адаптація до графіка споживання;
- зменшення пікових навантажень на енергомережу;
- аналітика «ефективність кожного кубометра»;
- предиктивне обслуговування (Predictive Maintenance).

Етапи реалізації проєкту модернізації

1. Обстеження – аудит, збір даних, інвентаризація.
2. Техніко-економічне обґрунтування – розрахунок потенціалу економії.
3. Проєктування – вибір обладнання, побудова схем.
4. Монтаж і пусконаладження – мінімізація простоїв.
5. Введення в експлуатацію – інтеграція з системою управління.
6. Навчання персоналу – нові алгоритми роботи та техобслуговування.
7. Моніторинг ефективності – порівняння «до/після».

Цифровий моніторинг після модернізації

Після впровадження нової системи дані про тиск, потік, вібрацію, температуру передаються у SCADA або хмарний Energy Cloud.

Створюється цифровий двійник компресорної станції, що дозволяє:

- прогнозувати навантаження;
- визначати оптимальні режими;
- попереджати відмови;
- будувати енергетичні баланси.

Перспективні напрями розвитку

1. Інтеграція з відновлюваними джерелами енергії (ВДЕ) — керування компресорами у залежності від профілю генерації.
2. Використання акумуляторів енергії для зниження пікових навантажень.
3. AI-контроль енергоспоживання — прогноз оптимальної комбінації агрегатів.
4. Цифрові сервіси виробників – віддалений технічний моніторинг.

5. Впровадження стандартів ISO 11011, ISO 50001 для енергоменеджменту.

Висновки.

1. Компресорні системи є ключовими елементами промислової інфраструктури, що забезпечують технологічні процеси стисненням повітрям, газом або сумішами.

2. Основними типами компресорів є поршневі, гвинтові та відцентрові. Їх вибір визначається продуктивністю, тиском, економічністю та характером споживача.

3. Електромеханічне забезпечення компресорів включає вибір двигуна, системи пуску, частотного регулювання й автоматизованого керування.

4. Динамічні режими роботи (пуск, розгін, регулювання, зупинка) визначають механічні та електричні навантаження, впливають на довговічність і енергоефективність.

5. Основні шляхи енергозбереження — частотне регулювання, усунення витоків, оптимізація мережі, рекуперація тепла, автоматизація режимів.

6. Надійність і безпека компресорних установок досягаються резервуванням, незалежними захистами, стан-орієнтованим моніторингом, дотриманням технічної дисципліни.

7. Модернізація компресорних станцій ґрунтується на енергоаудиті, впровадженні VSD-приводів, систем Master–Slave, цифрових технологій і стандартів ISO 50001.

8. Комплексна модернізація дає змогу зменшити споживання електроенергії на 30–45 %, скоротити простої та підвищити ресурс обладнання.

9. Сучасна компресорна станція — це інтелектуальна енергооптимізована система, здатна автоматично підтримувати потрібні параметри тиску, температури й продуктивності.

Контрольні питання до теми 8.

1. Яке технічне призначення компресорних систем у промислових підприємствах?

2. Які основні типи компресорів використовуються у гірничо-металургійному комплексі?

3. У чому полягають відмінності між поршневими, відцентровими та гвинтовими компресорами?

4. Які фактори впливають на вибір електропривода компресора?

5. Які режими роботи компресора належать до динамічних?

6. Як описується момент навантаження компресора та від чого він залежить?

7. Яким чином частотне регулювання впливає на енергоефективність компресора?

8. Які основні джерела втрат енергії в компресорних установках?
9. Що таке рекуперація тепла й як вона реалізується в компресорних системах?
10. Які основні види відмов компресорного обладнання та їхні причини?
11. Які системи захисту й контролю параметрів передбачені для забезпечення безпеки?
12. У чому полягає принцип роботи системи Master–Slave?
13. Які показники використовуються для оцінювання енергоефективності компресорних станцій?
14. Які етапи передбачає процес модернізації компресорної станції?
15. Які стандарти та підходи рекомендуються для управління енергоспоживанням компресорних систем?

Використана література.

1. Коренькова Т. В., Сердюк О. О., Ковальчук В. Г., Сергієнко С.А. Енергозберігаючі режими роботи насосних і вентиляторних установок з автоматизованим електроприводом : навчальний посібник, 2-ге видання, перероблене і доповнене. Кременчук : Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, 2023. 194 с.
2. Коренькова Т. В., Сердюк О. О., Ковальчук В. Г. Режими роботи насосних та вентиляторних установок із автоматизованим електроприводом : навч. посібник. Кременчук : ПП Щербатих О. В., 2013. 200 с.
3. Компресорні станції : підручник / Г. А. Бондаренко, Г. В. Кирик. Суми : Сумський державний університет, 2016. 385 с.

## ТЕМА 9. ІНЖИНІРИНГ КОНВЕЄРНИХ СИСТЕМ.

Класифікація конвеєрів, роль у ГМК. Стрічкові конвеєри: конструкція, вузли, приводи. Розрахунок потужності електроприводу для конвеєра. Системи автоматизації та контролю. Проблеми зносу, енерговитрат і шляхи їх зменшення. Модернізація конвеєрних систем.

Значення конвеєрного транспорту в гірничо-металургійному комплексі (ГМК)

Конвеєрні системи є одним із ключових елементів інфраструктури гірничо-металургійного комплексу (ГМК), оскільки забезпечують безперервне, високопродуктивне та економічно ефективне транспортування сировини, напівфабрикатів і готової продукції на всіх стадіях технологічних процесів.

У сучасних умовах виробництва, коли підприємства прагнуть мінімізувати операційні витрати та підвищити надійність логістичних потоків, конвеєрні системи стають базовим транспортним засобом. На відміну від машин перервної дії (кар'єрні самоскиди, тракторні поїзди, ківшові транспортери), конвеєри функціонують у режимі безперервного переміщення матеріалу. Це дозволяє ліквідувати проміжні накопичення вантажу, усуває необхідність у циклічних зупинках для завантаження або розвантаження і забезпечує рівномірне навантаження на технологічне обладнання, що стоїть вище та нижче за потоком.

Однією з фундаментальних переваг конвеєрного транспорту є його здатність працювати без зупинок упродовж тривалого часу. У порівнянні з технікою циклічної дії, де кожна операція включає завантаження, переміщення, зупинку та вивантаження, конвеєри реалізують режим безперервного потоку, що дозволяє досягати високої технологічної ритмічності виробництва. Підприємства ГМК використовують конвеєрні лінії довжиною до кількох кілометрів, які інтегруються в складні транспортні схеми з десятками точок завантаження та розвантаження, забезпечуючи транспортування руди, концентрату, агломерату, коксу, відсівів та інших матеріалів.

З технічної точки зору, конвеєрні системи характеризуються високою продуктивністю, що може досягати 15–20 тис. т/год. Продуктивність залежить від швидкості стрічки, ширини полотна, параметрів завантаження та властивостей транспортуемого матеріалу. Багатоаспектність застосування конвеєрів у ГМК обумовлена їхньою універсальністю: вони придатні для транспортування як дрібних сипких матеріалів (рудної дрібниці, шлаку, агломерату), так і великих фракцій (куди входять уламки масою до 80–120 кг у кар'єрних умовах). Важливим є й те, що стрічкові конвеєри забезпечують мінімальні питомі енерговитрати на транспортування одиниці маси вантажу в порівнянні з автомобільним чи локомотивним транспортом.

Широке застосування конвеєрних систем у ГМК пов'язане також із їх здатністю працювати в агресивних і важких виробничих умовах. Це особливо стосується залізородних і марганцевих кар'єрів, дробильно-

збагачувальних фабрик, доменних і агломераційних цехів. Умови експлуатації, характеризуються підвищеною запиленістю, вібраціями, змінами температури, високою абразивністю вантажів, наявністю вологи та періодичними піковими навантаженнями, що потребує підвищених вимог до конструкційних матеріалів стрічки, роликкоопор, барабанів та металокопункцій.

Важливим аспектом інженерії конвеєрних систем є їхня інтеграція в загальну логістичну інфраструктуру підприємства. На гірничо-збагачувальних комбінатах конвеєри забезпечують переміщення руди від забою або пункту первинного дроблення до віддалених пунктів переробки. У металургії вони застосовуються в агломераційних цехах для подавання шихти, у доменних цехах — для подавання коксу й агломерату, а також у конвертерних цехах для транспортування вапняку, флюсів та інших матеріалів.

Конвеєрні системи також є зручною платформою для впровадження автоматизованих систем керування та діагностики. Контроль сходу стрічки, пробуксовування, температури підшипників роликів, роботи приводів, навантаження, вібрацій і стану роликкоопор забезпечуються сучасними системами моніторингу. Автоматизація сприяє зниженню аварійності, підвищенню керованості та забезпечує повноцінний технологічний контроль у режимі реального часу.

Одним з головних факторів, що впливають на ефективність роботи конвеєра, є характеристики транспортних вантажопотоків. В умовах ГМК вантажопотік має стохастичну природу.

Навантаження на конвеєр змінюється у часі та залежить від роботи видобувних машин, дробарок, бункерів-накопичувачів та інших агрегатів

Це потребує застосування статистичних методів для визначення ширини стрічки, допустимого навантаження, режимів роботи, а також для розрахунку оптимальної потужності приводу. Графічний вигляд прикладу змінності вантажопотоку наведено на рис. 9.1.

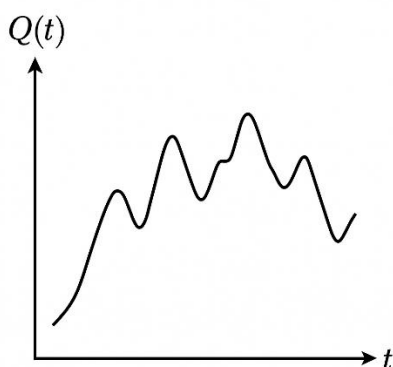


Рисунок 9.1 – Приклад зміни транспортного вантажопотоку у часі

Таким чином, значення конвеєрного транспорту в ГМК визначається низкою факторів: високою продуктивністю, безперервністю транспортного

процесу, можливістю повної автоматизації, відносно низькими енерговитратами та здатністю працювати в умовах значних механічних і кліматичних навантажень. Інженерія конвеєрних систем на таких підприємствах охоплює комплекс питань: від проектування траси й вибору елементів конструкції до математичного моделювання процесів руху вантажу та оптимізації техніко-економічних характеристик. Це зумовлює необхідність ґрунтовного дослідження конструкції, режимів роботи та умов експлуатації конвеєрів, що розглядається у наступних підрозділах цього розділу.

### Класифікація конвеєрів

Конвеєрні системи використовуються в широкому спектрі технологічних процесів гірничо-металургійного комплексу, тому їх класифікація здійснюється за кількома ознаками. Правильне визначення типу конвеєра є основою для подальшого інженерного розрахунку, вибору конструкції, визначення параметрів електроприводу та систем автоматизації. У межах інжинірингу конвеєрних систем класифікація дозволяє обґрунтувати раціональне застосування конкретного типу обладнання залежно від властивостей матеріалу, умов експлуатації та вимог виробництва.

### Класифікація конвеєрів за видом тягового органу.

Тяговий орган є ключовим елементом будь-якої конвеєрної системи, оскільки саме він сприймає та передає тягове зусилля, необхідне для переміщення вантажу. Конструкція, матеріал, кількість гнучких або жорстких елементів, спосіб їх взаємодії з вантажонесучими деталями та привідною станцією визначають кінематичну схему, допустимі навантаження, габарити, швидкісні режими та енергетичні витрати системи. У гірничо-металургійному комплексі застосовується кілька основних типів тягових органів, кожен із яких має власні інженерні особливості та область раціонального застосування.

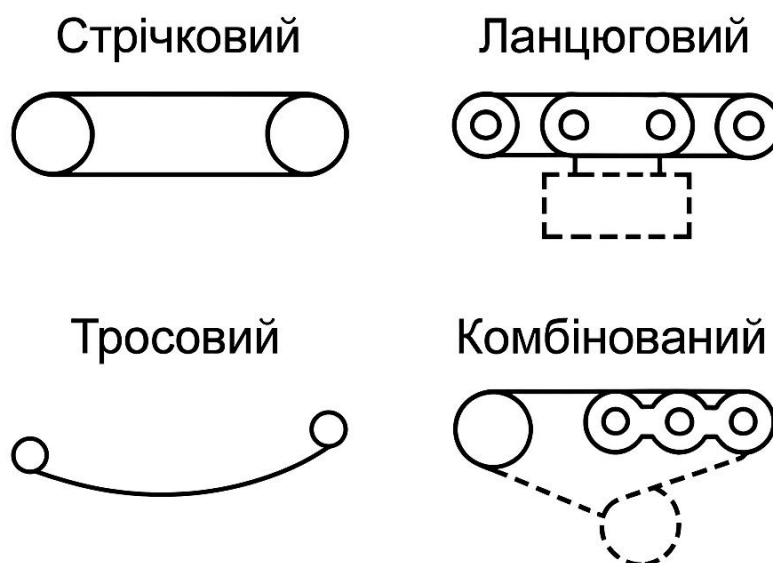


Рисунок 9.2 – Основні типи тягових органів конвеєрів

### Стрічкові тягові органи

Стрічка одночасно виконує функції тягового і вантажонесучого елемента. Вона являє собою безкінечну гнучку транспортну поверхню, що рухається по системі роликкоопор і огинає приводні та натяжні барабани. Стрічкові конвеєри є переважаючим типом у ГМК, оскільки забезпечують високу продуктивність, низькі питомі енерговитрати, можливість транспортування на великі відстані та добре піддаються автоматизації.

Інженерні особливості стрічкових тягових органів:

- Стрічка може бути резинотканинною, резинокордною або металокордною.
- Забезпечує плавність ходу і мінімальний рівень ударних навантажень.
- Дозволяє транспортувати матеріал зі швидкістю до 6–8 м/с.
- Має обмеження щодо максимальної температури та абразивності вантажу.
- Необхідність точного центрування та очищення робочої поверхні.

Область застосування:

- Рудні кар'єри.
- Дробильно-збагачувальні фабрики.
- Агломераційні та доменні цехи.
- Склади сипких матеріалів.

### Ланцюгові тягові органи.

У таких конвеєрах тягове зусилля передається пластинчастим, роликвим чи скребковим ланцюгом. Ланцюги дозволяють працювати у важких умовах, витримують високі температури, агресивні середовища, значні ударні навантаження.

Основні конструктивні ознаки:

- Металеві ланцюги з шарнірними з'єднаннями.
- Можливість роботи з великими кусковими навантаженнями.
- Рух ланцюга відбувається по напрямних або жолобах.
- Можливість роботи під великими кутами нахилу.

Недоліки:

- Висока металоємність.
- Підвищені енерговитрати через сухе тертя.
- Складніша система змащування і обслуговування.

Застосування:

- Скребкові конвеєри (у шахтах).
- Пластинчасті транспортні системи.
- Транспортування гарячих або абразивних вантажів.

Тросові (канатні) тягові органи

Тросові конвеєри використовують сталеві канати як основний елемент передачі тягового зусилля. У деяких конструкціях вантаж переноситься вантажонесучими візками, підвішеними до каната.

Особливості:

- Невелика маса тягового органа.
- Велика довжина конвеєрних трас (до кількох кілометрів).
- Висока гнучкість траси, можливість обходу перешкод.
- Потребують складнішої системи натягу.

Сфера використа'ння:

- Підвісні канатні дороги.
- Дистанційне транспортування допоміжних матеріалів.
- Конвеєри у гірничих виробках з обмеженим простором.

Комбіновані тягові системи.

У деяких типах конвеєрів застосовуються два різних елементи: стрічка і канат, стрічка і ланцюг або дві стрічки, що взаємодіють між собою.

Приклади комбінованих систем:

- Стрічково-ланцюгові конвеєри – використовуються для великих кускових вантажів.
- Двострічкові (притискні) конвеєри – дозволяють транспортувати матеріал під кутами до  $90^\circ$ .
- Стрічково-канатні системи – забезпечують роботу на складних криволінійних трасах.

Переваги:

- Підвищена вантажопідйомність.
- Можливість збільшення кута нахилу.
- Більш стійка робота у складних умовах.

Порівняльні критерії вибору тягового органа

При проектуванні інженер оцінює такі параметри:

- Тип вантажу (сипкий, кусковий, гарячий, абразивний).
- Максимальна продуктивність та швидкість.
- Довжина траси й максимальний ухил.
- Умови експлуатації (вологість, температура, пил).
- Потреби в автоматизації та технічному обслуговуванні.
- Енерговитрати та економічність.

Класифікація конвеєрів за способом переміщення вантажу

Спосіб переміщення вантажу є однією з базових ознак класифікації конвеєрів, оскільки визначає принцип формування руху, конструкцію транспортуючого органа та область застосування обладнання. У гірничо-металургійному комплексі переважають системи з примусовим переміщенням, проте в окремих випадках використовуються гравітаційні, пневматичні та гідравлічні методи транспортування матеріалів.

Вибір способу переміщення визначається властивостями матеріалу, умовами виробничого середовища, протяжністю траси, вимогами до продуктивності та енергоефективності.

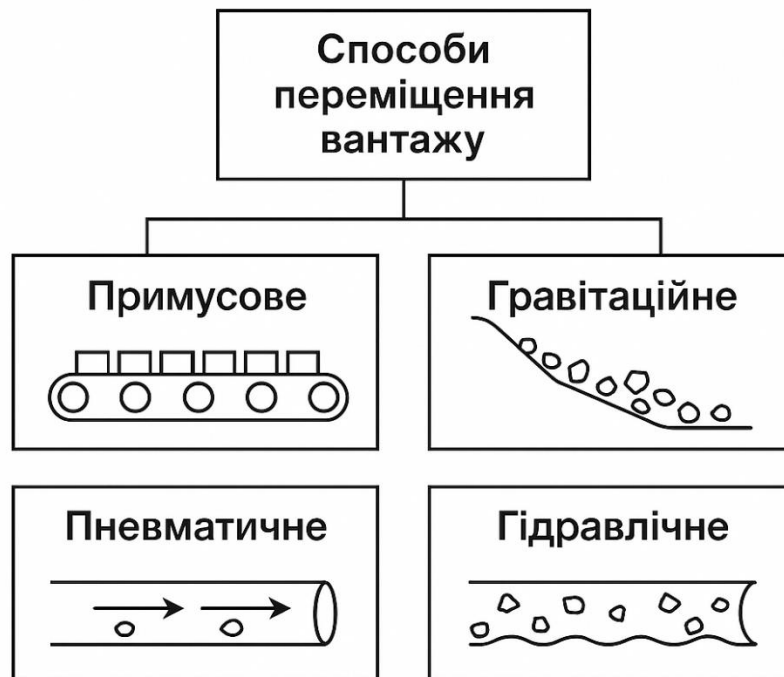


Рисунок 9.3 – Способи переміщення вантажу в конвеєрних системах

#### 1. Конвеєри з примусовим переміщенням вантажу

Це найбільш чисельна група конвеєрів, у яких переміщення відбувається за рахунок роботи тягового органу, що безпосередньо передає зусилля на вантаж або вантажонесучий елемент.

До них належать:

Стрічкові конвеєри

Найпоширеніший тип конвеєрів у ГМК. Вантаж переміщується на рухомій стрічці, що спирається на роликоопори.

Переваги:

- висока продуктивність;
- можливість транспортування на значні відстані;
- низькі енерговитрати.

Ланцюгові (пластинчасті, скребкові) конвеєри

Вантаж пересувається разом із тяговим органом: скребки або пластини захоплюють матеріал і переміщують його по жолобу.

Переваги:

- витримують великі ударні навантаження;
- працюють із гарячими, вологими або абразивними матеріалами.

### Ковшові конвеєри та елеватори

Транспортування здійснюється послідовними ковшами, розташованими на стрічці або ланцюгу. Використовуються для вертикального та крутопохилого переміщення.

Переваги:

- значні кути підйому;
- можливість транспортування пилових або дрібних матеріалів.

### Гравітаційні системи транспортування

Принцип їх роботи ґрунтується на використанні сили тяжіння. Матеріал рухається без тягового органа (без приводу) або під дією мінімального поштовху. Це прості й високонадійні системи.

Сюди відносяться:

Рольганги (гравітаційні конвеєри)

Штучні вантажі переміщуються по роликах за рахунок нахилу.

Жолоби самопливні

Сипкі матеріали рухаються по металевих або бетонних жолобах.

Переваги гравітаційних систем:

- практично нульові енерговитрати;
- простота конструкції;
- висока надійність.

Недоліки:

- робота можлива лише за наявності ухилу;
- не підходять для значних відстаней.

### Пневматичні транспортні системи

У пневмотранспорті вантаж переміщується потоком повітря по трубопроводах. Матеріал знаходиться у завислому або щільному шарі.

Переваги:

- можливість транспортування дрібнодисперсних матеріалів;
- герметичність транспортування;
- висока швидкість руху.

Недоліки:

- значні енергетичні витрати на стиснене повітря;
- складність систем очищення повітря;
- зношування труб абразивними матеріалами.

Застосування:

- пилові матеріали (цемент, вапно, сухі концентрати);
- допоміжні матеріали в металургії.

### Гідравлічні транспортні системи

Переміщення матеріалу здійснюється водним потоком у трубопроводах. У ГМК застосовується рідше, але використовується для подачі пульпи або шламів.

Переваги:

- можливість транспортування матеріалів на великі дистанції;
- повна герметичність системи;
- можливість роботи у важкодоступних місцях.

Недоліки:

- потреба у складних насосних станціях;
- необхідність подальшого зневоднення матеріалу;
- залежність від властивостей пульпи.

Таблиця 9.1 - Порівняльні характеристики способів переміщення

Тип системи	Робоче середовище	Основні переваги	Основні обмеження
Примусова	Тяговий орган	Висока продуктивність, автоматизація	Вартість, складність
Гравітаційна	Сила тяжіння	Нульові енерговитрати	Потрібен ухил
Пневматична	Стиснене повітря	Герметичність, швидкість	Високі енерговитрати
Гідравлічна	Водний потік	Дальність транспортування	Потрібне зневоднення

Класифікація конвеєрів за характером транспортованого матеріалу

Характеристика вантажу визначає вибір типу конвеєра, параметри його конструкції, тип тягового органу, спосіб жолоблення стрічки, а також вимоги до швидкості руху та конструкційних матеріалів. У гірничо-металургійному комплексі конвеєри працюють з широким спектром матеріалів — від рудної пульпи до великих кусків породи, від пилових концентратів до штучних вантажів у тарі. Тому класифікація за характером вантажу має важливе значення для інжинірингу, проектування та експлуатації обладнання.

Усі транспортовані матеріали умовно поділяються на чотири основні групи: сипкі, кускові, дрібнодисперсні та пилові, штучні вантажі. Кожна група має специфічні фізико-механічні властивості, що визначають вимоги до обладнання.

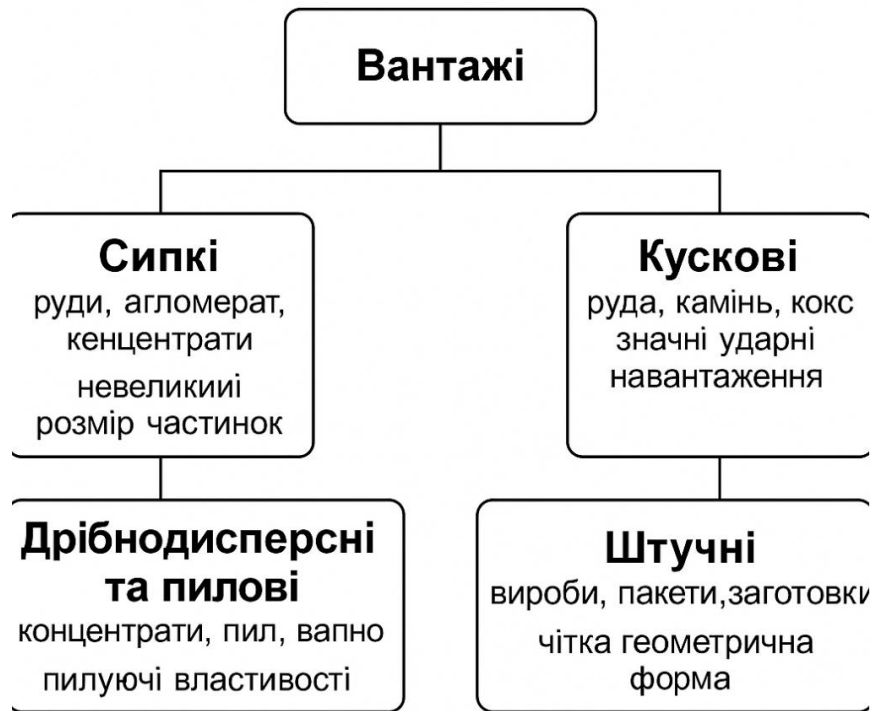


Рисунок 9.4 – Класи вантажів для конвеєрного транспорту

#### Сипкі матеріали

До цієї групи належать руди дрібної фракції, агломерат, концентрати, шихта, вапняк, коксова дрібниця, шлакові відсівки. Ці матеріали становлять основний вантажопотік ГМК.

Основні властивості сипких матеріалів:

- невеликий розмір частинок (0...50 мм);
- можливість самовирівнювання шару;
- чітко виражений кут природного укосу;
- підвищена абразивність (особливо руд і агломерату);
- можливість пилоутворення;
- рівномірне навантаження на стрічку.

Вимоги до конвеєра:

- жолоблення стрічки 20–35°;
- швидкість переміщення 2–4 м/с;
- застосування роликкоопор трикутної форми;
- спеціальні гумові стрічки для абразивних вантажів;
- системи видалення пилу та очищення стрічки.

#### Кускові матеріали

До кускових вантажів належать великі фракції руди, бутовий камінь, шматковий кокс, доменні добавки, гарячі шматки агломерату.

Особливості кускових вантажів:

- розмір кусків до 350–400 мм у кар'єрах та до 150–200 мм на фабриках;
- нерівномірний розподіл навантаження по ширині стрічки;

- значні ударні навантаження при завантаженні;
- можливість механічного пошкодження стрічки та роликів.

Вимоги до конструкції конвеєра:

- посилені барабани;
- товстіші захисні шари стрічки;
- низькі швидкості руху (до 2,5 м/с);
- застосування броньованих завантажувальних лотків;
- збільшена ширина стрічки для зменшення локальних перевантажень.

Дрібнодисперсні та пилові матеріали

До цієї групи належать: пилові концентрати, сухе вапно, мікрофракції агломерату, пилоподібні відходи, сухі доменні добавки.

Властивості:

- дуже малий розмір частинок (до 1–2 мм);
- висока пливучість;
- здатність до ущільнення;
- ризик втрати матеріалу при високих швидкостях.

Вимоги до конвеєра:

- застосування закритих стрічкових галерей;
- захисні нахлестові борти;
- знижена швидкість стрічки (1,0–2,0 м/с);
- пиловловлюючі системи;
- герметизація завантажувальних вузлів.

Штучні вантажі

Це різноманітні вироби, елементи устаткування, пакети металопродукції, ящики, виливниці, заготовки. Для їх переміщення використовують рольганги, ланцюгові та стрічкові конвеєри спеціального виконання.

Властивості штучних вантажів:

- чітка геометрична форма;
- можливість точкових ударних навантажень на ролики;
- потреба у синхронізації руху.

Вимоги до транспортних систем:

- застосування роликів та ланцюгових конвеєрів;
- невеликі швидкості руху (0,1–0,5 м/с);
- посилені направляючі елементи;
- точні системи керування приводом.

Класифікаційні критерії вибору типу конвеєра залежно від матеріалу

Основними критеріями є:

- гранулометричний склад;
- абразивність;
- вологість і злежуваність;
- схильність до пилоутворення;

- температура матеріалу;
- допустимий тиск та удари;
- вимоги до герметичності.

Для кожного виду вантажу конструюється індивідуальна компоновка, яка забезпечує оптимальний баланс між енерговитратами, продуктивністю та надійністю.

Класифікація конвеєрів за траєкторією руху та геометрією траси

Геометрія траси є одним із ключових чинників, що визначає конструктивне виконання конвеєра, вибір типу тягового органа, необхідні параметри приводу та рівень енерговитрат. У гірничо-металургійному комплексі траса конвеєра часто проходить через складні просторові ділянки, що вимагає ретельного інженерного опрацювання.

Усі конвеєри за траєкторією руху поділяють на п'ять основних груп: горизонтальні, нахилені, криволінійні, комбіновані ламані, багаторівневі.

Горизонтальні конвеєри

Горизонтальні конвеєри застосовуються найчастіше. Вони працюють за мінімальних енерговитрат, забезпечують рівномірність транспортування та максимально тривалий строк служби стрічки й роликкоопор.

Конструктивні особливості:

- мінімальне навантаження на привід;
- відсутність додаткових втрат на підйом вантажу;
- використання стандартних роликкоопор та жолоблення;
- можливість великої довжини траси.

Основні сфери застосування:

- внутрішні транспортні лінії фабрик;
- конвеєри на складах і перевантажувальних пунктах;
- магістральні ділянки транспортних систем.

Нахилені конвеєри

Нахилені конвеєри забезпечують переміщення матеріалу під кутами від  $5^\circ$  до  $20^\circ$  для звичайних стрічок та до  $30\text{--}35^\circ$  для спеціальних профільованих стрічок. При використанні двострічкових або стрічково-ланцюгових систем можливий підйом під кутами до  $90^\circ$ .

Особливості:

- наявність додаткового тягового навантаження на привід;
- необхідність зменшення швидкості при великих кутах нахилу;
- потреба у спеціальних шевронних або профільованих стрічках;
- підвищені вимоги до натягу стрічки.

Приклади застосування:

- подавання руди з нижніх рівнів кар'єру;
- живлення бункерів агломераційних і доменних цехів;
- подавання матеріалів на висотні технологічні рівні.

Криволінійні конвеєри (по плану)

Це конвеєри, траса яких має повороти. Вони дозволяють обійти перешкоди або вписати конвеєр у територію з обмеженим простором.

Особливості:

- стрічка працює з додатковими боковими навантаженнями;
- застосовуються спеціальні роликоопори з поворотними секціями;
- збільшений радіус повороту;
- складніша система центрування.

Переваги:

- значне скорочення кількості перевантажувальних пунктів;
- можливість обійти будівлі або технологічні агрегати.

Комбіновані ламані траси

Комбіновані траси складаються з горизонтальних і нахилених ділянок, що з'єднуються між собою ламаними переходами.

Конструктивні особливості:

- зміна кута нахилу потребує спеціальних перехідних роликоопор;
- нерівномірність навантаження у зоні переходу;
- потреба у ретельному розрахунку натягу стрічки.

Приклади використання:

- на дробильно-збагачувальних фабриках;
- у складських системах;
- на перевантажувальних станціях кар'єрів.

Багаторівневі конвеєрні системи

У таких системах конвеєрні траси сполучаються між різними рівнями будівель або технологічних секцій.

Особливості:

- складні компонування приводу;
- значні навантаження на вузли;
- потреба у точній синхронізації роботи кількох конвеєрів.

Приклади:

- багаторівневі склади;
- цехи агломерації та доменного виробництва;
- збагачувальні фабрики.

Інженерні критерії вибору типу траси

При проектуванні траси необхідно враховувати:

- рельєф місцевості або конфігурацію цеху;
- допустимі кути нахилу;
- фізико-механічні властивості вантажу;
- енергетичні витрати на переміщення;
- зношування стрічки на поворотах і переходах;
- можливість доступу до обслуговування.

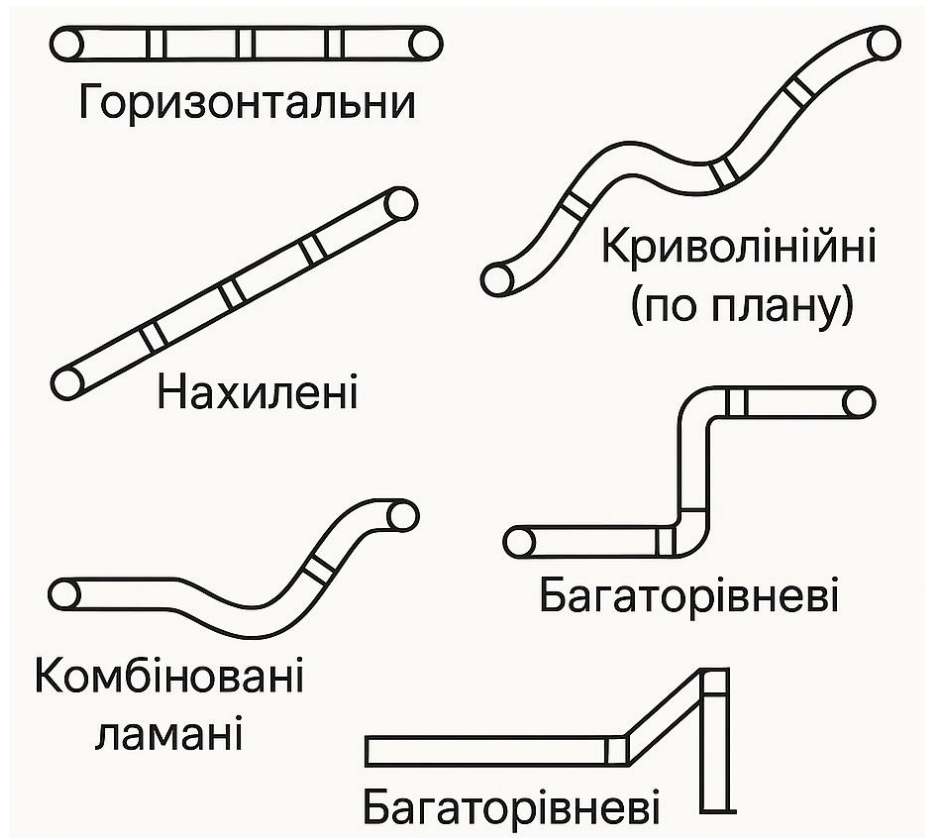


Рисунок 9.5 – Типи геометричних трас конвеєрів

Класифікація конвеєрів за функціональним призначенням

Функціональне призначення є одним із ключових параметрів при виборі та проектуванні конвеєрної системи, оскільки воно визначає роль конвеєра в технологічній схемі, вимоги до його продуктивності, конструкції, системи приводу та рівня автоматизації. На підприємствах гірничо-металургійного комплексу використовується широкий спектр конвеєрів, кожен з яких виконує чітко визначене завдання в транспортному або технологічному процесі.

Функціональна класифікація включає п'ять основних груп: магістральні, технологічні, подаючі (живильні), розвантажувальні (накопичувальні), спеціальні конвеєри.

**Магістральні конвеєри**

Магістральні конвеєри — це високопродуктивні транспортні лінії великої протяжності, які забезпечують основний вантажопотік між ключовими виробничими ланками. Вони є «транспортними артеріями» ГМК.

Особливості магістральних конвеєрів:

- довжина траси може перевищувати кілька кілометрів;
- висока продуктивність (до 20 000 т/год);
- великі ширини стрічки (до 2000 мм і більше);
- складні системи натягу стрічки;
- багатоприводні привідні станції.

Приклади застосування:

- транспортування руди від кар'єрного забою до дробарок;
- доставка агломерату до доменних печей;
- транспортування концентрату на склад.

Технологічні конвеєри

Це конвеєри, які інтегровані безпосередньо в технологічні процеси та забезпечують переміщення матеріалу всередині одиничних машин або агрегатів.

Характерні риси:

- нерідко є частиною складної технологічної установки;
- утворюють єдиний технологічний цикл (наприклад, агломераційні стрічки);
- працюють у режимах, синхронізованих із технологічною лінією.

Приклади технологічних конвеєрів:

- агломераційні стрічки;
- конвеєри в печах термообробки;
- пластинчасті конвеєри у прокатних цехах.

Подаючі (живильні) конвеєри

Ціль цих конвеєрів — забезпечити рівномірну, контрольовану подачу матеріалу у дробарки, грохоти, сушарки, бункери або інше обладнання.

Особливості:

- невеликі довжини;
- стабілізований режим роботи;
- необхідність точної регуляції витрати матеріалу;
- малошвидкісний режим (0,1–0,5 м/с).

Застосування:

- живлення дробарок;
- дозуюча подача сипких матеріалів;
- подача руди на сортування.

Розвантажувальні та накопичувальні конвеєри

Ці конвеєри працюють у зоні розвантаження, накопичення або тимчасового зберігання матеріалів.

Функції:

- відведення матеріалу після технологічних агрегатів;
- формування складів сипких матеріалів;
- завантаження транспортних засобів;
- створення бункерних накопичень.

Приклади:

- конвеєри під дробарками;
- системи складування руди;
- радіальні конвеєри для формування конічних насипів.

## Спеціальні конвеєри

До спеціальних конвеєрів належать типи, адаптовані до специфічних виробничих умов або нестандартних задач.

Види спеціальних конвеєрів:

- стрічково-ланцюгові для транспортування великих фракцій;
- двострічкові для переміщення матеріалу під кутами до 90°;
- магнітні конвеєри для чорних металів;
- тепловитривалі конвеєри для гарячих матеріалів;
- конвеєри зі стрічками зі спеціальними профілями;
- вибухозахищені виконання для шахт.

## 6. Критерії вибору за функціональним призначенням

При визначенні типу конвеєра інженер враховує:

- характер виконуємої операції (транспортування, подача, накопичення);
- тип вантажу;
- необхідні продуктивність та швидкість;
- протяжність маршруту;
- наявність технологічних обмежень;
- потребу в автоматизації;
- теплові, абразивні або ударні впливи.

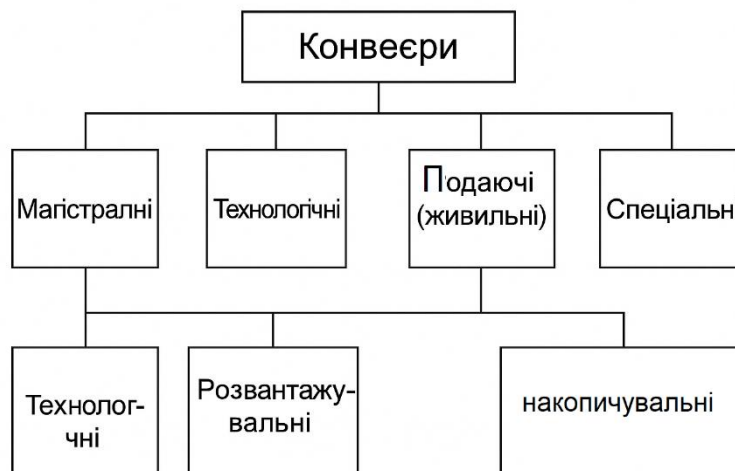


Рисунок 9.6 – Функціональні типи конвеєрів

Класифікація конвеєрів за мобільністю та конструктивним виконанням

Характер мобільності та спосіб конструктивного виконання конвеєра визначають можливість його використання у стаціонарних, тимчасових або змінних виробничих умовах. У гірничо-металургійному комплексі трапляються як повністю стаціонарні конвеєрні лінії, так і мобільні системи, що швидко переміщуються або перебудовуються залежно від технологічних потреб.

Усі конвеєри за мобільністю поділяють на п'ять основних груп: стаціонарні, пересувні, переносні, телескопічні, модульні.

#### Стаціонарні конвеєри

Стаціонарні конвеєри встановлюються на тривалий строк у конкретному місці та працюють у складі постійної технологічної інфраструктури. Це найпоширеніший тип у ГМК.

Особливості:

- встановлюються на металоконструкціях або бетонних основах;
- мають жорстку схему приводу та натягу;
- розраховані на великі продуктивності;
- високий рівень автоматизації;
- складні траси можуть включати кілька ламаних чи багаторівневих ділянок.

Типові сфери застосування:

- збагачувальні фабрики;
- агломераційні та доменні цехи;
- магістральні транспортні галереї.

#### Пересувні конвеєри

Пересувні конвеєри встановлюються на колісних або гусеничних платформах і можуть змінювати своє місце розташування без демонтажу.

Особливості:

- застосовуються при потребі регулярно змінювати місце розвантаження;
- мають автономні ходові механізми або буксируються технікою;
- часто використовуються у кар'єрах та портах;
- можуть працювати як частина складних перевантажувальних систем.

Використання:

- кар'єрні перевантажувальні пункти;
- пересувні дробильні комплекси.

#### Переносні конвеєри

Це легкі конвеєри, що складаються з окремих секцій, які легко переміщувати вручну або малогабаритною технікою. Використовуються для тимчасових робіт.

Особливості:

- невеликі довжини (6–20 м);
- невеликі продуктивності;
- компактні габарити;
- мінімальний привід та спрощене технічне обслуговування.

Застосування:

- допоміжні роботи у цехах;
- вантажні операції в складах;

- аварійні та ремонтні схеми транспортування.

#### Телескопічні конвеєри

Телескопічні конвеєри мають змінну довжину секцій, що дозволяє регулювати зону розвантаження.

#### Переваги:

- можливість роботи з транспортними засобами різної висоти;
- зручність у перевантажувальних операціях;
- економія площі.

#### Використання:

- термінали, склади, перевантажувальні майданчики;
- роботи з формування штабелів сипких матеріалів.

#### Модульні конвеєри

Модульні конвеєри складаються зі стандартних секцій, які можуть швидко замінюватися або перебудовуватися залежно від завдань виробництва.

#### Основні переваги:

- універсальність компоновки;
- швидкий монтаж і демонтаж;
- можливість адаптації під нові технологічні лінії;
- ремонтпридатність завдяки уніфікованим вузлам.

#### Приклади застосування:

- тимчасові виробничі лінії;
- реконструкція транспортних систем;
- мобільні ремонтні комплекси.

#### Ключові критерії вибору типу виконання

При визначенні мобільності конвеєра враховують:

- сталість або мінливість технологічних потоків;
- потребу в маневреності;
- довжину та складність траси;
- умови експлуатації (пил, волога, температура);
- вимоги до швидкого монтажу/демонтажу;
- рівень інвестиційних та експлуатаційних витрат.



Рисунок 9.7 – Класифікація конвеєрів за мобільністю та конструктивним виконанням (авторська схема)

#### Стрічкові конвеєри

Стрічкові конвеєри є найпоширенішим типом транспортних систем у гірничо-металургійному комплексі. Вони забезпечують високу продуктивність, можливість транспортування на значні відстані, низькі питомі енерговитрати та високу надійність у важких виробничих умовах. Конструкція стрічкового конвеєра складається з низки функціональних вузлів, кожен з яких виконує чітко визначену роль у забезпеченні стійкої, безперервної та ефективної роботи транспортної лінії.

#### Загальна конструкція стрічкового конвеєра

Загальна компоновка стрічкового конвеєра включає тягово-вантажонесучу стрічку, роликоопори, приводну станцію, натяжну станцію, рамну конструкцію (металоконструкції), завантажувальні та розвантажувальні вузли, а також системи керування і безпеки. Взаємодія цих елементів визначає технічні характеристики, продуктивність та експлуатаційну надійність обладнання.

Нижче подано розгорнуту характеристику основних елементів конструкції.

#### Стрічка як тяговий і вантажонесучий орган

Стрічка є ключовим елементом конвеєра, який одночасно виконує функції тягового органа і поверхні для транспортування вантажу. Вона сприймає механічні навантаження, удари, абразивний знос і дію температури.

Стрічки можуть бути:

- резинотканинними (тканинний каркас);

- резинокордними (синтетичні корди);
- металокордними (висока міцність при великих довжинах).

Основні параметри стрічки:

- ширина (400–2200 мм);
- кількість прокладок;
- товщина гумових шарів;
- клас міцності (від 160 до 4000 кН/м);
- тип жолоблення стрічки (20–35°).

Роликоопори

Роликоопори підтримують стрічку та забезпечують її правильне жолоблення. Вони зменшують опір руху та забезпечують стабільність траси.

Типи роликоопор:

- трикутні жолобчасті (основний тип для вантажної гілки);
- горизонтальні (для холостої гілки);
- поворотні роликоопори (для корекції сходу стрічки);
- ударні ролики (у зоні завантаження).

Відстань між роликооперами залежить від ширини й типу стрічки та становить 0,8–1,2 м.

Приводна станція

Приводна станція складається з електродвигуна, редуктора, з'єднувальних муфт і приводного барабана.

Її функції:

- передавання тягового зусилля на стрічку;
- забезпечення запуску, зупинки та регулення швидкості;
- стабілізація крутного моменту.

Типи приводів:

- електродвигун + редуктор (класичний варіант);
- мотор-барабан;
- багатопривідні системи для довгих трас;
- частотно-керовані приводи (VFD).

Натяжна станція

Натяжна станція забезпечує постійний натяг стрічки, необхідний для запобігання пробуксовуванню, зсувам, зминанню та перевантаженням.

Конструкції натягу:

- вантажний (гравітаційний);
- гвинтовий;
- гідравлічний;
- комбінований.

На довгих конвеєрах застосовують автоматичні натяжні пристрої, що компенсують термічні та динамічні деформації.

## 5. Приймально-завантажувальні вузли

Ці вузли сприймають максимальні динамічні навантаження.

Система включає:

- завантажувальний лоток;
- амортизаційні (ударні) ролики;
- бічні напрямні;
- гумові або поліуретанові плити для зниження зносу стрічки.

Неправильно спроектований або відрегульований завантажувальний вузол є основною причиною пошкоджень стрічки.

Каркас і металоконструкції

Усі вузли конвеєра кріпляться на металевій рамі, яка забезпечує жорсткість і точність роботи всієї системи.

Основні елементи:

- секції рами;
- опори (колони);
- настили;
- захисні галереї (для закритих конвеєрів).

Системи безпеки та контролю

Стрічковий конвеєр обладнується комплексом захисних пристроїв:

- датчики сходу стрічки;
- датчики пробуксовування;
- контроль швидкості;
- контроль натягу;
- температурні датчики підшипників роликів;
- аварійні троси зупинки;
- системи пожежної сигналізації.

Ці системи забезпечують безаварійну роботу й підвищують загальну надійність.

Узагальнена компоновка

Усі наведені вузли утворюють єдину механічну схему конвеєра, у якій стрічка дає замкнений цикл, огинаючи приводний і натяжний барабани, підтримується роликоопорами, а завантаження та розвантаження виконуються у спеціалізованих вузлах.

Наступним кроком буде створення повної технічної схеми цього елемента.

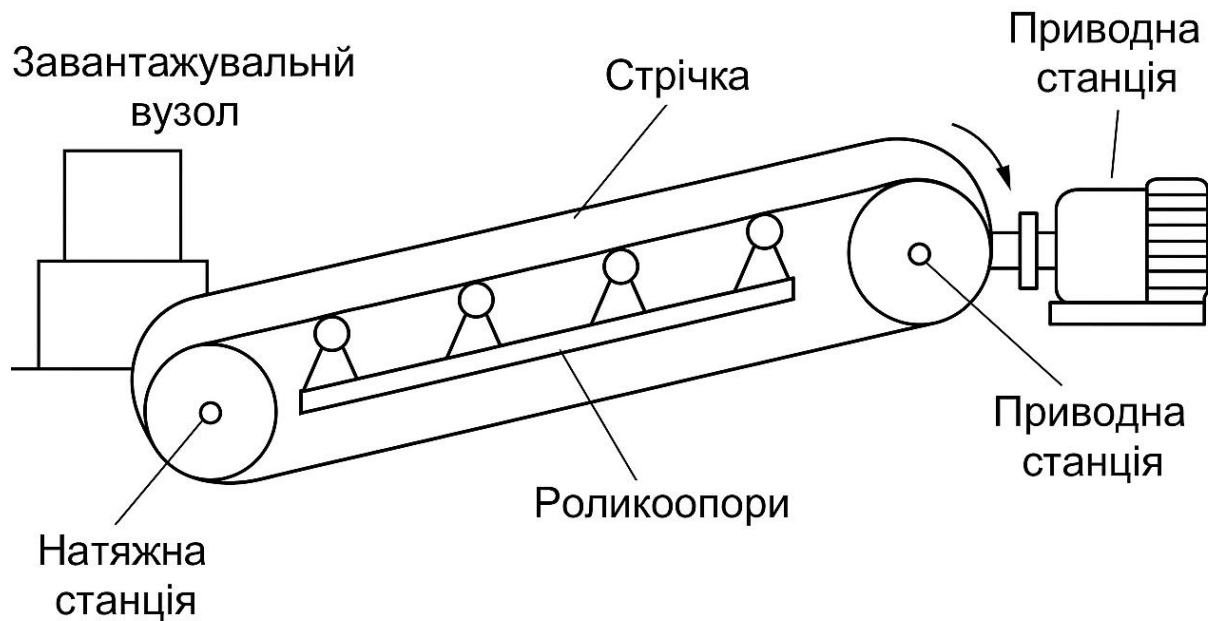


Рисунок 9.8 – Загальна конструкція стрічкового конвеєра

#### Стрічка стрічкового конвеєра

Стрічка є головним елементом стрічкового конвеєра, оскільки вона одночасно виконує функції тягового органа і вантажонесучої поверхні. Вона сприймає основні технологічні та експлуатаційні навантаження: розтяг, згин, удари, абразивний знос, тертя, нагрів, дію вологи та хімічних реагентів. Правильний вибір типу стрічки визначає ефективність і довговічність роботи всього конвеєра.

#### Загальні вимоги до стрічки

Стрічка повинна забезпечувати:

- достатню міцність на розрив;
- стійкість до абразивного зношування;
- поперечну жорсткість, необхідну для жолоблення;
- гнучкість для огинання барабанів;
- стійкість до дії температури та зовнішніх факторів;
- мінімальні питомі деформації.

Крім того, від стрічки вимагається стабільна робота при тривалих навантаженнях, що є критично важливим для магістральних систем ГМК.

#### Конструктивна будова стрічки

Стрічка конвеєра складається з трьох основних елементів:

Несучий каркас

Гумові (або полімерні) обкладки

Бокові краї (кромки) стрічки

– Несучий каркас

Каркас визначає міцність стрічки та формується з таких матеріалів:

- Тканинний каркас (багатошарові тканини з поліестеру, нейлону, віскози, бавовни).

Використовується для стрічок класів міцності 160–1000 кН/м.

- Синтетичний корд (резинокордні стрічки) (поліамідні, поліестерні нитки).

Дає високу гнучкість і низьке видовження.

- Металокорд (сталеві троси, що розташовані поздовжньо).

Застосовується для стрічок класу міцності 1000–4000 кН/м і довжиною до кількох кілометрів.

– Гумові обкладки

Обкладки захищають каркас і визначають зносостійкість стрічки.

Типи обкладок:

- Робоча обкладка (верхня).

Товщина: 6–25 мм

Приймає всі основні удари й тертя від матеріалу.

- Холоста обкладка (нижня)

Товщина: 2–8 мм

Забезпечує взаємодію зі стаціонарними роликками.

Суміші обкладок підбирають залежно від умов:

- абразивні матеріали → підвищена зносостійкість;
- гарячі матеріали → теплостійкі гуми;
- агресивні середовища → маслобензостійкі суміші;
- підвищена вологість → вологостійкі полімерні матеріали.

– Кромки стрічки

Кромки можуть бути:

- відкриті (тканинні);
- закриті гумовими кантом;
- армовані для стрічок важкого режиму.

Край стрічки має забезпечувати:

- стійкість до бокового зносу;
- збереження форми під жолобленням;
- мінімальні деформації від ударних навантажень.

Типи конвеєрних стрічок

Резинотканинні стрічки

Найпоширеніший тип для середніх навантажень.

Переваги:

- гнучкість;
- можливість ремонту у польових умовах;
- низька вартість.

Недоліки:

- обмежена міцність;
- значне видовження.

Резинокордні стрічки

Складаються з одного або кількох шарів корду.

Переваги:

- низьке видовження;

- підвищена міцність;
- стійкість до ударів.

Металокордні стрічки

Використовуються у найважчих умовах.

Переваги:

- найвища поздовжня міцність;
- здатність працювати на довгих трасах;
- мінімальне видовження (0,3–0,5%).

Недоліки:

- висока вартість;
- складні ремонтні операції.

Геометричні та механічні параметри стрічки

1. Ширина стрічки (B)

Стандартні значення: 400, 500, 650, 800, 1000, 1200, 1400, 1600, 1800, 2000 мм.

2. Товщина стрічки

Загальна товщина може становити 10–35 мм (залежно від призначення).

3. Клас міцності стрічки

Поздовжня міцність визначається у кН/м:  
160...4000 кН/м.

4. Поздовжнє видовження

Для якісних стрічок:

- тканинних — до 2%
- кордних — до 1%
- металокордних — до 0,5%

Типи профілювання та жолоблення

Типи профілів:

- плоскі;
- жолобчасті (20–35°);
- профільовані (з шевронами);
- зі стримуючими перегородками та боковими бортами.

Профільовані стрічки використовуються на нахилених конвеєрах.

Експлуатаційні вимоги та довговічність

На знос стрічки впливають:

- абразивність матеріалу;
- швидкість руху;
- стан роликоопор;
- якість роботи завантажувального вузла;
- правильне центрування та натяг.

Заміна стрічки є найбільш затратною операцією у всій системі, тому правильний вибір стрічки зменшує витрати на експлуатацію.

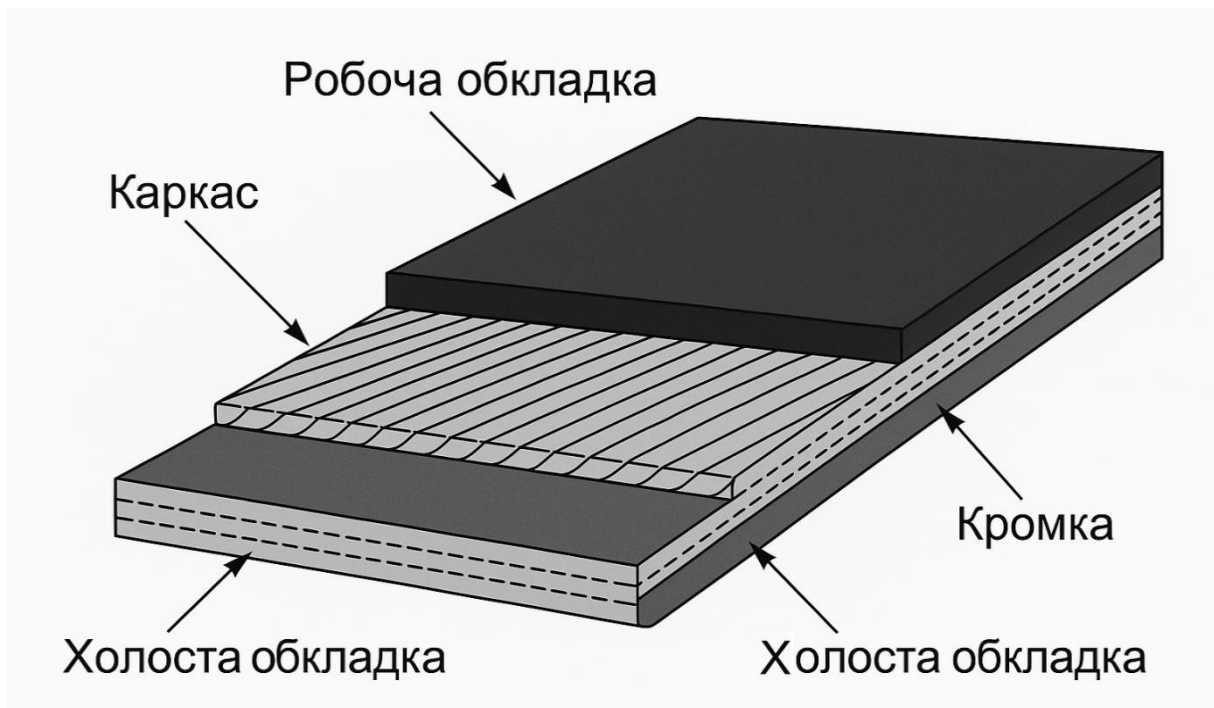


Рисунок 9.9 – Будова конвеєрної стрічки

#### Роликоопори стрічкового конвеєра

Роликоопори є системою опорних елементів, що забезпечують підтримку стрічки, формування необхідного профілю жолоблення, зниження опору руху та стабільність траси конвеєра. Вони є одним із найбільш чисельних та навантажених вузлів конвеєрної системи: на одному лише 100-метровому конвеєрі може бути встановлено понад 200 роликів різного типу.

Стан і якість роликоопор прямо впливають на:

- енерговитрати конвеєра;
- знос стрічки;
- стабільність центрування;
- рівень вібрацій;
- надійність та тривалість роботи всього конвеєра.

#### Класифікація роликоопор

Роликоопори поділяються за такими ознаками:

##### 1. За призначенням

- Жолобчасті (трикутні) – формують жолоб під кутом 20–35° для вантажної гілки.
- Горизонтальні (плоскі) – для підтримки холостої гілки.
- Ударні (амортизаційні) – у зоні завантаження, поглинають ударні навантаження.
- Поворотні (центрувальні) – запобігають сходу стрічки.
- Стабілізуючі ролики – обмежують рух стрічки у вертикальній площині.

##### 2. За конструкцією роликів

- суцільнометалеві;
- полімерні (поліуретан, поліетилен);
- комбіновані (сталь + полімерні кільця);
- ролики з підвищеною герметичністю підшипникових вузлів.

## Конструктивні особливості роликоопор

### 1. Жолобчасті роликоопори (трикутні)

Складаються з трьох роликів:

- центральний ролик підтримує основну масу матеріалу;
- два бокових ролики утворюють жолоблення стрічки.

Кути жолоблення:

- стандартні: 20°, 25°, 30°, 35°;
- для важких умов — до 45°.

### 2. Горизонтальні роликоопори

Використовуються для холостої гілки, де навантаження мінімальне.

Відстань між роликами зазвичай 2–3 рази більша, ніж у вантажній гілці.

### 3. Ударні роликоопори

Встановлюються під завантажувальним вузлом.

Особливості:

- ролики з товстою гумовою оболонкою;
- знижують удари до 60–80%;
- запобігають продавлюванню стрічки великими кусковими вантажами.

### 4. Поворотні роликоопори

Застосовуються для автоматичного центрування стрічки, якщо вона намагається зміститися вбік.

Конструктивний принцип:

• рамка роликоопори повертається під дією бокового зусилля стрічки → створює коригувальний момент → стрічка повертається в центр.

### 5. Стабілізуючі ролики

Розташовуються парами з обох боків стрічки та перешкоджають надмірним вертикальним коливанням.

## Основні параметри роликоопор

### 1. Діаметр роликів

Стандартні діаметри: Ø 63, 76, 89, 108, 133, 159, 194 мм.

Вибір залежить від:

- ширини стрічки;
- швидкості руху;
- навантаження;
- умов роботи.

### 2. Довжина ролика

Вибирається відповідно до ширини стрічки:

- для  $B = 800$  мм →  $L \approx 315\text{--}340$  мм (центральний), 250–280 мм (бокові);

- для  $B = 1200$  мм  $\rightarrow L \approx 400\text{--}450$  мм.

### 3. Відстань між роликоопорами

Зазвичай:

- вантажна гілка – 0,8...1,2 м;
- холоста гілка – 2,0...3,0 м.

Підшипникові вузли роликів

Критичний елемент, що визначає:

- ресурс роботи ролика,
- рівень шуму,
- опір обертанню.

Важливі параметри:

- тип підшипників (глибокого кочення);
- ступінь герметизації;
- система ущільнень (лабіринтна, контактна);
- мастильний матеріал (нерідко консистентне мастило з підвищеною в'язкістю).

Вплив роликоопор на роботу конвеєра

Несправні або забруднені ролики призводять до:

- збільшення енерговитрат до 15–20%;
- зменшення ресурсу стрічки;
- перегріву підшипників;
- сходу стрічки;
- підвищеного шуму та вібрацій.

Тому важливим є регулярний контроль:

- стану підшипникових вузлів;
- рівності встановлення роликоопор;
- центрування стрічки;
- амортизуючих елементів у зоні завантаження.



Рисунок 9.10 – Основні типи роликкоопор стрічкового конвеєра

### Барабани стрічкового конвеєра

Барабани є ключовими елементами, що забезпечують взаємодію стрічки з приводом, напрямом її руху, необхідний натяг та стабільну геометрію транспортного контуру. Вони сприймають значні радіальні й осьові навантаження, здійснюють обертання стрічки й формують замкнений контур конвеєрної системи.

Барабани працюють у важких умовах: підвищені пилові концентрації, ударні навантаження, дія вологи та високі натяги стрічки. Тому до них висуваються значні вимоги щодо міцності, точності виготовлення та довговічності.

### Класифікація барабанів

У стрічкових конвеєрах застосовують такі основні типи барабанів:

#### 1. Приводний барабан

Передає крутний момент від електроприводу до стрічки. Є найважливішим елементом, оскільки від зчеплення стрічки з приводним барабаном залежить безпосередня працездатність конвеєра.

#### 2. Натяжний барабан

Змінює натяг стрічки та компенсує її видовження. Працює у складі натяжної станції (вантажної, гвинтової, гідравлічної).

#### 3. Відхильні барабани

Служать для зміни напрямку руху стрічки, формування складних трас, збільшення кута охоплення приводного барабана.

#### 4. Опорні барабани

Додаткові барабани, що забезпечують підтримку або корекцію траєкторії руху стрічки на специфічних ділянках.

#### Конструктивні особливості барабанів

Барабан складається з таких основних елементів:

- труба (обичайка) – основа корпусу;
- диски (торцеві фланці) – передають навантаження від вала до обичайки;
- вал – передає крутний момент і закріплюється на підшипникових опорах;
- підшипникові опори – забезпечують обертання барабана;
- обгумування (накладка) – підвищує коефіцієнт зчеплення зі стрічкою.

##### 1. Обичайка барабана

Виготовляється зі сталі товщиною 8–20 мм залежно від натягу стрічки.

##### 2. Вал барабана

Підбирається за діаметром із урахуванням:

- радіальних навантажень,
- крутного моменту,
- довжини барабана.

Діаметр валів часто становить 120–300 мм.

##### 3. Торцеві диски

Сприймають вигинні та крутні навантаження. Виконуються з листової сталі 12–30 мм.

#### Обгумування барабанів

Обгумування необхідне для збільшення зчеплення стрічки з барабаном та зменшення її зносу. Розрізняють такі типи обгумування:

##### 1. Гладке обгумування

Використовується у стандартних умовах. Товщина гуми — 8–15 мм.

##### 2. Ромбовидне (шевронне) обгумування

Підвищує коефіцієнт тертя, застосовується при великих навантаженнях, високих натягах стрічки та у вологих умовах.

##### 3. Керамічне обгумування

Має вставки з кераміки, що значно підвищують зчеплення. Найефективніше у важких умовах та з металокордними стрічками.

#### Основні параметри барабанів

##### 1. Діаметр барабана

Визначається залежно від:

- типу стрічки,
- класу міцності,
- товщини стрічки,
- мінімального допустимого радіуса згину.

Стандартні діаметри барабанів: 250, 320, 400, 500, 630, 800, 1000, 1250 мм.

Для металокордних стрічок використовують барабани не менше 630–1000 мм.

## 2. Довжина барабана

Довжина залежить від ширини стрічки:

- для  $B = 800$  мм  $\rightarrow L \approx 950\text{--}1150$  мм;
- для  $B = 1200$  мм  $\rightarrow L \approx 1400\text{--}1600$  мм;
- для  $B = 1600$  мм  $\rightarrow L \approx 1850\text{--}2000$  мм.

## 3. Кут охоплення стрічкою

Важливий параметр для приводних барабанів.

Стандартні значення:

- $180^\circ\text{--}210^\circ$  — нормальні умови;
- до  $240^\circ$  — при використанні відхильних барабанів.

## Умови роботи та знос барабанів

Барабани працюють у складному навантажувальному режимі:

- значні динамічні сили при запуску;
- нерівномірний розподіл навантаження по ширині стрічки;
- абразивний вплив пилу;
- вплив вологи, температури та корозії.

Основні причини зносу:

- зниження якості обгумування;
- втрата концентричності;
- розбалансування;
- знос підшипників.

Своєчасний контроль цих параметрів значно збільшує термін служби обладнання.



Рисунок 9.11 – Основні типи барабанів стрічкового конвеєра

## Натяжні пристрої стрічкового конвеєра

Натяжний пристрій (натяжна станція) забезпечує створення необхідного попереднього натягу стрічки, який є критично важливим для ефективної роботи конвеєра. Правильний натяг гарантує:

- відсутність пробуксовування стрічки на приводному барабані;
- стабільність геометричної форми жолоба;
- рівномірність руху стрічки;
- зменшення вібрацій та ударних навантажень;
- зниження зносу стрічки та роликкоопор;
- роботу на довгих трасах без розриву або ослаблення стрічки.

Натяжні пристрої компенсують пружні, температурні та динамічні деформації стрічки, а також її повільне видовження під час тривалої експлуатації.

## Основні типи натяжних пристроїв

У стрічкових конвеєрах застосовують чотири основні типи натягу:

1. Вантажний (гравітаційний) натяг
2. Гвинтовий натяг
3. Гідравлічний натяг
4. Комбінований натяг

Кожен із них має власні конструктивні та експлуатаційні особливості.

## Вантажний (гравітаційний) натяг

Найпоширеніший і найефективніший тип, що використовується на середніх і довгих конвеєрах.

Принцип роботи:

Стрічка огинає натяжний барабан, який з'єднано з вантажною системою (проти вагою).

Вага вантажу створює постійне натяжне зусилля.

Переваги:

- автоматична компенсація деформацій стрічки;
- стабільний натяг у всіх режимах;
- простота конструкції;
- висока надійність.

Недоліки:

- потреба у значному просторі;
- велика маса вантажів;
- вимоги до жорсткості металоконструкцій.

Застосовується на магістральних конвеєрах ГМК довжиною до кількох сотень метрів.

## Гвинтовий натяг

Принцип роботи заснований на переміщенні натяжного вузла за допомогою гвинтового механізму (шпильок).

Переваги:

- проста конструкція;
- точне ручне регулювання;
- компактність.

Недоліки:

- не компенсує автоматично зміну довжини стрічки;
- неефективний для довгих конвеєрів;
- потребує зупинки конвеєра для регулювання.

Застосування:

короткі конвеєри, допоміжні лінії, живильники.

Гідравлічний натяг

Використовує гідроциліндри для створення і підтримання натягу.

Переваги:

- плавне регулювання натягу;
- можливість дистанційного керування;
- висока точність і стабільність.

Недоліки:

- складність системи;
- підвищені вимоги до обслуговування;
- чутливість до температури та витоків.

Застосовується на конвеєрах у важких гірничих умовах та на високо-технологічних лініях.

Комбіновані системи натягу

Поєднують гравітаційний та гідравлічний принципи.

Особливості:

- гравітаційний вантаж забезпечує базовий натяг;
- гідравлічний модуль — компенсацію різких динамічних змін;
- підвищена стабільність у перехідних режимах.

Використовуються на довгих конвеєрах з автоматизованими приводами.

Параметри натягу стрічки

Основним завданням інженера є визначення мінімального необхідного натягу, який гарантує роботу конвеєра без пробуксовування та надмірних деформацій.

Загальний натяг включає:

- натяг на приводному барабані;
- натяг у вантажній гілці;
- натяг у холостій гілці;
- динамічні добавки (під час пуску та гальмування).

Впливаючі фактори:

- довжина траси;
- тип стрічки (тканинна, кордна, металокордна);
- температурний режим;

- висота підйому;
- маса вантажу на стрічці.

Вибір типу натяжного пристрою

Вантажний натяг → магістральні та середні конвеєри

Гвинтовий натяг → короткі та допоміжні лінії

Гідравлічний натяг → високоточні та важконавантажені лінії

Комбінований натяг → складні довгі траси з динамічними режимами

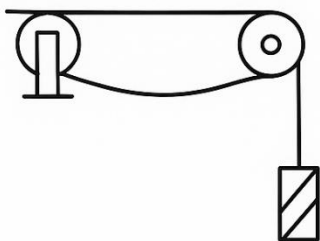
Умови роботи та технічне обслуговування

Натяжні пристрої вимагають періодичного огляду:

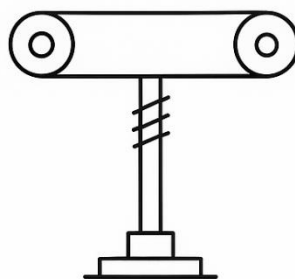
- перевірка натягу;
- контроль наявності люфтів;
- огляд тросів або гідросистеми;
- перевірка паралельності встановлення барабана;
- перевірка плавності ходу роликів у зоні натягу.

Неправильний натяг призводить до:

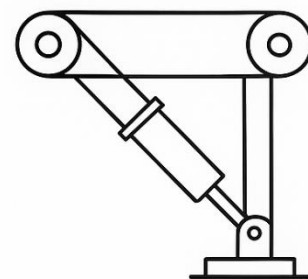
- пробуксовування стрічки;
- «провисання» холостої гілки;
- підвищених ударних навантажень на ролики;
- нерівного зносу стрічки;
- втрати продуктивності.



вантажний



гвинтовий



гідравлічний

Рисунок 9.12 – Схеми натяжних пристроїв стрічкового конвеєра

Завантажувальні та розвантажувальні вузли стрічкового конвеєра

Завантажувальний та розвантажувальний вузли є критично важливими елементами стрічкового конвеєра, оскільки саме в цих зонах виникають найбільші динамічні навантаження, інтенсивний абразивний знос та небезпека ушкодження стрічки. Правильне конструкторське виконання цих вузлів визначає ресурс стрічки, надійність вузлів, рівень пиловиділення та загальну продуктивність конвеєра.

Завантажувальний вузол стрічкового конвеєра

Завантажувальний вузол забезпечує приймання матеріалу з іншого обладнання — дробарки, грохота, бункера, живильника, транспортерного пересипу або технологічної лінії.

Основні складові:

1. Завантажувальний лоток

Призначений для направлення та рівномірного розподілу матеріалу на стрічку.

Вимоги:

- плавне спрямування потоку;
- мінімізація ударів і зсувних навантажень;
- використання зносостійких накладок (поліуретан, HARDOX).

2. Амортизаційні (ударні) ролики

Розташовані під лотком.

Функції:

- зменшення ударних навантажень на стрічку;
- запобігання деформаціям;
- підтримка стабільного жолоблення.

Крок між ударними роликами — 200–300 мм.

3. Напрямні борти

Запобігають висипанню матеріалу зі стрічки та стабілізують потік.

Варіанти виконання:

- гумові борти;
- сталеві борти зі зносостійкими вставками;
- борти з поліуретановими накладками.

4. Герметизуючі системи

Для зменшення пилоутворення використовують:

- ущільнювальні смуги;
- гнучкі накладки;
- закриті галереї.

5. Система очищення стрічки

Після завантаження обов'язковим елементом є перший та другий очищувач стрічки.

Проблеми в зоні завантаження

У зоні завантаження виникають такі типові проблеми:

- пробиття або порізи стрічки великими кусковими матеріалами;
- нерівномірний розподіл вантажу;
- знос бокових кромки;
- надмірне пиловиділення;
- зношування ударних роликів.

Для їх усунення застосовують:

- амортизаційні модулі;
- демпфуючі плити;
- підсилені стрічки з товстою робочою обкладкою.

Розвантажувальний вузол стрічкового конвеєра

Розвантаження може виконуватись:

- у торцевому барабані (пряме скидання);
- через проміжні скидачі або каретки;
- через поворотні розвантажувальні системи.

1. Торцевий розвантажувальний вузол

Найпоширеніший тип.

Принцип роботи:

- стрічка огинає барабан → вантаж сходить у гравітаційному потоці → потрапляє у приймальний бункер або пересип.

2. Відхильні розвантажувачі

Дозволяють розвантажувати матеріал до кінця конвеєра.

Види:

- поворотні відхильники;
- пересувні каретки;
- скидачі різняка.

3. Розподільні каретки

Розподіляють вантаж по декількох бункерах або секціях складування.

Очищення стрічки в зоні розвантаження

Зоною інтенсивного налипання матеріалу є зворотня сторона стрічки.

Для очищення застосовують:

1. Основний скребковий очищувач

Встановлюється під приводним барабаном.

2. Вторинний очищувач

Забезпечує додаткове очищення після первинного.

3. Бортові очисники

Очищують бокові кромки.

Вплив конструкції вузлів на роботу конвеєра

Неправильне виконання або регулювання завантаження/розвантаження призводить до:

- швидкого зносу стрічки;
- збільшення втрат матеріалу;
- нерівномірного навантаження;
- перевантаження приводу;
- підвищених енерговитрат.

Рекомендації:

- застосування ударних модулів;
- закриті пересипи;
- оптимізація кута падіння;
- мінімізація висоти вільного падіння вантажу.

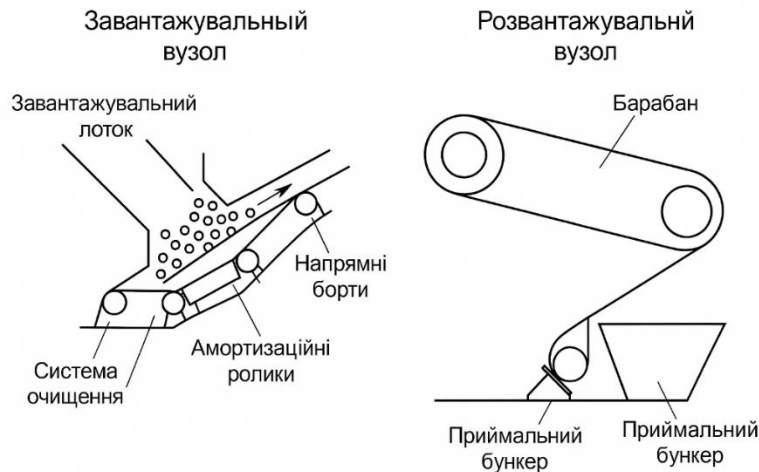


Рисунок 9.13 – Схеми завантажувального та розвантажувального вузлів стрічкового конвеєра

### Рамна конструкція та металоконструкції стрічкового конвеєра

Рамна конструкція (металоконструкції) стрічкового конвеєра забезпечує просторову жорсткість, точність геометрії та правильне розташування всіх вузлів конвеєрної системи. Вона виконує роль несучого каркаса, на якому монтуються роликоопори, барабани, привідна та натяжна станції, захисні огороження, галереї та обслуговувальні майданчики.

Надійність металоконструкцій визначає стабільність роботи конвеєра, мінімізацію вібрацій та зношування стрічки, а також забезпечує безпеку персоналу.

### Загальна характеристика рамної конструкції

Рамна частина складається з окремих секцій (основних, перехідних, спеціальних), що формують підтримуючу основу стрічкового контуру.

Основні елементи:

- несучі рами секцій;
- опорні стійки та колони;
- настили для обслуговування;
- галереї та тунелі;
- огороження та захисні кожухи;
- кронштейни, підсилювачі, траверси.

### Секції рами

Рамна конструкція складається з уніфікованих секцій, довжина яких зазвичай становить:

- 1,0 м
- 1,5 м
- 2,0 м
- 2,5 м

Секції з'єднуються між собою фланцями або хомутами. Точність стикування визначає рівність ходу стрічки.

## 1. Типи секцій:

1. Прямі секції — більша частина траси, встановлюються на опори.
2. Поворотні секції — застосовуються в криволінійних конвеєрах.
3. Перехідні секції — для зміни кута нахилу.
4. Секції під завантаження — посилені для встановлення ударних роликкоопор.
5. Секції з обслуговувальними настилами — у зонах приводних і натяжних станцій.

## Опорні конструкції

Опори забезпечують установку всього конвеєра на ґрунт або фундамент.

### Типи опор:

- стаціонарні бетонні фундаменти;
- сталеві колонні опори;
- підвісні кронштейни (у галереях або тунелях);
- пересувні опори (для мобільних конвеєрів).

Висота опор залежить від:

- конфігурації технологічного майданчика;
- висоти розвантажувального вузла;
- умов обслуговування;
- можливих перетинів з іншими комунікаціями.

## Галереї та захисні конструкції

У ГМК поширені закриті конвеєрні галереї, що захищають стрічку та роликкоопори від атмосферних впливів і зменшують пиловиділення.

### Елементи галереї:

- металевий тунель (коробчаста конструкція);
- настили та трапи обслуговування;
- освітлення та вентиляція;
- аварійні виходи;
- огороження для безпеки.

Закриті галереї особливо важливі при транспортуванні пилових та гарячих матеріалів.

## Вимоги до міцності та стабільності

Металоконструкції повинні витримувати:

- вагу стрічки з матеріалом;
- навантаження від роликкоопор;
- вібрації від приводу;
- вітрові та снігові навантаження (для зовнішніх трас);
- температурні деформації;
- аварійні навантаження при заклинюванні стрічки.

Точність виготовлення металоконструкцій критично важлива для:

- центрування стрічки;
- стабільності роликоопор;
- рівномірності зносу;
- мінімізації опору руху.

### Способи монтажу металоконструкцій

#### 1. Блочний монтаж

Секції конвеєра збираються на землі та піднімаються кранами на проектне місце.

#### 2. Монтаж на місці

Секції встановлюються безпосередньо в галереї або цеху.

#### 3. Модульно-секційний монтаж

Застосовується у важкодоступних місцях або при реконструкції ліній.

### Технічне обслуговування рамної конструкції

До основних операцій належать:

- перевірка затяжки болтових з'єднань;
- контроль вертикальності та рівності опор;
- огляд на наявність корозії;
- перевірка геометрії секцій;
- огляд захисних кожухів;
- ремонт зношених настилів.

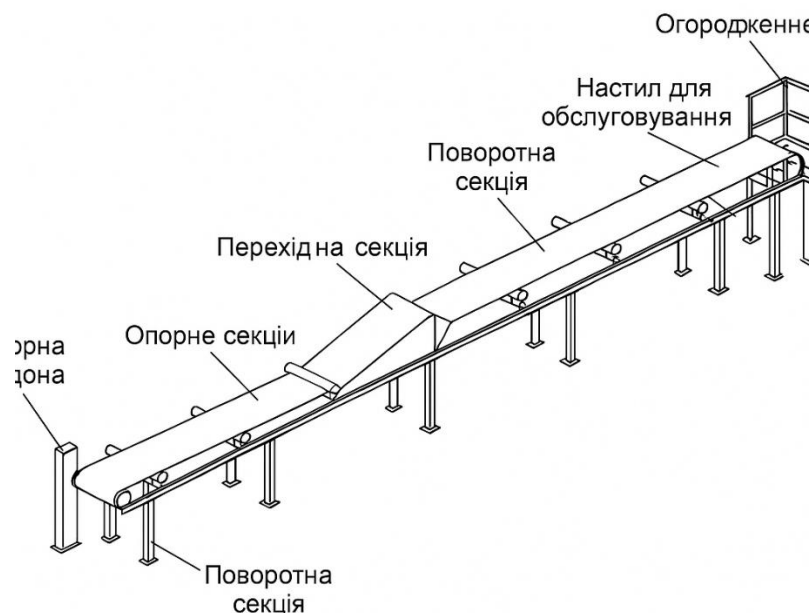


Рисунок 9.14 – Основні елементи рамної конструкції стрічкового конвеєра

### Системи безпеки та контролю стрічкових конвеєрів

Системи безпеки та контролю стрічкового конвеєра відіграють ключову роль у забезпеченні безаварійної, стабільної та ефективної роботи всієї транспортної системи. Конвеєри гірничо-металургійного комплексу

працюють у важких умовах з підвищеним ризиком пошкодження стрічки, роликкоопор та приводів, тому сучасні вимоги передбачають обов'язкове застосування комплексу засобів контролю стану й захисту.

Система безпеки виконує такі основні функції:

- запобігання аварійним ситуаціям;
- раннє виявлення несправностей;
- автоматичне вимкнення в небезпечних умовах;
- запобігання сходу стрічки або її пробуксовуванню;
- захист персоналу;
- зменшення простоїв та витрат на ремонт.

Основні елементи системи безпеки

Система складається з комплексу механічних, електричних, електронних та автоматичних пристроїв.

#### 1. Датчики сходу стрічки

Встановлюються на обидві сторони конвеєра та реагують на відхилення стрічки від осі.

Функції:

- запобігання пошкодженню стрічки об раму;
- зменшення зношування бортів;
- аварійна зупинка при критичному сході.

Типи датчиків:

- роликові;
- важільні;
- безконтактні.

#### 2. Датчики швидкості стрічки

Контролюють лінійну швидкість та сигналізують про її відхилення від заданої.

Виявляють такі несправності:

- пробуксовування стрічки;
- просідання натягу;
- вихід з ладу приводу;
- заклинювання роликів.

#### 3. Датчики пробуксовування приводного барабана

Реагують на різницю між швидкістю барабана та швидкістю стрічки.

Пробуксовування може призвести до:

- перегріву стрічки;
- пожежі;
- руйнування обгумування барабана.

#### 4. Тросові аварійні вимикачі

Розташовані вздовж усього конвеєра.

Функції:

- аварійна зупинка на будь-якій ділянці;
- можливість доступу до зупинки у великій галереї;
- підвищення безпеки персоналу.

#### 5. Температурні датчики підшипників роликотопор

Підвищення температури підшипника означає:

- внутрішнє тертя;
- руйнування мастила;
- заклинювання ролика.

Своєчасне виявлення перегріву запобігає пожежам.

#### 6. Системи очищення стрічки

Не є датчиками, але виконують функцію безпеки.

Складаються з:

- основного скребкового очистника;
- вторинного очистника;
- бічних очистників.

Запобігають налипанню, що може спричинити сходи стрічки.

#### 7. Датчики натягу стрічки

Встановлюються на приводному або натяжному барабанах.

Контролюють:

- розтяг стрічки;
- роботу натяжної станції;
- аварії у натяжному барабані.

#### Захист приводу та електрообладнання

Система включає:

- захист від перевантаження електродвигуна;
- контролери струму та моменту;
- плавний пуск (частотний або тиристорний);
- захист редуктора та муфт від перевантажень;
- контроль перегріву електродвигуна.

#### Системи безпеки для персоналу

##### 1. Огородження рухомих частин

Приводні барабани, ролики, ремені й муфти обов'язково закриваються кожухами.

##### 2. Аварійні виходи та трапи

Забезпечують безпечний доступ у галереях і тунелях.

##### 3. Пожежна сигналізація

Установлюється:

- у зоні приводної станції;
- над стрічкою;
- у закритих галереях.

Використовують:

- теплові датчики;
- ультрафіолетові датчики;
- газоаналізатори.

Автоматизовані системи моніторингу

Сучасні конвеєри можуть оснащуватися комплексними системами контролю:

- тепловізійний контроль барабанів;
- віброконтроль підшипникових вузлів;
- онлайн-аналітика енерговитрат;
- системи SCADA;
- передавання даних на пульти керування.

Значення систем безпеки для експлуатації

Повний комплекс заходів дозволяє:

- зменшити простої до 40%;
- збільшити ресурс стрічки у 1,5–2 рази;
- запобігти пожежам;
- контролювати стан роликоопор;
- підвищити рівень безпеки персоналу.

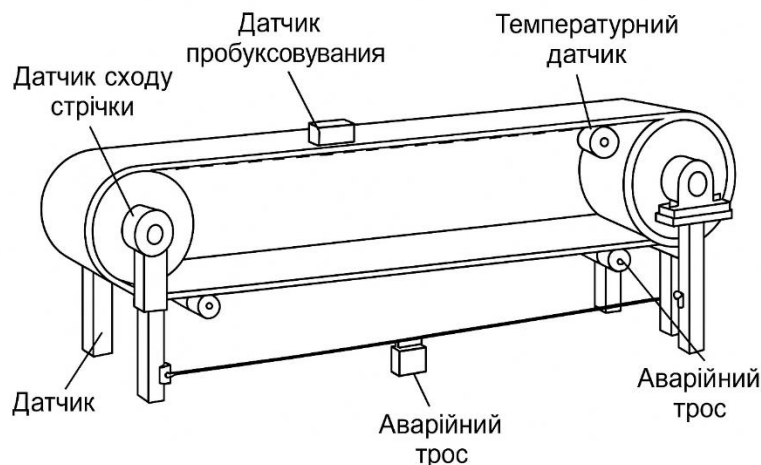


Рисунок 9.15 – Основні елементи систем безпеки стрічкового конвеєра

Приводи стрічкових конвеєрів

Привід є одним із ключових елементів конвеєра, оскільки забезпечує рух стрічки і визначає його продуктивність, енергоефективність та надійність. До приводу пред'являються вимоги високої довговічності, стійкості до перевантажень, плавного запуску та можливості роботи в автоматизованих системах.

Привідні станції стрічкових конвеєрів складаються з таких основних елементів:

- електродвигун;

- редуктор;
- з'єднувальні муфти;
- приводний барабан;
- гальмівна система (за потреби);
- механізми контролю та захисту.

Привод може бути одинарним, здвоєним або багатопривідним — залежно від довжини конвеєра й величини тягового зусилля.

Типи приводів стрічкових конвеєрів

1. Привід з електродвигуном та редуктором (класична схема)

Найпоширеніший варіант у ГМК.

Склад:

- асинхронний електродвигун;
- редуктор (циліндричний, конічно-циліндричний, черв'ячний);
- муфта (еластична, фланцева);
- приводний барабан.

Переваги:

- висока надійність;
- ремонтпридатність;
- універсальність застосування.

Недоліки:

- потреба в точному centruванні;
- передача ударних навантажень через муфти.

2. Мотор-барабани

Електродвигун і редуктор інтегровані всередині барабана.

Переваги:

- компактність;
- мінімум зовнішніх вузлів;
- відсутність відкритих муфт;
- підвищена безпека.

Недоліки:

- обмежена потужність;
- складність ремонту;
- чутливість до перегріву.

Застосування:

- короткі конвеєри;
- складські та допоміжні лінії.

3. Багатопривідні системи

Для довгих конвеєрів (до 2–3 км) використовують:

- два приводи на одному барабані;
- рознесені приводи (на різних барабанах, на різних ділянках конвеєра);

- синхронізовані приводні станції із частотним регулюванням.

Мета:

- зменшення тягових зусиль;

- зменшення навантаження на стрічку;
- компенсація різних режимів.

### Електродвигуни приводів конвеєрів

Найчастіше застосовуються асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором:

Характеристики:

- потужність: 5...400 кВт;
- частота обертання: 750–1500 об/хв;
- виконання: пилозахищене, вибухозахищене, тепловитривале.

Також використовують двигуни:

- з фазним ротором (для важких пусків);
- синхронні двигуни (на довгих трасах).

У сучасних системах — частотні перетворювачі для плавного запуску.

### Редуктори приводів

Типи редукторів:

- циліндричні — найпоширеніші;
- конічно-циліндричні — для великих моментів;
- планетарні редуктори — компактні та високонадійні.

Вимоги:

- жорсткість корпусу;
- високий коефіцієнт корисної дії;
- надійне мастило;
- стійкість до ударних навантажень.

### Муфти приводів

Муфти з'єднують електродвигун, редуктор і приводний барабан.

Типи муфт:

- еластичні;
- фланцеві;
- зубчасті;
- пружні;
- гідравлічні (захист від перевантаження).

Муфти компенсують:

- осьові зміщення;
- кутові перекоси;
- ударні навантаження.

### Гальмівні системи

На конвеєрах з великим ухилом встановлюють гальма:

- дискові;
- барабанні;
- електромагнітні;

- гідравлічні.

Призначення:

- утримання стрічки при зупинці;
- попередження мимовільного руху;
- безпечне обслуговування.

Частотне регулювання (VFD)

Сучасні приводи часто оснащені частотними перетворювачами.

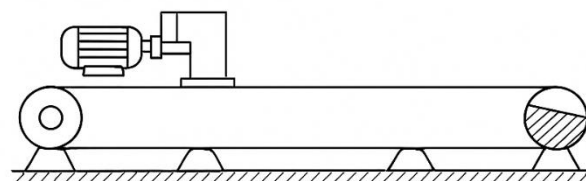
Переваги:

- плавний пуск;
- зменшення пускових струмів;
- регулювання швидкості;
- енергозбереження;
- захист від аварійних режимів.

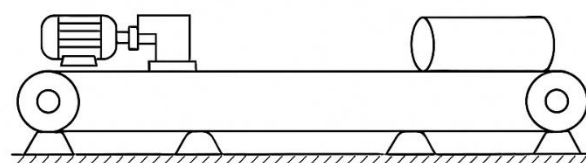
7. Автоматизація приводу

До автоматизації входить:

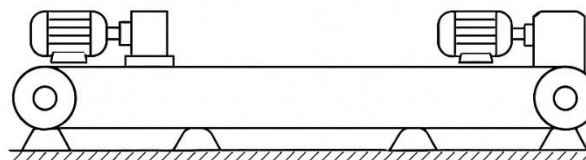
- контроль струму двигуна;
- контроль моменту;
- температурний захист;
- SCADA-моніторинг;
- синхронізація приводів.



а Класичний привід



б Мотор-барабан



с Багатопривідна система

Рисунок 9.16 – Основні схеми приводів стрічкових конвеєрів

Розрахунок потужності електроприводу стрічкового конвеєра

Розрахунок потужності електроприводу стрічкового конвеєра є ключовим етапом інжинірингу транспортної системи. Від правильного визначення потужності залежить працездатність у робочих і пускових режимах,

надійність приводу, енергоефективність та рівень механічних навантажень на стрічку, барабани й роликоопори.

Метою розрахунку є визначення необхідної потужності двигуна з урахуванням:

- опору руху порожньої стрічки;
- опору руху стрічки з вантажем;
- опору в місцях завантаження/розвантаження;
- додаткових опорів у горизонтальних і нахилених ділянках;
- підйому вантажу на висоту;
- коефіцієнтів умов роботи.

Основні сили, що діють на стрічковий конвеєр

До основних сил відносяться:

- тягове зусилля стрічки (  $S$  )
- опір обертанню роликоопор
- опір переміщенню вантажу
- опір у барабанах і напрямних
- додаткові опори на ділянках завантаження
- сила тяжіння вантажу на похилих ділянках

Для зручності розрахунків усі опори поділяють на:

1. основні опори руху
2. додаткові опори
3. опори підйому.

Основне тягове зусилля

Основне тягове зусилля визначається за формулою:

$$S_0 = (W_H + W_L) \cdot L$$

де:

$W_H$  — питомий опір руху вантажної гілки, Н/м;

$W_L$  — питомий опір холостої гілки, Н/м;

$L$  — довжина конвеєра, м.

Питомі опори визначаються за нормативними значеннями, залежно

від:

- маси вантажу на 1 м стрічки;
- типу роликоопор;
- стану роликів;
- ширини стрічки;
- швидкості руху.

Опір підйому (для нахилених конвеєрів)

Якщо конвеєр має кут нахилу  $\alpha$ , то необхідно врахувати силу підйому вантажу:

$$S_\alpha = g \cdot Q \cdot \sin \alpha$$

де:

Q — масова продуктивність у кг/м;  
g — прискорення вільного падіння.

Додаткові опори

Додаткові опори включають:

- опір завантаження
- опір відхильних барабанів
- опір очищувачів
- опір центрирувальних пристроїв
- опір перехідних секцій

У сумі:

$$S_d = k_d \cdot S_0$$

де

$k_d$  — коефіцієнт додаткових опорів (0,03–0,1 залежно від конструкції).

Загальне тягове зусилля

Повне тягове зусилля:

$$S = S_0 + S_\alpha + S_d$$

Розрахунок необхідної потужності приводу

Потужність приводу визначають за формулою:

$$P = \frac{S \cdot v}{1000 \cdot \eta}$$

де:

v — швидкість руху стрічки, м/с;

$\eta$  — ККД приводу (0,85–0,92).

У результаті отримують потужність приводу в кВт.

Розрахунок у пусковому режимі

Пусковий момент є критичним.

Пускове тягове зусилля:

$$S_\Pi = k_\Pi \cdot S$$

де

$k_\Pi$  — коефіцієнт перевантаження (1,2–2,5).

Пускова потужність:

$$P_\Pi = \frac{S_\Pi \cdot v}{1000}$$

При розрахунку двигуна використовують:

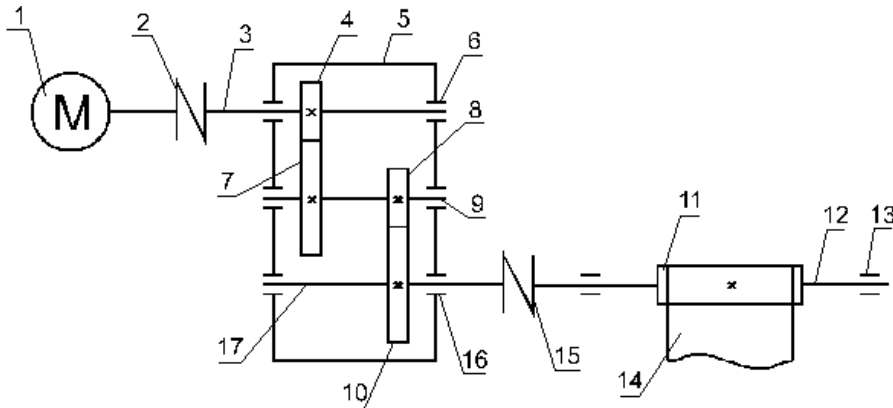
- графіки пускового моменту;
- кратність пускового струму;

- умови частотного регулювання.

Вибір двигуна

Після розрахунку  $P$  та  $P_{II}$  вибирають електродвигун:

- відповідної потужності (із запасом 10–20%);
- відповідної частоти обертання;
- потрібної конструкції (IP-клас, вибухозахист, теплостійкість).



1. Електродвигун (мотор); 2. Муфта; 3. Вал швидкохідний; 4. Вал-шестерня швидкохідної щаблі; 5. Корпус редуктора; 6. Підшипниковий вузол з глухою кришкою; 7. Зубчасте колесо швидкохідної щаблі; 8. Вал-шестерня тихохідної щаблі; 9. Вал-шестерня проміжна; 10. Зубчасте колесо тихохідної щаблі; 11. Барабан приводний стрічкового конвеєра; 12. Вал приводного барабана; 13. Опора підшипникова приводного барабана; 14. Стрічка конвеєра; 15. Муфта.

Рисунок 9.17 –Електромеханічне обладнання стрічкового конвеєру

Системи автоматизації та контролю стрічкових конвеєрів

Системи автоматизації стрічкових конвеєрів є важливим елементом сучасних транспортних комплексів гірничо-металургійного виробництва. Вони забезпечують безпечну, стабільну, економічну та безперервну роботу конвеєрних ліній, дозволяють оперативно керувати режимами пуску/зупинки, контролювати стан механічних вузлів, попереджати аварії та інтегрувати конвеєри у загальні системи технологічного керування підприємства.

Призначення систем автоматизації

Система автоматизації виконує такі основні функції:

- контроль режимів роботи (струм двигуна, швидкість стрічки, натяг, температура підшипників, сход стрічки);
- плавний пуск та зупинка конвеєра;
- захист від аварійних ситуацій (перевантаження, пробуксування, перегрів, падіння швидкості);
- координація роботи конвеєрів у складі технологічної траси;
- діагностика стану вузлів у реальному часі;

- запис журналу аварій та параметрів;
- передавання даних до SCADA/АСУТП.

Склад сучасної системи автоматизації конвеєра

Типовий комплекс автоматизації включає:

- Контролер (PLC)

Функції PLC:

- керування запуском/зупинкою;
- обробка сигналів датчиків;
- контроль струму і моменту приводу;
- логіка захистів;
- взаємодія з іншими конвеєрами на лінії.

Найчастіше використовується семейство:

- Siemens S7-1200 / S7-1500,
- Schneider Electric M340 / M580,
- Allen-Bradley CompactLogix / ControlLogix.
- Частотний перетворювач (VFD)

Забезпечує:

- плавний розгін і гальмування;
- регулювання швидкості;
- захист двигуна;
- зниження пускових струмів;
- компенсацію ковзання.

VFD значно зменшує ударні навантаження на стрічку та механічні вузли.

- Датчики та первинні перетворювачі

Групи датчиків:

1. Датчики швидкості стрічки (тахогенератор, імпульсний датчик)
2. Датчики сходу стрічки (роликові/важільні обмежувачі)
3. Датчики пробуксовування (порівняння швидкості барабана і стрічки)
4. Температурні датчики підшипників (термопари, терморезистори)
5. Датчики натягу стрічки (тензодатчики, гідравлічні датчики тиску)
6. Датчики рівня/наявності матеріалу (ультразвукові, лазерні, вагові)
7. Вагові стрічкові дозатори Для вимірювання продуктивності та дозування матеріалу.
8. Аварійні тросові вимикачі По всій довжині конвеєра.

- Системи очищення та безпеки

Хоч не є електронними датчиками, але входять до автоматизації:

- основний та вторинний очищувачі;
- датчики положення очищувачів;

- системи зрошення (для зменшення пилу);
- пожежна сигналізація.

- Модулі зв'язку та інтеграція

Підтримувані протоколи:

- Modbus TCP / RTU,
- Profinet,
- EtherNet/IP,
- Profibus,
- CAN,
- HART (для деяких датчиків).

Використовуються для інтеграції у:

- SCADA;
- MES-рівень;
- ERP-зв'язки (опційно).

Алгоритми роботи системи автоматизації

Логіка пуску конвеєра

1. Автоматична перевірка:
  - наявності натягу;
  - відсутності аварій;
  - очищення стрічки;
  - готовності VFD.
2. Плавний розгін (VFD).
3. Вихід на номінальну швидкість.

Логіка зупинки

1. Зупинка подачі матеріалу.
2. Робота в режимі "вибігу" для очищення стрічки.
3. Зниження швидкості.
4. Плавна зупинка.
5. Активація гальм (при потребі).

Логіка аварійної зупинки

Спрацьовує при:

- сході стрічки;
- пробуксовуванні;
- перевантаженні приводу;
- перегріві підшипників;
- падінні швидкості стрічки;
- натяг стрічки нижче норми;
- спрацюванні тросового аварійного вимикача.

Зупинка миттєва — привід відключається, активується гальмо.

Системи контролю технічного стану (Condition Monitoring)

Сучасні GMK-підприємства впроваджують:

- віброконтроль роlikоопор і барабанів;
- тепловізійний контроль приводних вузлів;
- системи контролю напруження стрічки;
- онлайн-моніторинг продуктивності;
- виявлення дефектів стрічки (лазерні сканери).

## 5. SCADA-системи

SCADA забезпечує:

- візуалізацію конвеєра в реальному часі;
- історію аварій;
- графіки швидкості, струму, навантаження;
- дистанційне керування;
- інтеграцію з іншими конвеєрами.

Типові SCADA:

- WinCC,
- Indusoft,
- Ignition,
- Wonderware.

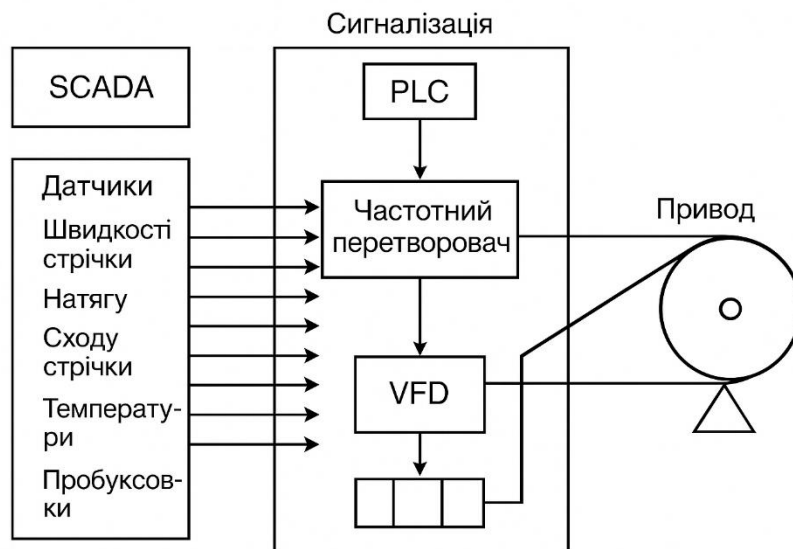


Рисунок 9.18 – Узагальнена схема автоматизації стрічкового конвеєра

Проблеми зносу, енерговитрат і шляхи їх зменшення

Стрічкові конвеєри працюють у важких умовах гірничо-металургійної промисловості, що супроводжується інтенсивними процесами зношування стрічки, роlikоопор, барабанів і металоконструкцій. Одночасно значна частина енергії витрачається на подолання механічних опор, деформацій та маси вантажу. Тому зменшення зносу та енерговитрат є пріоритетним напрямом інжинірингу конвеєрних систем.

## Основні види зносу стрічкового конвеєра

Знос стрічки є однією з найдорожчих проблем експлуатації конвеєрів, оскільки вартість заміни стрічки може становити 40–60% вартості всього обладнання.

- Абразивний знос

Виникає при транспортуванні руд, агломерату, коксу, шлаку. Основна причина — тертя частинок по поверхні стрічки.

- Ударний знос

Пошкодження у зоні завантаження:

- пробивання стрічки великими шматками;
- деформації від падіння матеріалу;
- порізи та розриви.
- Знос від температури

При транспортуванні гарячих матеріалів (агломерат, кокс, шлак).

- Знос від перекосів стрічки

Сходи стрічки викликають:

- зношування бортів;
- деформації каркаса;
- прискорений знос роликів.
- Знос через забруднення

Налипання матеріалу на барабани призводить до:

- пробуксовування;
- нерівномірного натягу;
- локальних перегрівів.

## Основні джерела енерговитрат

Енерговитрати стрічкових конвеєрів формуються під впливом механічних втрат та режимів роботи.

1. Опір руху роликкоопор.

Бруд, несправні підшипники, перекоси → +10–25% витрат.

2. Деформація стрічки на роликах.

Особливо актуально для важких стрічок і високих вантажів.

3. Опори у завантажувальному вузлі.

Ударні навантаження + нерівномірність розподілу вантажу.

4. Пробуксовування на приводному барабані.

Витрати зростають у 2–3 рази.

5. Додаткові опори через забруднення.

Пил, налипання на холостій гілці, сторонні предмети → 5–15%.

## Методи зменшення зносу

1. Оптимізація конструкції завантажувального вузла

- амортизаційні модулі;
- зносостійкі плити;
- обмеження висоти падіння.

## 2. Центрування стрічки

- використання поворотних роликоопор;
- регулювання рами;
- контроль паралельності барабанів.

## 3. Вибір відповідного типу стрічки

Для агресивних матеріалів — стрічки:

- теплостійкі;
- маслобензостійкі;
- металокардні.

## 4. Використання якісного обгумування барабанів

Керамічне обгумування зменшує знос та пробуксовування.

## 5. Регулярне очищення стрічки

Покращує роботу барабанів та знижує енерговитрати.

## Методи зменшення енерговитрат

### 1. Використання енергоефективних роликоопор

- ролики з низьким моментом опору;
- самопідшипники високого класу точності;
- полімерні ролики (зниження маси).

### 2. Частотне регулювання швидкості

Знижує витрати на 10–15% у неповному навантаженні.

### 3. Оптимізація траси конвеєра

Плавні переходи, мінімізація кутів перегину.

### 4. Використання багатопривідних схем

Зменшує натяг стрічки та опори.

### 5. Підтримання оптимального натягу

Запобігає пробуксовуванню.

## Системи діагностики та предиктивного контролю

Сучасні технології дозволяють оцінювати стан конвеєра в реальному

часі:

- тепловізійні сканери стрічки;
- акустичні системи діагностики;
- лазерні сканери геометрії;
- системи відеоаналізу для виявлення пошкоджень;
- віброаналіз роликоопор.

Це дозволяє запобігати аваріям та продовжувати строк служби стрічки.

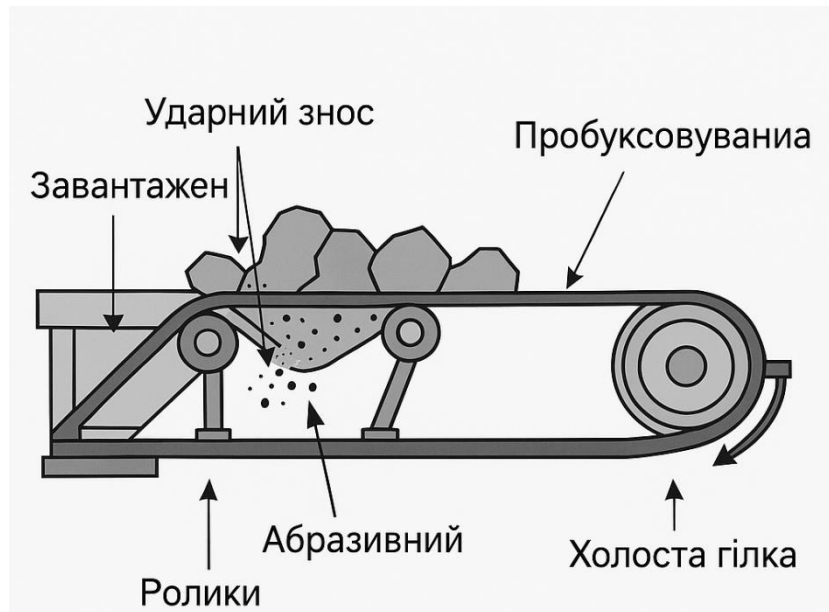


Рисунок 9.19 – Основні джерела зносу та енерговтрат стрічкового конвеєра

### Модернізація стрічкових конвеєрних систем

Модернізація конвеєрних систем у гірничо-металургійному комплексі є одним з ключових напрямів підвищення ефективності виробництва, зменшення енерговитрат, покращення надійності та продовження ресурсу обладнання. З огляду на високу капіталоемність конвеєрної інфраструктури, модернізація дозволяє досягти значного економічного ефекту без необхідності повної заміни обладнання.

### Основні напрями модернізації

Модернізація охоплює механічні, електротехнічні та інформаційні компоненти системи.

#### Модернізація механічної частини

1. Заміна роликкоопор на енергоефективні
  - полімерні ролики з низьким опором обертання;
  - ролики з підвищеною герметизацією підшипників;
  - ролики з вбудованою діагностикою.
2. Оновлення стрічки
  - металокордні стрічки з підвищеною міцністю;
  - стрічки з теплостійким або маслобензостійким покриттям;
  - профільовані стрічки для конвеєрів з великим ухилом.
3. Модернізація барабанів
  - керамічне обгумування для збільшення зчеплення;
  - барабани з балансуванням;
  - використання барабанів з високою корозійною стійкістю.
4. Вдосконалення систем завантаження
  - амортизуючі модулі;

- регульовані напрямні;
- зносостійкі матеріали (HARDOX, поліуретан).

#### Модернізація приводних систем

##### 1. Встановлення частотних перетворювачів (VFD)

###### Переваги:

- плавний пуск;
- зменшення пускових навантажень;
- енергозбереження до 20%;
- гнучке регулювання продуктивності.

##### 2. Заміна електродвигунів на високоефективні (IE3–IE4)

Це зменшує споживання електроенергії до 5–10%.

##### 3. Перехід до багатопривідних схем

###### Зменшує:

- натяги в стрічці;
- опір руху;
- зношування барабанів.

#### Модернізація систем автоматизації

##### 1. Встановлення сучасних PLC і SCADA

- краща діагностика;
- дистанційний моніторинг;
- централізоване керування.

##### 2. Впровадження систем предиктивної діагностики

- тепловізійний моніторинг;
- акустична діагностика стрічки;
- виявлення дефектів у реальному часі.

##### 3. Інтелектуальні датчики

- датчики з власними мікропроцесорами;
- онлайн вимірювання навантаження;
- лазерні сканери центрування.

#### Модернізація конструктивних елементів

##### 1. Закриті конвеєрні галереї

###### Зменшують:

- пиловиділення;
- корозію;
- вплив клімату на стрічку.

##### 2. Використання модульних металоконструкцій

Прискорює монтаж і ремонт.

##### 3. Оптимізація траси конвеєра

- збільшення радіусів кривизни;
- зменшення кількості відхильних барабанів.

Енергоефективні рішення.

Енергоефективність — ключовий фактор модернізації.

Основні технології:

- приводи з VFD;
- полімерні роликоопори;
- стрічки з низьким опором деформації;
- оптимізація режимів роботи через SCADA;
- автоматичне регулювання швидкості при неповному завантаженні.

Модернізація з урахуванням цифрових технологій (Industry 4.0)

Можливості:

- цифрові двійники (Digital Twin) конвеєрних систем;
- прогнозування аварій і зносу;
- аналіз енерговитрат;
- автоматичний вибір оптимальної швидкості.

Економічний ефект модернізації

Типові результати:

- зменшення енерговитрат на 10–35%;
- збільшення ресурсу стрічки у 1,5–2,5 рази;
- зменшення простоїв у 2–4 рази;
- підвищення безпеки на 30–50%.

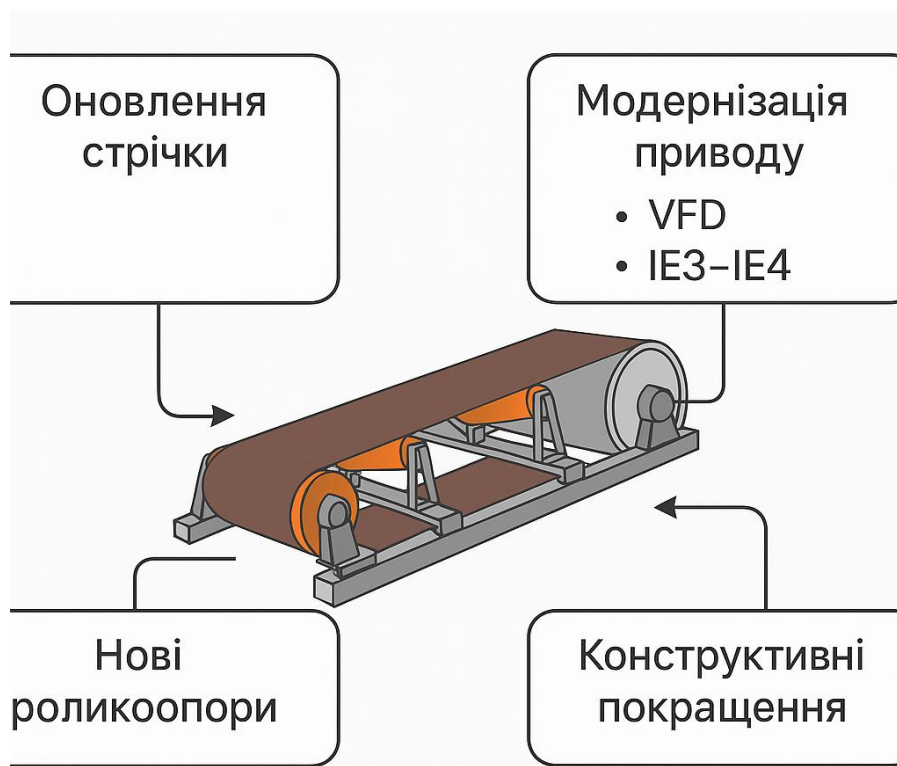


Рисунок 9.20 – Основні напрями модернізації стрічкових конвеєрів

## Висновки.

Стрічкові конвеєрні системи займають провідне місце у транспортній інфраструктурі гірничо-металургійного комплексу, забезпечуючи безперервне переміщення великих обсягів матеріалу з високою енергоефективністю та низькою собівартістю. У процесі інжинірингу важливо враховувати конструктивні особливості, параметри стрічки, роликоопор, барабанів, приводів, систем натягу та завантажувально-розвантажувальних вузлів.

### Основні висновки:

1. Стрічковий конвеєр — складна інженерна система, де кожен вузол впливає на продуктивність, енерговитрати та надійність.
2. Стрічка є найвартіснішим елементом, її вибір має ґрунтуватися на характері вантажу, умовах роботи та кутах трасування.
3. Роликоопори та барабани визначають плавність роботи, рівномірність навантаження та втрати енергії.
4. Привідні станції повинні забезпечувати стабільну передачу моменту, надійний запуск і захист від аварійних режимів.
5. Системи автоматизації та контролю є критичним елементом сучасних конвеєрів: вони знижують ризики, забезпечують безпеку персоналу та підвищують енергоефективність.
6. Основні втрати енергії виникають через тертя, неякісні ролики, погане центрування стрічки та пробуксовування приводу.
7. Модернізація конвеєрів дозволяє суттєво зменшити експлуатаційні витрати, підвищити ресурс стрічки, мінімізувати знос механічних елементів і забезпечити інтеграцію з цифровими системами Industry 4.0.
8. Розрахунок потужності приводу має виконуватися з урахуванням динамічних і пускових навантажень, геометрії траси та фізико-механічних параметрів вантажу.

Таким чином, інжиніринг конвеєрних систем — це комплексне завдання, що поєднує механіку, електропривод, автоматизацію, експлуатацію та інженерію надійності.

### Контрольні питання до теми 9.

1. Які основні класи конвеєрів застосовуються у гірничо-металургійному комплексі?
2. Яку роль відіграє стрічковий конвеєр у внутрішньоцехових і магістральних транспортних системах?
3. Які основні елементи входять до конструкції стрічкового конвеєра?
4. Які види конвеєрних стрічок використовуються у ГМК та їх основні відмінності?
5. Як будова каркаса стрічки впливає на її міцність та довговічність?
6. Які типи роликоопор використовуються на стрічкових конвеєрах і для чого вони призначені?

7. У чому полягає функція приводного барабана та чому важливе обгумування його поверхні?
8. Які типи натяжних пристроїв застосовуються і які їхні особливості?
9. Які основні проблеми виникають у зоні завантаження конвеєра?
10. Як визначається основне тягове зусилля стрічкового конвеєра?
11. Які сили діють на конвеєр на похилій ділянці?
12. Які показники враховуються при розрахунку потужності електроприводу?
13. Чому у довгих конвеєрах застосовують багатопривідні схеми?
14. Які задачі виконує частотний перетворювач у приводі конвеєра?
15. Які датчики входять до системи автоматизації стрічкового конвеєра?
16. Які основні джерела зносу стрічки?
17. Як впливають роликсопори на енерговитрати конвеєрної системи?
18. Які методи зменшення енерговитрат стрічкового конвеєра існують?
19. Які сучасні технології використовуються для модернізації конвеєрних систем?
20. Який економічний ефект може бути отриманий у результаті модернізації стрічкових конвеєрів?

Використана література.

1. Козуб Ю.Г., Маслійов С.В. Підйомно-транспортні машини : підручник. Старобільськ : вид-во ДЗ „ЛНУ імені Тараса Шевченка”, 2018. 277 с.
2. Жигулін О. А., Махмудов І. І., Жигуліна Н. О. Підйомно-транспортні машини : навчальний посібник. Ніжин, 2020. 150 с.
3. Транспортні системи електромеханічних комплексів : конспект лекцій / уклад.: С.В. Зайченко, В.А. Побігайло, В.Г. Дубовик. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 136 с.

## ТЕМА 10. ІНЖИНІРИНГ ВАНТАЖОПІДІЙМАЛЬНИХ МЕХАНІЗМІВ.

Види вантажопідіймальних механізмів (крани, талі, лебідки). Особливості вибору електроприводів з урахуванням навантажень. Динаміка руху та режими гальмування. Захист і системи автоматизації. Вимоги до безпеки та надійності. Модернізація кранового обладнання.

Вантажопідіймальні механізми є ключовими елементами транспортно-технологічних систем промислових підприємств, зокрема гірничо-металургійного комплексу. До основних типів належать крани (мостові, козлові, баштові, порталні), талі (електричні та ручні) і лебідки. Класифікація здійснюється за призначенням, вантажопідіймальністю, режимом роботи, конструктивним виконанням і рівнем автоматизації.

Загальні відомості про крани.

Мостові крани.

Мостові крани призначені для виконання вантажно-розвантажувальних і транспортувальних операцій у цехах промислових підприємств, на монтажних і контейнерних майданчиках та на відкритих і закритих складах.

Механізми мостового крана забезпечують три робочі рухи: підймання-опускання вантажу, пересування вантажного візка та пересування крана в цілому.

Крани пересуваються по рейковій колії, яка розміщена на колонах цеху під дахом, перекиваючи всю ширину виробничого приміщення. Вони займають мало корисного простору і обслуговують майже всю площу цеху. На відкритих складах, монтажних і контейнерних майданчиках застосовують мостові крани спеціальної конструкції (козлові крани), в яких міст змонтований на двох вертикальних опорах і пересувається на колесах по рейковій колії, прокладеній на землі.

Залежно від кількості основних (проміжних) балок у мостовій конструкції крани поділяють на одно-, дво- та багатобалкові.

Гакові однобалкові крани, в яких як вантажний візок застосовують самохідний електричний таль (кран-балки), поділяють на два конструктивних типи: опорні вантажністю до 25 т і підвісні вантажністю до 15 т.

---Вантажність мостових дво- та багатобалкових кранів досягає 1250 т, проліт 2...34 м, швидкості: підймання вантажу до 2 м/с, пересування візка - 0,17...6,0, пересування моста 0,66...2,5 м/с. Найпоширеніші мостові крани вантажністю 5...320 т, особливо 5-тонні крани, які становлять 20%, і 10-тонні 17% усієї кількості кранів. Вісімдесят відсотків усіх кранів мають режим роботи 4-ї групи (середній режим). Технічні вимоги і робочі параметри всіх без винятку кранів та окремих механізмів їх регламентуються відповідними державними (галузевими) стандартами.

Мостові крани (рис. 10.1) складаються з таких вузлів: вантажний візок 3 (рис. 10.2), який включає підймальний механізм 9, вантажозахоплювальний пристрій 6 і механізм пересування візка 10; міст 4, що



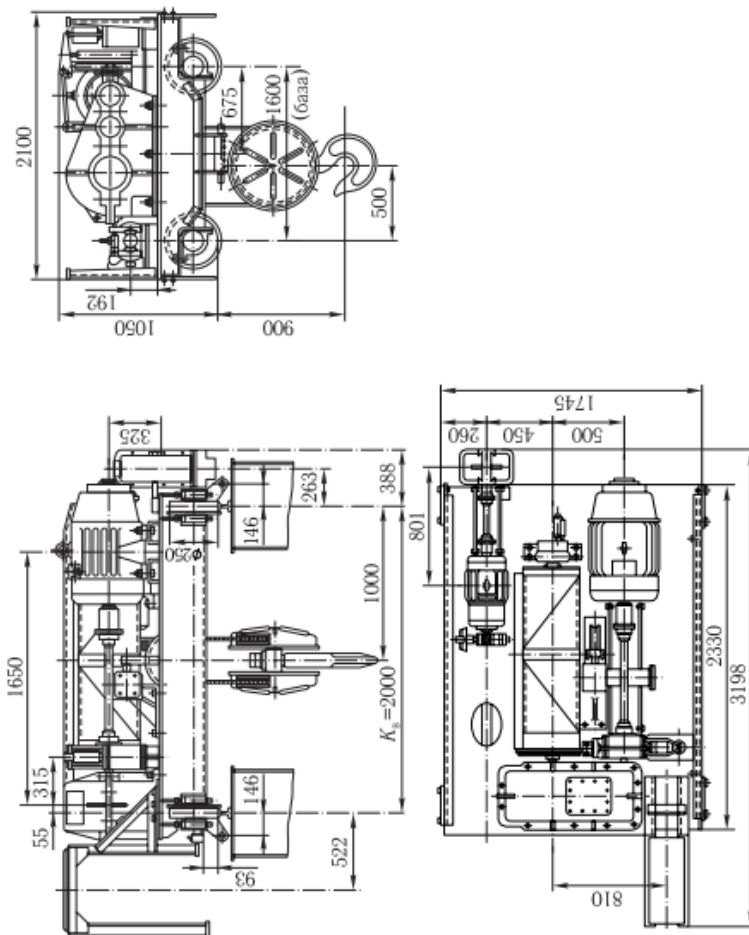


Рисунок 10.2 - Схема вантажного візка.

Розраховують мостовий кран призначення для роботи за такими вихідними даними: вантажність  $Q$  т; довжина прольоту  $L$  м; висота підняття вантажу (максимальна)  $H$  м; швидкості, м/с: підймання вантажу  $v_1$ ; пересування візка  $v_2$ ; пересування крана  $v_3$ ; група режиму роботи механізмів. Міст крана — двобалковий зварний. Електродвигуни — тип живлення (постійний, змінний струм, рівень напруги).

#### Крани з поворотною колоною

Такі крани (рис. 10.3) складаються з поворотної колони 2, стріли 3 з вантажним поліспастом 4, механізму підймання вантажу 1, механізму повертання крана 5. Колонна опирається на один упорний 7 і два радіальних -6 і 8 підшипники. Стріла підтримується жорсткою тягою або поліспастом.

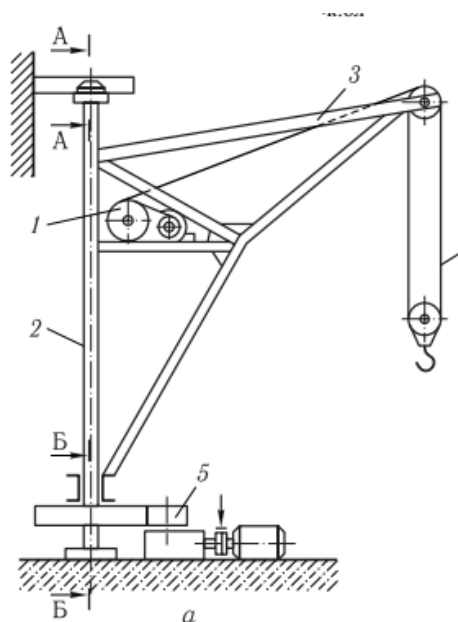


Рисунок 10.3 – Загальний вигляд поворотного стрілового крана з поворотною колоною.

Поворотні крани за цією схемою називають стаціонарними стріловими кранами з поворотною колоною. Їх встановлюють стаціонарно, на самохідних або несамохідних візках і застосовують для завантажування автомобілів, залізничних вагонів, у механічних цехах, на будівництві тощо.

Розраховують поворотний стріловий кран з поворотною колоною за такими вихідними даними: кран загального призначення експлуатується на майданчику, вантажність крана  $m_B$  кг, виліт стріли  $L$  м, висота підняття вантажу  $H$  м, швидкість підймання  $v_1$  м/с, частота обертання крана  $n_k$  об/хв, група режиму роботи %.

#### Баштовий кран.

Баштовий кран — це Г-подібна поворотна конструкція, в якій стріла прикріплена до верхньої частини колони-башти. Така конструкція стоїть окремо, має достатній підстріловий простір, дає можливість обслуговувати кілька об'єктів або майданчиків з однієї стоянки, просто пересуватися крану по крановій колії, забезпечує хороший огляд майданчика кранівником і т. ін.

Недоліками слід вважати значну тривалість і трудомісткість монтажу, демонтажу, перебазування та укладання кранової колії.

За конструкцією башт розрізняють крани з поворотною (КБ-160.2, КБ-503, КБ-308А) і неповотною (КБ-674А, КБ-573) баштами, за типом стріл - з підйимальною (КБ-160.2, КБ-405...), балковою (КБ-674А, КБ-573, БК-180...) та шарнірно з'єднаною (КБ-160.4) стрілами. Крани з поворотною баштою можуть бути з нижнім або верхнім розміщенням противаги.

За способом установлення баштові крани поділяють на стаціонарні, самопідйимальні та пересувні. За типом ходового пристрою пересувні

баштові крани бувають рейкові, автомобільні, пневмоколісні, гусеничні та крокуючі.

Баштові крани з поворотною баштою і нижнім розміщенням протитваги стійкіші, оскільки центр ваги у них розміщений нижче, а згинальний момент, який діє на башту від ваги вантажу, компенсується відповідним запасуванням канатів.

Кожна модель крана має власну марку. В марку крана крім літер КБ (кран баштовий) входять цифри (всього чотири) і літери (всього три). Перша цифра означає порядковий номер групи за вантажним моментом, другі дві є порядковими номерами реєстрації кранів за реєстром. При цьому цифри від 01 до 69 присвоюють кранам з поворотною баштою, а з 71 по 99 — з неповоротною. Після крапки зазначають номер виконання, що відрізняється від базової моделі, наприклад, довжиною стріли, висотою підняття, максимальною вантажністю. Для базових моделей призначена цифра «0», яку не пишуть. Далі пишуть літеру чергової модернізації (А, Б, В), а потім - кліматичне виконання (ХЛ— для холодного, Т-тропічного і ТВ — тропічного вологого клімату); для помірного клімату літеру не пишуть.

Кран з поворотною баштою і нижнім розміщенням протитваги складається (рис. 10.4) з неповоротної рами 13, поворотної платформи 12, башти 10, стріли 8, підстрілка 6, механізмів: 1 -пересування крана, 5 - підймання вантажу, 3- змінення кута нахилу стріли, 11 — механізму повертання, стрілового поліспада 4, гакової підвіски 7, непривідного ходового візка 14, кабіни кранівника 9, баласту 2.

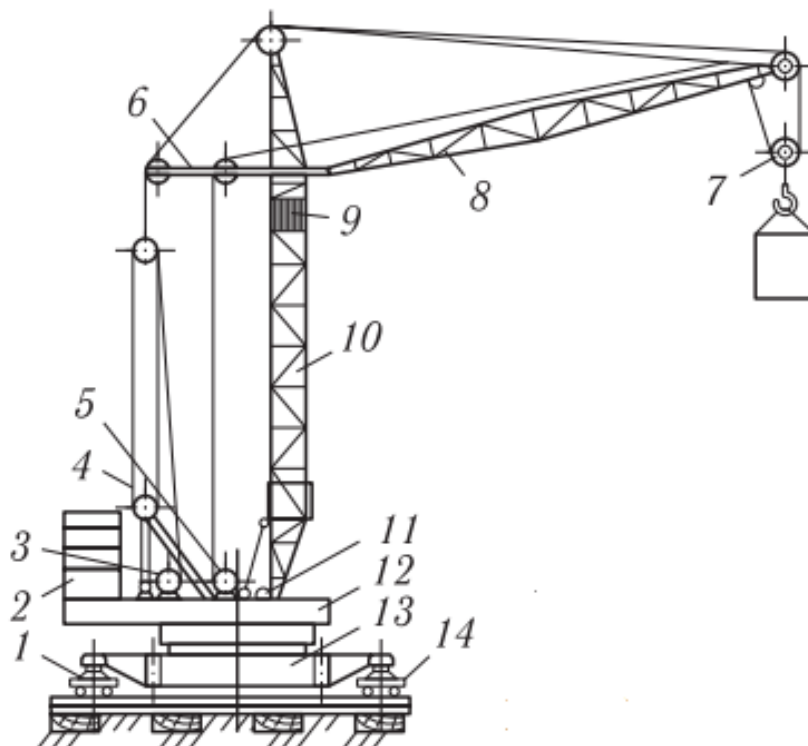


Рисунок 10.4 - Схема баштового крана з поворотною баштою

Розрахунки будівельних пересувних баштових кранів треба виконувати відповідно до стандарту з дотриманням умов міцності й стійкості в разі одночасної дії найбільших навантажень, які очікуються за весь строк служби крана.

Режими роботи.

Режим роботи безпосередньо впливає на:

- тип електродвигуна (загальнопромисловий / крановий);
- перевантажувальну здатність;
- тепловий режим;
- вибір гальм;
- допустиму кількість пусків за годину.

Робота вантажопідіймальних машин і окремих механізмів їх має циклічний характер з частими пусками, зупинками і реверсами.

Загалом робочий цикл крана складається з окремих операцій:

- захоплення вантажу та його підймання;
- переміщення вантажу в просторі, яке супроводжується, залежно від типу крана, переміщеннями вантажного візка і самого крана або по-вертанням стріли та зміненням її вильоту;
- опускання вантажу і звільнення вантажозахоплювального пристрою;
- повернення на вихідну позицію.

Тривалість робочого циклу  $T_c$  визначається з урахуванням можливого суміщення окремих операцій як між собою, так і з операцією підймання або опускання вантажу.

Режим роботи це комплексна оцінка робочого стану механізму або машини в цілому, яка відображає характер та інтенсивність навантажень, що діють на нього, за значенням і в часі.

До останнього часу для кранових механізмів і кранів у цілому встановлено такі режими роботи: Р — ручний, Л — легкий, С — середній, В — важкий, ДВ — дуже важкий.

Таблиці 10.1 Група режиму роботи кранів.

Група режиму за ISO	Клас використання (кількість робочих циклів за строк служби)	Характер навантаження (спектр навантаження)	Типова характеристика експлуатації
A1	Дуже малий	Дуже легкий	Дуже рідкісні підйоми, малі вантажі, епізодична експлуатація
A2	Малий	Легкий	Нерегулярна робота, вантажі значно менші за номінальні
A3	Середній	Помірний	Регулярна робота з частковим навантаженням
A4	Середньо-високий	Середній	Часті цикли, змінне навантаження

A5	Високий	Важкий	Інтенсивна експлуатація з великими вантажами
A6	Дуже високий	Дуже важкий	Дуже інтенсивна робота, часті пуски та гальмування
A7	Надвисокий	Надважкий	Майже безперервна експлуатація з навантаженнями, близькими до номінальних
A8	Екстремальний	Екстремальний	Безперервна технологічна робота в надважких умовах

Типові приклади застосування

- A1–A2 — ремонтні та допоміжні талі;
- A3–A4 — мостові крани загальноцехового призначення;
- A5–A6 — ковшові, завалочні, розливні крани ГМК;
- A7–A8 — спеціальні технологічні крани безперервної дії.

Таблиця 10.2 Вплив групи режиму ISO на вибір електропривода

Параметр	Вплив режиму ISO
Тип електродвигуна	Загальнопромисловий → крановий
Перевантажувальна здатність	Зростає від A1 до A8
Тепловий режим	Посилюється з ростом групи
Кількість пусків	Значно збільшується
Тип гальм	Робоче → аварійне + резервне
Система керування	Контакторна → частотна

Для режимів **A5–A8** стандарт ISO вимагає:

- підвищеного коефіцієнта запасу;
- примусового охолодження двигунів;
- застосування частотного керування;
- систем контролю перевантаження та діагностики.

**Інтегральний клас режиму роботи крана** є ключовим показником, що відображає реальні умови експлуатації та визначає технічні вимоги до всіх елементів вантажопідіймального механізму. Його коректне визначення є обов'язковою умовою безпечної, надійної та довговічної роботи кранового обладнання.

Інтегральний клас режиму роботи визначає:

- тип та конструктивне виконання електродвигуна;
- допустиму перевантажувальну здатність;
- тепловий режим електропривода;
- допустиму кількість пусків і реверсів;
- вимоги до гальмівних систем;
- клас міцності металоконструкцій;
- необхідність резервування та автоматизації.

Чим **вищий інтегральний клас**, тим **жорсткіші вимоги** до елементів крана.

Таблиця 10.3 - Визначення інтегрального класу режиму роботи крана

Клас навантаження	N <sub>1</sub> 20 000–100 000 циклів	N <sub>2</sub> 100 000–500 000 циклів	N <sub>3</sub> 500 000–2 000 000 циклів	N <sub>4</sub> Понад 2 000 000 циклів	Середній коефіцієнт ефективного навантаження k
L <sub>1</sub>	A	B	C	D	0,35 – 0,53
L <sub>2</sub>	B	C	D	E	0,53 – 0,67
L <sub>3</sub>	C	D	E	F	0,67 – 0,85
L <sub>4</sub>	D	E	F	F	0,85 – 1,00

Класи навантаження.

- L<sub>1</sub> — робота переважно з дуже малими вантажами; номінальне навантаження піднімається винятково.
- L<sub>2</sub> — рідкісне піднімання номінального навантаження; типові навантаження — до  $\approx 1/3$  номінального.
- L<sub>3</sub> — часта робота з навантаженнями в межах  $\approx 1/3$ – $2/3$  номінального.
- L<sub>4</sub> — регулярна робота з навантаженнями, близькими до номінальних.

Класи кількості робочих циклів

- N<sub>1</sub> — від 20 000 до 100 000 циклів (*нерегулярна, епізодична експлуатація з тривалими простоями*)
- N<sub>2</sub> — від 100 000 до 500 000 циклів (*регулярна робота в переривчастому режимі*)
- N<sub>3</sub> — від 500 000 до 2 000 000 циклів (*регулярна робота в безперервному режимі*)
- N<sub>4</sub> — понад 2 000 000 циклів (*інтенсивна, важка безперервна експлуатація*)

Згідно з підходом ISO 4301-1 / ISO 4301-5, класи кількості робочих циклів (N<sub>1</sub>–N<sub>4</sub>) визначаються не за календарний рік і не за зміну, а за весь розрахунковий строк служби вантажопідіймального механізму.

Один робочий цикл включає:

- захоплення вантажу;
- підйом;
- переміщення;
- опускання;
- зняття навантаження.

Кожен завершений підйом вантажу = 1 цикл.

Таблиця 10.4 Типові орієнтири строку служби (інженерна практика)

Тип експлуатації	Орієнтовний строк служби
Легкий режим (A1–A2)	20–30 років
Середній режим (A3–A4)	15–25 років
Важкий режим (A5–A6)	10–20 років
Дуже важкий (A7–A8)	8–15 років

Режим роботи (крім ручного) конкретного механізму визначається за сукупністю значень коефіцієнтів: використання вантажності механізму, добового та річного використання, відносної тривалості вмикання.

Коефіцієнт використання вантажності механізму

$$K_B = \frac{Q_{cp}}{2},$$

де  $Q_{cp}$  - середня вантажність механізму за досліджуваний період часу (зміну, добу, рік), т;  $Q$  - номінальна вантажність, т.

Коефіцієнт річного використання

$$K_p = D/365$$

де  $D$  - кількість днів за рік, фактично відпрацьованих механізмом.

Коефіцієнт добового використання

$$K_d = \tau/24$$

де  $\tau$  - кількість годин за добу, фактично відпрацьованих механізмом. Відносна тривалість вмикання, %,

$$TB = t_p/T \cdot 100$$

де  $t_p$  тривалість роботи механізму, с, за заданий період часу  $T$ , с: для механізмів  $T = 1$  год, для електрообладнання  $T = 10$  хв.

На підставі числових значень наведених вище коефіцієнтів, залежно від ступеня навантаженості та використання механізмів і кранів у цілому визначають їхні режими роботи, причому режим роботи крана в цілому визначають за режимом роботи його вантажопідіймального механізму (табл. 10.5).

Таблиця 10.5 Орієнтовні показники режимів роботи механізмів кранів

Режим роботи	TB, %	$K_B$	$K_d$	$K_p$
Легкий (Л)	15	0,25 ... 0,50	—	—
Середній (С)	25	0,50 ... 0,75	0,33	0,50
Важкий (В)	40	0,75 ... 1,00	0,67	1,00
Дуже важкий (ДВ)	60	1,00	1,00	1,00

Крани характеризується коефіцієнтом розподілу навантаження

$$K_k = \sum_{i=1}^n \left( \frac{Q_i}{Q} \right)^3 \frac{C_i}{C_T}$$

де  $Q_i$  - випадкові маси окремих вантажів (рівні навантаження) за умови типового використання крана, т;  $Q$  номінальна вантажність крана, т;  $C_i$  - кількість робочих циклів з окремим рівнем маси вантажу  $Q_i$ ;  $C_T$  - сумарна кількість робочих циклів за строк служби крана:

$$C_T = \sum_{i=1}^n C_i;$$

$n$  - загальна кількість змін циклів навантажування крана за строк служби.

Групу класифікації (режиму роботи) механізмів визначають залежно від класу використання А1-А8, який характеризується загальною тривалістю використання механізму (в годинах) за заданий строк служби, та режимом навантажування В1-В4 (табл. 10.6).

Таблиця 10.6 – Групи розподілу кранів в цілому

Режим навантажування	Коефіцієнт розподілу навантаження $K_k$	Характеристика вантажів, які підіймає кран	Використання кранів									
			нерегулярне			регулярне за легких умов	регулярне з перервами	регулярне інтенсивне	інтенсивне			
			Клас використання кранів									
			С0	С1	С2	С3	С4	С5	С6	С7	С8	С9
			Максимальна кількість робочих циклів									
1,6·10 <sup>4</sup>	3,2·10 <sup>4</sup>	6,3·10 <sup>4</sup>	1,25·10 <sup>5</sup>	2,5·10 <sup>5</sup>	5·10 <sup>5</sup>	1·10 <sup>6</sup>	2·10 <sup>6</sup>	4·10 <sup>6</sup>	Понад 4·10 <sup>6</sup>			
Q1 — легкий	0,125	Легкі — регулярно, номінальні — зрідка			A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
Q2 — середній	0,25	Середні — регулярно, а номінальні — досить часто		A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	
Q3 — важкий	0,5	Важкі — регулярно, а номінальні — часто	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8		
Q4 — дуже важкий	1,0	Близькі до номінальних — регулярно	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8			

Режим навантажування механізму характеризується коефіцієнтом розподілу навантаження

$$K_M = \sum_{i=1}^n \left[ \left( \frac{P_i}{P_{\max}} \right)^3 \frac{t_i}{t_T} \right],$$

де  $P_i$  - окремі випадкові навантаження (рівні навантажень), характерні для використовуваного механізму;  $P_{\max}$  - найбільше навантаження, яке прикладається до механізму;  $t_i$  - середня тривалість використання

механізму при окремих рівнях навантаження  $t_i$ .  $t_T$  - загальна тривалість дії навантажень усіх рівнів за строк служби механізму:

$$t_T = \sum_{i=1}^n t_i;$$

$n$  - загальна кількість змін циклів навантажування механізму за строк служби.

Таблиця 10.7 – Групи класифікації механізмів

Режим навантажування	Номінальний коефіцієнт розподілу навантаження $K_M$	Характеристика навантажень, яких зазнають механізми	Використання механізмів									
			нерегулярне			регулярне за легких умов	регулярне з перервами	регулярне інтенсивне	інтенсивне			
			Клас використання механізмів									
			A0	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9
			Загальна тривалість використання, год									
200	400	800	1600	3200	6300	12 500	25 000	50 000	100 000			
V1 — легкий	0,125	Малі — регулярно, а найбільші — зрідка			M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
V2 — середній	0,250	Помірні — регулярно, а найбільші — досить часто		M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	
V3 — важкий	0,5	Великі — регулярно, а найбільші — часто	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8		
V4 — дуже важкий	1,0	Найбільші — регулярно	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8			

Загальну тривалість дії навантажень усіх рівнів (тривалість роботи) механізму в годинах за строк служби  $h$  років з урахуванням коефіцієнтів  $K_p$ ,  $K_d$  і тривалості вмикання  $TB$ , %, визначених відповідно за формулами та тривалості роботи механізму  $t_p$ , хв, можна підрахувати за формулою

$$t_T = 365 \cdot K_p \cdot 24 \cdot K_d \cdot \frac{t_p}{60} \cdot \frac{TБ}{100} h.$$

При визначенні коефіцієнта розподілу навантаження для конкретного кранового механізму (підймання, пересування, повертання, змінення вильоту) параметри навантаження  $P_i$  та  $P_{max}$  треба замінити на відповідні змінні сили або моменти, що діють на механізм. Тоді для підйимального механізму формула

$$K_M = \sum_{i=1}^n \left[ \left( \frac{G_i + G_3}{G + G_3} \right)^3 \frac{t_i}{t_T} \right],$$

де  $G_i, G$  — ваги окремих випадкових вантажів і номінального вантажу, Н;  $G_3$  — вага вантажозахоплювального пристрою, Н;  $t_i, t_T$  — тривалості роботи механізму з вантажами  $G_i$  і загальна тривалість роботи механізму за строк служби, год;  $n$  — загальна кількість змін циклів навантажування механізму за строк служби.

Для механізмів пересування і повертання

$$K_M = \sum_{i=1}^n \left[ \left( \frac{F_{pi} + W_i}{F_{max} + W} \right)^3 \frac{t_{pi}}{t_h} + \left( \frac{F_{ri} + W_i}{F_{max} + W} \right)^3 \frac{t_{ri}}{t_h} + \left( \frac{W_i}{F_{max} + W} \right)^3 \frac{t_{ci}}{t_h} \right],$$

де  $F_{pi}, F_{ri}$  динамічні (інерційні) сили, Н, в періоди пуску ( $t_{pi}$ ) та гальмування ( $t_{ri}$ ) при різних рівнях навантажень;  $F_{max}$  максимальна динамічна сила, Н, в періоди пуску та гальмування;  $W_i, W$  сили, Н, статичного опору під час переміщення (повертання) з випадковим і-м та номінальним вантажами;  $t_{ci}$  — тривалість усталеного руху під час переміщення (повертання) з і-м вантажем, год;  $t_h$  загальна тривалість дії сил  $F_{pi}, F_{ri}, W_i, W$ , год.

Характерні для певних конструктивних типів кранів, режими роботи їхніх механізмів дивись у відповідних нормативних документах та довідниках

Навантаження на механізми та елементи конструкцій кранів

Вантажопідіймальні машини, окремі механізми їх, вузли та елементи конструкцій (деталі) розраховують відповідно до вимог «Правил будови і безпечної експлуатації вантажопідіймальних кранів». При цьому треба враховувати всі навантаження, які виникають під час роботи машини, можливі випадки спільної дії цих навантажень (комбінації їх), визначити найнебезпечніші для міцності й довговічності машини комбінації їх і вже за ними розраховувати елементи конструкції на міцність і витривалість. Основні можливі комбінації розрахункових навантажень на вантажопідіймальні машини наведено в табл. 10.8.

Таблиця 10.8- Комбінації навантажень, що враховуються при розрахунку крана

Параметр	Комбінація навантажень I	Комбінація навантажень II	Комбінація навантажень III
Вага крана	+	+	+
Вага номінального вантажу	+	+	—
Динамічні навантаження	+	+	—
Вітрові навантаження (робочий стан)	+	+	—
Вітрові навантаження (неробочий стан)	—	—	+
Навантаження від ухилу колії, нахилу колони крана	+	+	+

- Знак «+» означає, що відповідний вид навантаження враховується в даній комбінації.

- Знак «-» означає, що навантаження не враховується.

Призначення комбінацій навантажень

- Комбінація I — основна розрахункова, для нормального робочого режиму.

- Комбінація II — уточнена робоча комбінація з урахуванням експлуатаційних факторів.

- Комбінація III — розрахунок у неробочому стані (стоянка крана, діяння вітру, геометричні відхилення).

Розрахункова комбінація I на кран діє нормальне навантаження робочого стану, яке включає номінальну вагу вантажу і вантажозахоплювального пристрою, власну вагу крана, вітрові навантаження робочого стану на конструкцію і вантаж, та динамічні навантаження, що виникають під час пуску й гальмування в нормальних умовах використання механізму, за нормального стану підкранового шляху. Для цієї комбінації навантажень основним розрахунком металоконструкції і деталей механізму є розрахунок на втомну міцність, спрацьованість, довговічність, нагрівання.

Розраховуючи втомну міцність металоконструкції, вітрове навантаження можна не враховувати, бо воно відносно незначне (50 Па). У разі роботи з вантажами змінної маси втомну міцність розраховують не за номінальним, а за середнім (еквівалентним) навантаженням. Розрахунок металоконструкції на втому виконують для кранів 5-го, 6-го і вищих класів використання. Для кранів 4-го класу використання потребу в розрахунку металоконструкції на втому визначають на підставі аналізу даних експлуатації. Для кранів 1-, 2- і 3-го класів використання цей розрахунок не виконують.

Розрахункова комбінація II на кран діє робоче навантаження, яке крім навантаження від номінальної ваги вантажу з вантажозахоплювальним пристроєм та власної ваги крана включає максимальні динамічні навантаження, які можуть виникати під час різких пусків, екстреного гальмування, раптового вмикання-вимикання струму в мережі, та граничне вітрове навантаження для робочого стану на конструкцію і вантаж. Граничні значення динамічних навантажень відповідають значенням моментів під час буксування або юзу привідних коліс, максимальних моментів двигуна або гальм, які обмежуються спеціальними запобіжними пристроями. Розрахунок також виконують з урахуванням максимально можливо-го уклону шляху, а для плавучих кранів враховують максимальний крен. Для цієї комбінації металоконструкцію і деталі механізмів розраховують на міцність за умови забезпечення заданого запасу міцності. Перевіряють також вантажну стійкість крана. Навантаження від власної ваги крана та елементів його конструкції визначають згідно з робочими кресленнями або зважуванням.

Розрахункова комбінація III неробочий стан машини на відкритому майданчику без вантажу, механізми нерухомі. Крім власної ваги на кран діє граничне вітрове навантаження неробочого стану, іноді - навантаження від обледеніння, снігу або зумовлені температурною дією. При такій комбінації розрахункових навантажень розраховують: металоконструкцію на міцність за гранично допустимими напруженнями; деталі протиугінних пристроїв кранів; гальма вантажних візків; механізми змінення вильоту стріли; опорно-ходові та опорно-повертальні пристрої. Для цієї розрахункової комбінації перевіряють також власну стійкість крана. Визначаючи діючі навантаження, з усіх можливих вибирають найнебезпечніші положення стріли, поворотної частини і вантажного візка з погляду виникнення напружень у розрахункових елементах конструкції.

Нормативне навантаження від ваги снігу визначають за горизонтальною проекцією сприймальної поверхні. Для кліматичної зони території України це навантаження дорівнює 103 Па. Товщину обледеніння на розтяжках, канатах і решітчастих елементах металоконструкції беруть 1,0...1,2 мм при питомій вазі льоду 9 кН/м<sup>3</sup>. Можливі перевантаження від снігу та обледеніння в розрахунках не враховують. Не допускається також враховувати одночасну дію снігового і вітрового навантажень. Навантаження, зумовлені коливаннями температури навколишнього середовища, зазначаються в технічних завданнях на проєктування машин і враховуються лише в розрахунках статично невизначених конструкцій. Допустимий інтервал коливань температури  $\pm 40^\circ \text{C}$ .

#### Динамічні навантажень у розрахунках кранових механізмів

Найточніший розрахунок режимів руху кранових механізмів можна виконати, використовуючи деталізовані динамічні моделі їх. На рис. 10.5 наведено приклад динамічної моделі механізму підймання вантажу. Позначення на схемі:  $m_1$  - маса вантажу, кг;  $m_2$  зведена до точки обпирання вантажного візка маса моста, кг;  $I$  — момент інерції вантажної лебідки, зведений до осі барабана, кг м<sup>2</sup>;  $x_1$  і  $x_2$  — лінійні координати вантажу і моста, м;  $\varphi$  - кут повороту барабана, рад;  $M_6$  - обертальний момент на барабані, створюваний електродвигуном, Н. м:  $M_6 = M_{двu_p}$ ;  $C_1$  жорсткість підймального каната, Н/м;  $C_2$  — зведена до точки обпирання вантажного візка жорсткість моста, Н/м;  $\mu_1$  — коефіцієнт демпфірування підймального каната, Н. с/м;  $\mu_2$  - коефіцієнт демпфірування моста, Н. с/м;  $R_6$  - радіус канатного барабана, м.

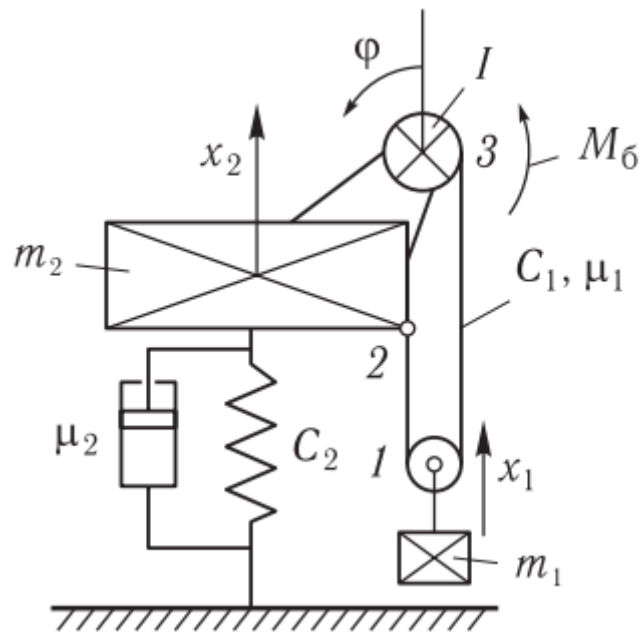


Рисунок 10.5 - Динамічна модель підйимального механізму мостового крана

Розрахунок підйомного механізму мостового крану.

Розрахунок зусиль.

Схему підйимального механізму мостового крана на рис. 10.6. У цих механізмах застосовують здвоєний поліспаст, який забезпечує вертикальний рух вантажу та рівномірний розподіл навантажень на підшипники барабана і ходові колеса вантажного візка (незалежно від положення вантажу під час підймання чи опускання).

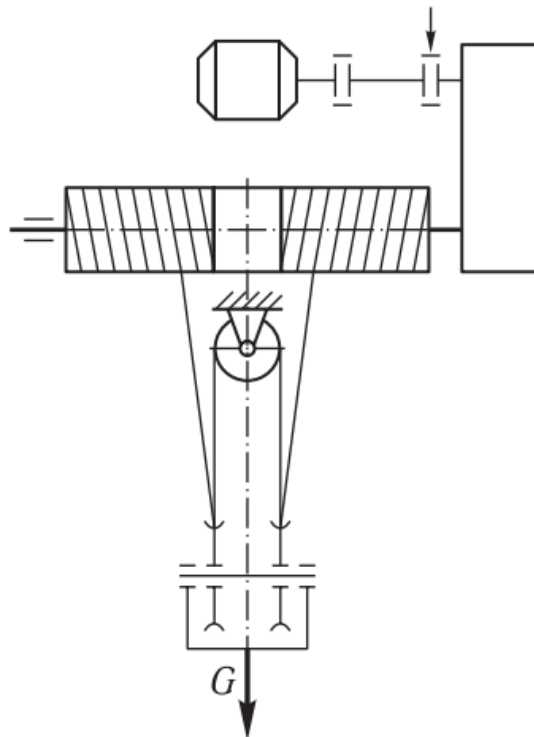


Рисунок 10.6 - Схема підйимального механізму

Номинальна вага вантажу

$$G = Q \cdot g, \text{ Н}$$

де  $Q$  – вага груза, кг;  $g = 9,81$  – прискорення вільного падання,  $\text{м/с}^2$

Сила натягу вітки каната, яка намотується на барабан під час підймання вантажу,

$$F_{\text{н}} = \frac{Q}{z \cdot \eta_{\text{п}}}, \text{ Н}$$

де  $z$  - кількість віток каната, на яких висить вантаж:

$$z = u \cdot a$$

$u$ - кратність поліспасу,  $a$ — кількість гілок каната, що безпосередньо підтримують вантаж (число опорних віток).

$\eta_{\text{п}}$  — коефіцієнт корисної дії поліспаста.

У разі збігання каната з рухомого блока ККД поліспаста

$$\eta_{\text{п}} = \frac{1 - \eta_{\text{бл}}^u}{(1 - \eta_{\text{бл}})u}$$

де  $\eta_{\text{бл}}$  - ККД блока з урахуванням жорсткості каната: для блока на підшипниках кочення  $\eta_{\text{бл}} = 0,98 \dots 0,97$  на підшипниках ковзання  $0,96 \dots 0,95$ .

Таблиця 10.9 - Кратність поліспаста  $u$  для кранів різної вантажності

Характер намотування каната на барабан	Тип поліспаста	Значення $u$ при вантажопідйомності, т				
		До 1 т	2...6 т	10...15 т	20...30 т	40...50 т
Безпосередньо (наприклад, мостові крани, талі)	Здвоєний	2	2	2; 3	3; 4	4; 5
	Простий	1	2	—	—	—
Через напрямний блок (наприклад, стрілові крани)	Здвоєний	—	2	2; 3	—	—
	Простий	1; 2	2; 3	3; 4	5; 6	—

У разі збігання каната з нерухомого блока рис. 10.7

$$\eta_{\text{п}} = \frac{(1 - \eta_{\text{бл}}^u) \eta_{\text{бл}}^{n_{\text{бл}}}}{(1 - \eta_{\text{бл}})u}$$

де  $n_{\text{бл}}$  - кількість напрямних блоків.

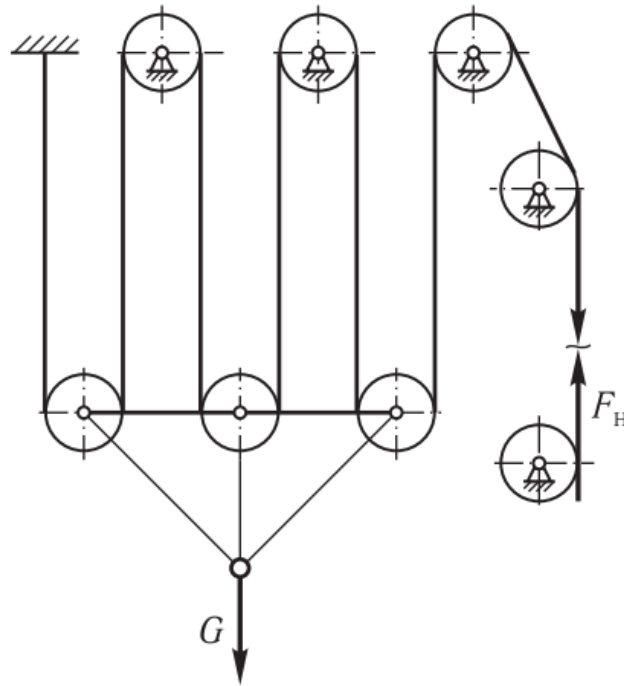


Рисунок 10.7 - Схема поліспада з двома напрямними блоками

Силу натягу каната, який набігає на барабан під час підймання номінального вантажу, можна визначити також за формулою

$$F_{\text{н.п}} = \frac{G}{a} \frac{1 - \eta_{\text{бл}}}{1 - \eta_{\text{бл}}^u}$$

У разі збігання каната з нерухомого блока

$$F_{\text{н.п}} = \frac{G}{a} \frac{1 - \eta_{\text{бл}}}{(1 - \eta_{\text{бл}}^u) \eta_{\text{бл}}^{n_{\text{бл}}}}$$

Статичний момент на валу двигуна при опусканні номінального вантажу

$$F_{\text{н.оп}} = \frac{G}{a} \frac{1 - \eta_{\text{бл}}}{(1 - \eta_{\text{бл}}^u)} \eta_{\text{бл}}^{u-1}$$

Розрахунок потужності електродвигуна та вибір редуктора.

Під час підймання номінального вантажу потужність двигуна підйимального механізму

$$P_p = \frac{G \cdot v_1}{10^3 \cdot \eta_m}$$

де  $\eta_m$  - ККД підйимального механізму.

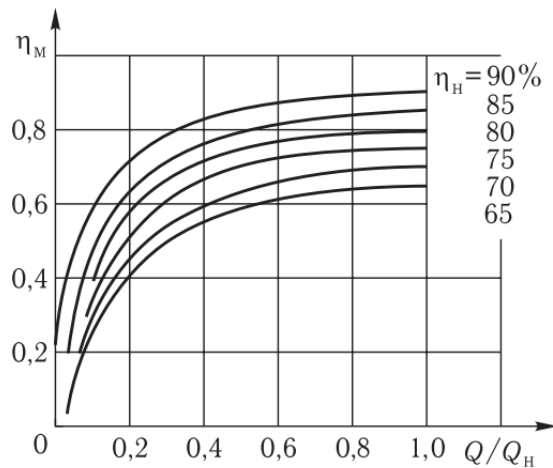


Рисунок 10.8 - Залежність ККД механізмів крана від їхнього завантаження  $\eta_m$ -ККД механізмів при номінальному завантаженні)

Якщо фактична тривалість вмикання  $T_{B\phi}$  електродвигуна не збігається зі стандартною  $T_B$  кранових електродвигунів, наведених у каталозі, то фактичну потужність  $P_\phi$  за стаціонарного режиму для стандартних  $T_B$  визначають за формулою

$$P_\phi = P_H \sqrt{\frac{T_B}{T_{B\phi}}}$$

Для режимів роботи груп 1, 2, 3 і 4 попередньо, до перевірки двигуна на нагрів, можна вибирати за каталогом двигун найближчої меншої потужності. При цьому має виконуватись умова  $M_{\text{пmin}} \geq M_{\text{ст}}$  де  $M_{\text{пmin}}$  мінімальний пусковий момент вибраного електродвигуна:

$$M_{\text{пmin}} = \psi_{\text{пmin}} M_H = \psi_{\text{пmin}} \frac{P}{\omega}$$

при цьому кратність мінімального пускового моменту  $\psi_{\text{пmin}} = 1,1 \dots 1,4$ ;  $M_{\text{ст}}$  - статичний момент на валу електродвигуна під час пуску на підймання.

$$M_{\text{ст}} = \frac{GD_6}{2u_p u \eta_m}$$

де  $M_H$  — номінальний момент на валу двигуна;  $u_p$  — розрахункове передатне число редуктора;  $P$  — потужність електродвигуна, кВт.

$$u_p = \frac{n}{n_6}$$

де  $n_6$  — частота обертання барабана.

$$n_6 = \frac{60 \cdot v_k}{\pi D_6}$$

$v_k = u \cdot v_1, \text{ м/с}$  — швидкість намотування каната на барабан.

Редуктори підйимального механізму вибирають за розрахунковою потужністю, частотою обертання валу двигуна, значенням передатного числа і режимом роботи. Механізми підймання можуть бути укомплектовані редукторами таких типів: Ц2, Ц2У, Ц2Н, ЦДН, ЦДНД, РМ, РК, Ц3У, ЦТНД, ГК, РЦД.

Допустимий крутний момент на швидкохідному валу редуктора

$$M_{кр} = 9550 \psi \frac{P_p}{n}$$

$\psi$  — кратність пускового моменту

Середній пусковий момент електродвигуна

$$M_{п.ср} = \frac{M_{п.мах} + M_{п.мін}}{2} = \frac{\psi_{п.мах} + \psi_{п.мін}}{2} M_H$$

Якщо передатне число вибраного редуктора відрізняється від розрахункового, то визначають фактичну швидкість підймання вантажу, м/с,

$$v_{1ф} = \frac{\pi D_6 n_6}{60}$$

де  $n_6 = n/u_p$  — фактична частота обертання барабана, об/хв.

Вибір гальма.

Гальмо встановлюють, як правило, на швидкохідному валу редуктора. Розрахунковий гальмівний момент, за яким вибирають гальмо,

$$M_{г} = k_{г} M_{ст.г}, \text{ Нм,}$$

де  $k_{г}$  - коефіцієнт запасу гальмування,  $M_{ст.г}$  - статичний момент на валу двигуна під час гальмування приводу

$$M_{ст.г} = \frac{GD_6 \eta_M}{2u_M}, \text{ Нм,}$$

де  $u_M = u \cdot u_p$  — загальне передатне число механізму,  $\eta_M$  — ККД механізму.

Таблиця 10.10 - Значення коефіцієнта запасу гальмування  $k_r$

Тип приводу механізму	Група режиму роботи	$k_r$
Ручний	—	1,5
Машинний	3	1,5
	4	1,75
	5	2,0
	6	2,5

Розрахунок механізму підймання в неусталені періоди пуску і гальмування приводу.

Якщо рух механізму неусталений, що характерно для повторно-короткочасного режиму роботи підймальних машин, то для кожного робочого циклу треба дотримуватись таких умов.

– Прискорення вантажу має бути таким, щоб забезпечити виконання краном технологічного процесу.

Таблиця 10.11 - Орієнтовні значення прискорень підймальних механізмів

Тип крана / призначення	Рекомендоване прискорення $a$ , м/с <sup>2</sup>
Монтажні крани	0,1
Крани для підймання рідкого та розпеченого металу	0,1 ... 0,2
Крани для машинобудівних заводів	0,2
Грейферні крани	0,8
Крани для перевантаження сипких вантажів	0,6 ... 0,8

– Параметри вибраного електродвигуна при підйманні номінального вантажу мають відповідати такій умові:

$$M_{дв} = M_{ст} + M_{д} \leq \psi_{ср} M_{н} ,$$

де  $M_{дв}$  — момент двигуна, Н м;  $M_{ст}$  — статичний момент на валу двигуна при підйманні номінального вантажу, Н м;  $M_{д}$  — динамічний момент на валу двигуна, визначений з умов забезпечення необхідного для пуску прискорення, Н м;  $M_{н}$  — номінальний момент електродвигуна, Н м;  $\psi_{ср}$  — кратність середнього пускового моменту.

Необхідний середній момент, Н·м, на валу двигуна під час пуску на підймання вантажу

$$M_{п.ср} = J_{зв} \frac{\omega}{t_{п}} + M_{ст.п}$$

Моменти на валу електродвигуна (середні пускові або середні гальмівні) залежно від виконуваної операції:

а) пуск на підймання вантажу

$$M_{\text{дв}} = M_{\text{п.ср}} = M_{\text{ст.п}} + J_{\text{зв}} \frac{\omega}{t_{\text{п}}}$$

б) гальмування під час підймання вантажу

$$M_{\text{дв}} = M_{\text{г.ср}} = M_{\text{ст.п}} - J_{\text{зв}} \frac{\omega}{t_{\text{г}}}$$

в) пуск на опускання вантажу

$$M_{\text{дв}} = M_{\text{п.ср}} = M_{\text{ст.оп}} - J_{\text{зв}} \frac{\omega}{t_{\text{п}}}$$

г) гальмування під час опускання вантажу

$$M_{\text{дв}} = M_{\text{г.ср}} = M_{\text{ст.оп}} + J_{\text{зв}} \frac{\omega}{t_{\text{г}}}$$

Статичний момент на валу двигуна при підйманні різних вантажів визначають за формулою

$$M_{\text{ст.п}i} = \frac{F_{\text{н.п}i} a D_6}{2u_p u \eta_M},$$

де  $F_{\text{н}i}$  — сила натягу каната, який намотується на барабан, Н;  $a$  — кількість віток каната, які намотуються на барабан;  $\eta_M$  — ККД механізму підймання.

Допустима тривалість пуску, с,

$$t_{\text{п}} = \frac{v_{\phi}}{a_{\text{п}}}$$

де  $a_{\text{п}}$  — допустиме прискорення під час пуску, м/с<sup>2</sup>.

Зведений до валу двигуна момент інерції, кг м<sup>2</sup>, рухомих мас механізму і вантажу в період пуску та гальмування приводу під час підймання вантажу

$$J_{\text{зв.п}} = \delta(J_p + J_M) + m \frac{v_{1\phi}^2}{\omega^2 \eta_M}$$

або

$$J_{\text{зв.п}} = \delta(J_p + J_M) + m \frac{R_6^2}{u_M^2 \eta_M}$$

де  $\delta$  — коефіцієнт, який враховує моменти інерції мас деталей, що розміщені на інших валах механізму та обертаються повільніше за вал двигуна (коливається в межах 1,05...1,25);  $J_p$  — момент інерції ротора

двигуна, кг м<sup>2</sup>;  $J_M$  — момент інерції зубчастої муфти з гальмівним, кг м<sup>2</sup>;  $m$  — рівень маси вантажу, кг;  $R_6$  — радіус барабана по центру каната, м;  $u_M$  — загальне передатне число механізму

Тривалість пуску при підйманні номінального вантажу

$$t_{pi} = \frac{J_{зв.пi} \cdot \omega}{M_{п.ср} - M_{ст.пi}}$$

Прискорення під час підймання номінального вантажу

$$a_{п.i} = \frac{v_{ф.i}}{t_{п.i}}$$

Статичний момент на валу двигуна при опусканні вантажу

$$M_{ст.оп i} = \frac{F_{н.оп.i} a D_6 \eta_M}{2u_p u} = \frac{G D_6 \eta_M}{2u_M},$$

Середній момент, Н·м, на валу двигуна в період пуску механізму на опускання вантажу

$$M_{п.ср} = -J_{зв} \frac{\omega}{t_{оп}} + M_{ст.оп}$$

Зведений до валу двигуна момент інерції, кг м<sup>2</sup>, рухомих мас механізму і вантажу в період пуску та гальмування приводу під час опусканні вантажу

$$J_{зв.г} = \delta(J_p + J_M) + m \frac{R_6^2}{u_M^2} \eta_M$$

Допустима (з умови обмеження прискорення під час гальмування) тривалість гальмування підймального механізму

$$t_{г} = \frac{v_{ф}}{a_{г}}$$

Перевірка двигуна на нагрів.

Виходячи з технологічних процесів виробництва, будують графік навантаження крана впродовж циклу роботи. Статичні моменти, які розвиває електродвигун за цикл, визначають при підйманні та опусканні вантажів, середні значення яких залежно від режиму роботи.

Середньоквадратичний за період циклу момент електродвигуна, еквівалентний за нагрівом змінному моменту, який відповідає заданому навантаженню, визначають за формул

$$M_e = \sqrt{\frac{\sum M_{п.сп}^2 \cdot t_{п} + \sum M_{ст}^2 \cdot t_c + \sum M_{г}^2 \cdot t_r}{\beta(\sum t_{п} + \sum t_r) + \sum t_c + \beta_0 \sum t_0}}$$

де  $\sum t_{п}$ ,  $\sum t_r$ ,  $\sum t_c$ ,  $\sum t_0$  - марні тривалості, с, відповідно стаціонарного руху приводу, пусків за один цикл, пауз та гальмування протягом одного циклу;  $\beta$  — коефіцієнт, який враховує погіршення умов охолодження під час пуску і гальмування

$$\beta = \frac{1 + \beta_0}{2};$$

$\beta_0$  — коефіцієнт, який враховує погіршення умов охолодження під час пауз: беруть  $0 \leq \beta_0 \leq 0,35$  для відкритих і захищених двигунів з вентилятором на валу;  $0,3 \leq \beta_0 \leq 0,55$  — для закритих двигунів з ребрами і зовнішнім обдувом;  $0,7 \leq \beta_0 \leq 0,98$  — для закритих двигунів.

Тривалість усталеного руху

$$t_c = \frac{H}{v_{\phi}}$$

H - середню висоту підняття вантажу.

Тривалість робочої операції

$$t_p = \sum t_{п} + \sum t_r + \sum t_c.$$

Сумарна тривалість пауз за цикл роботи при

$$\sum t_0 = \frac{t_p(100 - TB)}{TB}.$$

Тривалість циклу

$$t_{ц} = t_p + \sum t_0.$$

Кількість вмикань за години

$$n_{вм} = \frac{3600}{t_{ц}}.$$

Еквівалентна за нагрівом потужність

$$P_e = \frac{M_e \omega}{10^3}, \text{ кВт.}$$

Необхідна умова  $P_e < P_H$ .

Розрахунок механізму пересування кранового візка.

Вибір кінематичної схеми та вихідних параметрів

Механізм пересування візка може мати кінематичною схемою, наведеною на рис. 10.9. Крутний момент від двигуна до привідного колеса передається за допомогою редуктора.

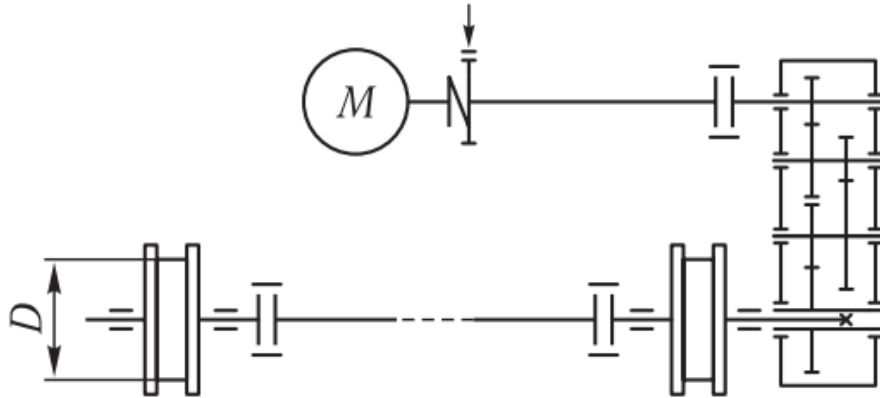


Рисунок 10.9 - Кінематична схема механізму пересування візка

За умови рівномірного розподілу між ходовими колесами вертикальних сил, що діють на візок, навантаження на одне колесо

$$F_{1к} = \frac{G + G_{віз}}{n_к}$$

де  $G, G_{віз}$  – маса вантажу та візка відповідно,  $n_к$  – кількість колес.

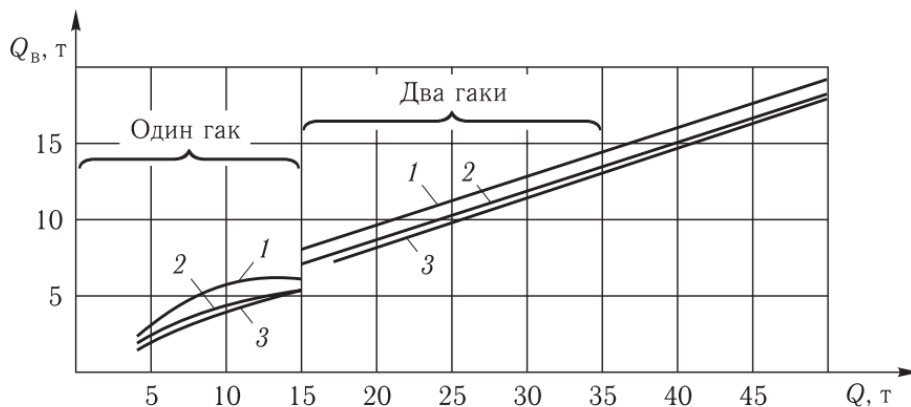


Рисунок 10.10 - Залежність власної маси візка від вантажності:

1, 2 і 3 — відповідно для режимів роботи 5-, 4- і 3-ї груп

Розрахунок сил опору пересування візка.

Опір (сила опору), кН, пересуванню візка з номінальним вантажем у період усталеного руху

$$W_{ст} = (G + G_{віз}) \frac{fd + 2k}{D_k} k_p + W_y + W_B,$$

де  $G$  кН — вага номінального вантажу;  $d = (0,25 \dots 0,30) D_k$  — діаметр цапфи колеса;  $f$  — коефіцієнт тертя в підшипниках коліс.

Підшипники	$f$
Ковзання відкритого типу	0,1
Букси з рідким мастилом	0,08
Кочення шарикові й роликові	0,015
Конічні	0,02

$k_p$  — коефіцієнт, який враховує опір від тертя реборд коліс об рейки та тертя струмознімачів по трелеях;

Таблиця 10.12 - Значення коефіцієнта тертя реборд  $k_p$

Обід ходового колеса	Місце встановлення механізму	Привід механізму	$k_p$	Примітка
Конічний Циліндричний з ребордами  Циліндричний без реборд	Крановий міст	Центральний	1,2	З боковими напрямними роликами
		Роздільний або центральний	1,5	
		—	1,1	
Циліндричний з ребордами	Крановий візок	Центральний	2,5 2,0	З жорстким струмопідводом З кабельним струмопідводом
Конічний одно-ребордний	Підвісний кран (дво-таврова балка)	Одно-сторонній	2,5 <sup>1</sup> 2,0 <sup>2</sup>	<sup>1</sup> опора котка — підшипники кочення; <sup>2</sup> опора котка — підшипники ковзання
		Двосторонній	2,0 <sup>1</sup> 1,8 <sup>2</sup>	

$W_y$  — опір пересуванню від уклону колії:

$$W_y = (G + G_{\text{віз}})\alpha_y;$$

$\alpha_y$  - розрахунковий уклон підкранової колії ( $\alpha_y = 0,001$  — для колії, укладеної на металевих балках із залізобетонним фундаментом; 0,002 — для колії, укладеної на дерев'яних шпалах зі щебеневою основою, а також для підвізкової колії мостових кранів. Прогин головної балки від ваги візка з номінальним вантажем  $f_6$ , м.

$$f_6 = \frac{2f_6}{L}.$$

$W_B$  — опір пересуванню від дії вітрового навантаження.

Двигун механізмів пересування візків і кранів вибирають за пусковим моментом, який має забезпечувати стаціонарність руху без пробуксовування привідних коліс на рейках незавантаженого візка (крана). Значення коефіцієнта запасу зчеплення має бути не менше ніж 1,2.

Для попереднього вибору двигуна визначаємо опір пересуванню завантаженого візка з урахуванням сил інерції в пусковий період

$$W_0 = W_{ст} + (1,1 \dots 1,3)(G + G_{віз})a$$

де 1,1...1,3 — коефіцієнт, який враховує вплив на силу інерції обертальних мас приводу;  $a$  — середнє прискорення візка (крана) під час пуску,  $m/c^2$ :

Крани і візки, які транспортують рідкий і розпечений метал	0,1 $m/c^2$
Крани монтажні та їхні візки	0,15 $m/c^2$
Мостові крани загального призначення і візки з гнучким підвішуванням вантажу	0,2 $m/c^2$
Мостові крани і візки з жорстким підвішуванням вантажу	0,3 $m/c^2$
Козлові крани	0,1 $m/c^2$
Мостові крани з грейферними візками	0,8 $m/c^2$

Розрахункова потужність двигуна

$$P_p = \frac{W_0 v_2}{\eta_m \psi_{п.сп}}$$

де  $\psi_{п.сп}$  — середня кратність пускового моменту:

$$\psi_{п.сп} = \frac{\psi_{max} + \psi_{min}}{2}$$

Значення кратності пускових моментів для електродвигунів, які працюють у пускових режимах, беруть такими:  $\psi_{min} = 1,1 \dots 1,4$ ;  $\psi_{max} = 1,8 \dots 2,5$ ;  $\psi_{п.сп} = 1,5 \dots 2,0$ . Середні коефіцієнти перевантаження двигунів  $\psi_{п.сп}$  під час пуску залежать від їхнього типу: з незалежним збудженням 1,7...1,8; зі змішаним збудженням — 1,8...1,9; з послідовним збудженням (серієсні) — 1,5...1,7; для асинхронних з фазовим ротором - 1,5...1,7.

За каталогом попередньо вибираємо електродвигун типу та розраховуємо  $M_H$ , та  $\psi_{max} = M_{п.мах}/M_H$ .

Розрахункове передатне число редуктора

$$u_{p.p} = \frac{n}{n_K}$$

де  $n_k$  — частота обертання привідних колес.

$$n_k = \frac{60 \cdot v_2}{\pi D_k}$$

За каталогом вибираємо редуктор з передатним числом  $u_p$ .

Фактична частота обертання привідних коліс

$$n_{k,\phi} = \frac{n}{u_p}$$

Фактична швидкість пересування візка з номінальним вантажем

$$v_{2,\phi} = \frac{\pi D_k n_{k,\phi}}{60}$$

Зведені до валу електродвигуна статичні моменти сил опору пересуванню візка з вантажом

$$M_{ст.п} = \frac{W_{стD_k}}{2u_p \eta_M}$$

Зведені до валу електродвигуна моменти інерції рухомих мас під час пуску та гальмування візка

$$J_{зв.п} = \delta \left( J_p + \sum J_M \right) + \frac{(G + G_{віз}) R_k^2}{u_p^2 \eta_M}$$

Щоб забезпечити допустиме в період пуску прискорення  $[a_{п}]$  м/с<sup>2</sup>, тривалість пуску має становити

$$t_{п} = \frac{v_{2,\phi}}{[a_{п}]}, \text{ с.}$$

Ця тривалість пуску візка з номінальним вантажем буде забезпечуватись середнім пусковим моментом на валу двигуна

$$M_{п.ср} = \frac{J_{зв.п} \omega}{t_{п}} + M_{ст.п}$$

Максимальний пусковий момент

$$M_{п.max} = 2M_{п.ср} - \psi_{min} M_H$$

Пуск двигуна незавантаженого візка доцільно здійснювати тим самим середнім пусковим моментом  $M_{п.ср}$ .

Тривалість пуску

$$t_{п} = \frac{J_{зв.п} \omega}{M_{п.ср} - M_{ст.п}}, c.$$

Прискорення під час пуску незавантаженого візка

$$a_{п} = \frac{v_{2\phi}}{t_{п}}.$$

Тривалість пуску візка має бути 5...6 с і не більше.

Захист і системи автоматизації.

Сучасні вантажопідіймальні механізми працюють у складних динамічних режимах і належать до обладнання підвищеної небезпеки, тому їх експлуатація неможлива без застосування систем захисту та автоматизації.

Призначення систем захисту

Системи захисту призначені для:

- запобігання аварійним режимам;
- обмеження навантажень, що перевищують допустимі;
- захисту електрообладнання та механічних елементів від пошкоджень;
- зниження ризику травмування персоналу.

Основні види захистів

У вантажопідіймальних механізмах застосовуються:

- захист від перевантаження (обмежувач вантажопідіймальності);
- кінцеві вимикачі верхнього та нижнього положення гака;
- захист від обриву фаз і перекосу напруги;
- тепловий захист електродвигуна;
- захист від перевищення швидкості;
- аварійне гальмування при зникненні живлення.

Системи автоматизації

Автоматизація кранових механізмів забезпечує:

- керування швидкістю підйому та опускання;
- плавний пуск і гальмування;
- синхронізацію роботи кількох механізмів;
- дистанційне або програмне керування.

У сучасних кранах широко застосовуються:

- частотно-керовані електроприводи;
- програмовані логічні контролери (PLC);

- датчики навантаження, швидкості, положення;
- системи моніторингу та діагностики.

Вимоги до безпеки та надійності.

Загальні вимоги до безпеки

Безпека вантажопідіймальних механізмів визначається сукупністю конструктивних, електричних та експлуатаційних заходів і передбачає:

- виключення неконтрольованого руху вантажу;
- забезпечення утримання вантажу при аварійному відключенні живлення;
- обмеження доступу персоналу до небезпечних зон;
- надійне гальмування в усіх режимах роботи.

Надійність як інженерна характеристика

Надійність кранового обладнання характеризується:

- безвідмовністю;
- довговічністю;
- ремонтпридатністю;
- збережуваністю параметрів упродовж строку служби.

На надійність істотно впливають:

- група режиму роботи механізму;
- динамічні навантаження при пуску та гальмуванні;
- якість електропривода і гальм;
- стан канатів, блоків, барабана;
- рівень автоматизації та захисту.

Взаємозв'язок безпеки і надійності

Безпека і надійність є взаємопов'язаними поняттями:

- зниження надійності підвищує ймовірність аварій;
- відсутність захистів призводить до прискореного зносу;
- сучасні системи автоматизації одночасно підвищують і безпеку, і ресурс обладнання.

Модернізація кранового обладнання

Мета модернізації

Модернізація вантажопідіймальних механізмів виконується з метою:

- підвищення безпеки експлуатації;
- збільшення надійності та ресурсу;
- зниження енерговитрат;
- адаптації обладнання до сучасних вимог виробництва.

Основні напрями модернізації

Найпоширенішими напрямками модернізації є:

- заміна застарілих електроприводів на частотно-керовані;
- встановлення сучасних систем гальмування;
- впровадження електронних обмежувачів навантаження;

- модернізація систем керування (PLC, HMI);
- впровадження систем діагностики та моніторингу стану.

Особливості модернізації діючих кранів

При модернізації, як правило:

- зберігається металоконструкція;
- оновлюються електромеханічні та електронні компоненти;
- зменшуються динамічні навантаження;
- підвищується точність позиціонування вантажу.

Модернізація дозволяє суттєво продовжити строк служби крана без повної його заміни.

Вітчизняна та міжнародна нормативна документація по кранам. класифікація режимів роботи вантажопідіймальних механізмів виконується відповідно до таких стандартів ISO:

- **ISO 4301-1** — Classification of lifting appliances – General
- **ISO 4301-5** — Classification of cranes
- **ISO 4306-1** — Cranes – Vocabulary
- **ISO 9927-1** — Cranes – Inspections

Ці стандарти встановлюють **уніфіковану систему оцінювання режимів роботи**, що застосовується при:

- виборі електроприводів;
- розрахунку механізмів;
- визначенні ресурсу та надійності;
- модернізації кранового обладнання.

В зв'язку з нормалізацією норм та правил з Європейським союзом в Україні поступово впроваджується відповідне нормативне поле для подальшого ознайомлення переходьте за посиланням [журнал підйомні споруди. спеціальна техніка lifting equipment and special devices magazine: европейские и международные стандарты на грузоподъёмные краны](#)

**Чинні стандарти EN з поправками та доповненнями CEN/TC 147 "Крани. Безпека» складається з:**

- EN 12077-2:1998+A1:2008 Безпека кранів. Вимоги Безпека та охорона здоров'я. Частина 2. Пристрої обмеження та індикації\*;
- EN 12644-1:2001+A1:2008 Крани. Інформація для експлуатації та тестування. Частина 1. Інструкції\*;
- EN 12644-2:2000+A1:2008 Крани. Інформація для Експлуатація та тестування. Частина 2. Маркування\*;
- EN 12999:2011+A2:2018 Крани. Навантажувальні крани\*;
- EN 13000:2010+A1:2014 Крани. Мобільні крани\*;
- EN 13001-1:2015 Крани. Основи дизайну. Частина 1. Загальні принципи та вимоги\*;
- EN 13001-2:2014 Крани. Основи дизайну. Частина 2. Вплив навантажень\*;

- EN 13001-3-1:2012+A2:2018 Крани. Основи дизайну. Частина 3-1. Граничні стани та перевірки міцності сталевих конструкцій\*;
- EN 13001-3-2:2014 Крани. Основи дизайну. Частина 3-2. Граничні стани та підтвердження відповідності канатів у підйомних системах\*;
- EN 13001-3-3:2014 Крани. Основи дизайну. Частина 3-3. Граничні стани та підтвердження відповідності контактів колеса і рейки\*;
- EN 13001-3-4:2018 Крани. Основи дизайну. Частина 3-4. Граничні стани та підтвердження відповідності машин і механізмів. Підшипники;
- EN 13001-3-5:2016 Крани. Основи дизайну. Частина 3-5. Граничні стани та підтвердження відповідності кованих гачків\*;
- EN 13001-3-6:2018 Крани. Основи дизайну. Частина 3-6. Граничні стани та підтвердження відповідності машини. Гідравлічні циліндри;
- EN 13135:2013+A1:2018 Крани. Охорона. Дизайн. Вимоги до обладнання\*;
- EN 13155:2003+A2:2009 Крани. Охорона. Знімні підйомні пристрої\*;
- EN 13157:2004+A1:2009 Крани. Охорона. Ручні крани\*;
- EN 13557:2003+A2:2008 Крани. Органи управління та контролю\*;
- EN 13586:2004+A1:2008 Крани. Доступність\*;
- EN 13852-1:2013 Крани. Морські крани. Частина 1. універсальні морські крани\*;
- EN 13852-2:2004 Крани. Морські крани. Частина 2. Плавучі крани;
- EN 14238:2004+A1:2009 Крани. Маніпулятори з ручним керуванням навантаженням\*;
- EN 14439:2006+A2:2009 Крани. Охорона. Баштові крани\*;
- EN 14492-1:2006+A1:2009 Крани. Лебідки та підйомники з механічним приводом. Частина 1. Лебідки з механічним приводом\*;
- EN 14492-1:2006+A1:2009/AC:2010 Крани. Лебідки та підйомники з механічним приводом. Частина 1. Лебідки з механічним приводом\*;
- EN 14492-2:2006+A1:2009 Крани. Лебідки та підйомники з механічним приводом. Частина 2. Механічно керовані підйомники\*;
- EN 14492-2:2006+A1:2009/AC:2010 Крани. Лебідки та підйомники з механічним приводом. Частина 2. Механічно керовані підйомники\*;
- EN 14502-1:2010 Крани. Обладнання для підняття людей. Частина 1. Повішення кошики\*;
- EN 14502-2:2005+A1:2008 Крани. Обладнання для підняття людей. Частина 2. Пости керування підйомом\*;
- EN 14985:2012 Крани. Крани з поворотним стрілою\*;
- EN 15011:2011+A1:2014 Крани. Контактні та порталні крани\*;
- EN 15056:2006+A1:2009 Крани. Вимоги до контейнерних дистрибуторів\*;
- EN 16851:2017 Крани. Легкі кранові системи\*;
- EN 60204-32:2008 Безпека електрообладнання машин. Частина 32. Вимоги до підйомні машини\*.

**Додатки:**

1. Стандарти EN з позначкою \* приймаються в Україні в ідентично гармонізований (DSTU EN);

2. A1, A2 тощо – зміни у стандартах, AC – поправки.

**Нижче також наведені інформація про європейські стандарти EN переглянута (нове видання) вперше розроблені та внесені зміни до існуючих, підготовлені до затвердження у 2019-2020:**

- EN 13001-3-2:2014+A1 Крани. Основи дизайну. Частина 3-2. Граничні стани та підтвердження відповідності канатів у системах підйом;
- EN 13001-3-5:2016+ A1 Крани. Основи дизайну. Частина 3-5. Маргінальна стан і підтвердження відповідності кованих і литих гачків;
- EN 13155 Крани. Охорона. Знімний підйомні пристрої;
- EN 14492-1 Крани. Лебідки та підйомники з механічними їдь. Частина 1. Лебідки з механічним приводом;
- EN 14492-2 Крани. Лебідки та підйомники з механічними їдь. Частина 2. Талі з механічним приводом;
- EN 12999 Крани. Навантажувальні крани;
- EN 13000 Крани. Мобільні крани;
- EN 13001-2 Крани. Основи дизайну. Частина 2. Вплив навантажень;
- EN 13001-3-7 Крани. Основи дизайну. Частина 3-7. Граничні стани та підтвердження конформізму машин. Шестерні та коробки передач;
- EN 13001-3-8 Крани. Основи дизайну. Частина 3-8. Граничні стани та підтвердження конформізму машин. Шахти;
- EN 13586 Крани. Доступність;
- EN 13852-1 Крани. Морські крани. Частина 1. універсальні морські крани;
- EN 13852-3 Крани. Морські крани. Частина 3. Легкі морські крани;
- EN 14439 Крани. Баштові крани;
- EN 15011 Крани. Контактні та порталні крани;
- EN 16851 Крани. Легкі кранові системи;
- EN 17076 Баштові крани. Системи запобігання зіткнення. Вимоги безпеки;
- EN Крани. Інтерфейс (взаємодія) між краном- і робочою платформою;
- EN Крани. Вимоги до зварних формації.

**Висновки.**

1. Вантажопідіймальні механізми характеризуються складними змінними навантаженнями та циклічними режимами роботи, що визначає специфіку їх інжинірингу.

2. Вибір електропривода повинен враховувати групу режиму роботи, динамічні навантаження та вимоги до перевантажувальної здатності.

3. Динаміка пуску і гальмування є визначальним фактором безпеки та довговічності кранового обладнання.

4. Поліспасти і напрямні блоки істотно впливають на розподіл зусиль у канаті та навантаження на механічні елементи.
5. Системи автоматизації та захисту є невід'ємною частиною сучасних кранових механізмів.
6. Модернізація кранового обладнання дозволяє підвищити енергоефективність, безпеку та надійність без заміни всієї металоконструкції.

Контрольні питання до теми 10.

1. Які основні типи вантажопідіймальних механізмів застосовуються у промисловості?
2. Чим відрізняються умови роботи кранів, талей і лебідок?
3. Які фактори визначають вибір електропривода механізму підйому?
4. Чому електроприводи кранів повинні мати підвищену перевантажувальну здатність?
5. Який вплив мають прискорення та уповільнення на динамічні навантаження?
6. Які функції виконують гальма у кранових механізмах?
7. Для чого застосовуються поліспасти у вантажопідіймальних механізмах?
8. Як змінюється натяг каната при збільшенні кількості його віток?
9. Чому в схемах підйому використовуються напрямні блоки?
10. Які основні системи захисту застосовуються у кранових механізмах?
11. Які переваги дає застосування частотного керування?
12. Які технічні заходи підвищують надійність вантажопідіймального обладнання?

Використана література.

1. Транспортні системи електромеханічних комплексів: Конспект лекцій : навч. посіб. для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / уклад.: С.В. Зайченко, В.А. Побігайло, В.Г. Дубовик. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 136 с.
2. Динаміка й оптимізація підйомно-транспортних машин : монографія / В.С. Ловейкін, Ю.О. Ромасевич., Човнюк Ю.В., І.О. Кадикало. Київ : ЦП „КОМПРІНТІІ, 2019. 292 с.
3. Підйомно-транспортні машини: Розрахунки підіймальних і транспортувальних машин : підручник / В. С. Бондарев, О. І. Дубинець, М. П. Колісник та ін. Київ : Вища школа, 2009. 734 с.
4. Григоров О. В., Петренко Н. О. Вантажопідйомні машини : навч. посібник. Харків : НТУ «ХПІ», 2005. 304 с.
5. Голомовзий Є. Європейські і міжнародні стандарти на грузопідйомні крани. *Підйомні споруди. Спеціальна техніка*. 6 березня 2019. URL: [https://pro-ptm.blogspot.com/2019/03/blog-post\\_8.html](https://pro-ptm.blogspot.com/2019/03/blog-post_8.html) (дата звернення: 27.12.2025).

Навчально-методичне видання

**Шрамко Юрій Юрійович**

«Інжиніринг електромеханічних систем гірничих і  
металургійних комплексів»:  
курс лекцій з дисципліни

Самостійне електронне мережеве видання

Публікується в авторській редакції