МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

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

Кафедра електричної інженерії та кіберфізичних систем

# Кваліфікаційна робота

другий (магістерський) рівень
(рівень вищої освіти)

на тему Підвищення енергоефективності роботи насосних установок для будівель цивільного призначення

Виконав: студент 2 курсу, групи 8.1413
спеціальності
141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(код і назва спеціальності)

освітньої програми_____
(назва освітньої програми)
спеціалізації
(код і назва спеціалізації)

Рицар О.О.
(ініціали та прізвище)
Керівник проф., проф., д.т.н. Артемчук В.В.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Рецензент асистент Коваленко І.І.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Запоріжжя
2024

Запорізький національний університет

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

(повне найменування вищого навчального закладу )

Кафедра електричної інженерії та кіберфізичних систем

(повна назва кафедри)

Рівень вищої освіти другий (магістерський) рівень

(повна назва кафедри)

Спеціальність 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

(шифр і назва)

Спеціалізація

(шифр і назва)

Освітньо-професійна програма 141.00.11 Електроенергетика, електротехніка

(шифр і назва)

та електромеханіка

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри

д.т.н., доц. В.Л. Коваленко

“_01_” __грудня__2024 року

**З А В Д А Н Н Я**

на кваліфікаційну роботу студенту

Рицар Олександр Олександрович

1. Тема роботи: Підвищення енергоефективності роботи насосних установок для будівель цивільного призначення

Керівник роботи: Артемчук В.В.

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

2. Строк подання студентом роботи: 28 лютого 2024 року

3. Вихідні дані до роботи: поточний тариф вартості електроенергії; технічні параметри об’єкту; об’єми споживання електричної енергії будівльним об’єктом; технічні дані електропривода

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які рекомендовано розробити): вступ; 1) сучасні насосні системи; 2) Аналіз методів підвищення енергоефективності; 3) Інтеграція розумних систем у будівельні насосні установки; висновки

5. Перелік графічного матеріалу: 1) титульна сторінка; 2) огляд сучасних насосних систем; 3) електропривод насосів; 4) принципова схема ланки «перетворювач частоти – асинхронний двигун»; 5) висновки

6. Консультанти розділів дипломної роботи

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

7. Дата видачі завдання 01.06.2024 р.

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

| № з/п | Назва етапів дипломної роботи | Строк виконання етапів магістерської роботи | Примітка |
|---|---|---|---|
| 1 | Сучасні насосні системи | 01.10.2024 | |
| 2 | Аналіз методів підвищення енергоефективності | 01.11.2024 | |
| 3 | Інтеграція розумних систем у будівельні насосні установки | 01.12.2024 | |

Студент _____ (підпис) Рицар О.О. (прізвище та ініціали)

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

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

## АНОТАЦІЯ

У роботі досліджено методи підвищення енергоефективності насосних установок для будівель цивільного призначення. Розглянуто сучасні технології, зокрема частотне регулювання, використання енергоефективних матеріалів і інтеграцію з розумними мережами. Проведено аналіз впливу інноваційних рішень на зниження енергоспоживання та експлуатаційних витрат. Обґрунтовано доцільність впровадження новітніх технологій та запропоновано рекомендації для подолання існуючих бар’єрів.



Ключові слова: енергоефективність, насосні установки, частотні перетворювачі, розумні мережі, енергоефективні матеріали, моделювання



## ANOTATION

The study explores methods to improve the energy efficiency of pumping systems for civil buildings. Modern technologies, such as frequency regulation, the use of energy-efficient materials, and integration with smart grids, are examined. The impact of innovative solutions on reducing energy consumption and operational costs is analyzed. The feasibility of implementing advanced technologies is substantiated, and recommendations are provided to overcome existing challenges.



Keywords: energy efficiency, pumping systems, frequency converters, smart grids, energy-efficient materials, modeling.

ЗМІСТ

ВСТУП 6
1 СУЧАСНІ НАСОСНІ СИСТЕМИ 8
1.1 Конструктивні особливості насосних установок 8
1.2 Класифікація насосних систем для будівель 24
1.3 Аналіз енергоефективності насосних систем 27
2 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ 30
2.1 Використання частотного регулювання насосів 30
2.2 Застосування енергоефективних матеріалів в насосних системах 44
2.3 Вплив систем рекуперації енергії на продуктивність 47
3 ІНТЕГРАЦІЯ РОЗУМНИХ СИСТЕМ У БУДІВЕЛЬНІ НАСОСНІ УСТАНОВКИ 49
3.1 Моделювання режимів роботи електроприводу насосних систем 49
3.2 Використання датчиків і моніторингових систем 61
3.3 Сумісність насосних систем із розумними мережами 65
ВИСНОВКИ 68
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 69
ДОДАТКИ 73

# ВСТУП

На даний час питання енергетики мають особливе значення для нашої країни, особливо, враховуючи постійні терористичні обстріли нашої енергоінфраструктури росією. Тому розвиток енергозбереження, у тому числі і в будівельній галузі є актуальними і потребують постійного розвитку. Як відомо, будівлі не тільки відіграють важливу роль у створенні комфортних умов проживання, роботи та проходження служби, але й є значним споживачем енергії.

Пошуки шляхів зменшення енерговитрат, і зокрема, насосними системами є важливою частиною щодо зменшення споживання енергії та викидів парникових газів в будівельній галузі. Підвищення ефективності насосних установок зменшує експлуатаційні витрати та вплив на навколишнє середовище, оскільки інженерні системи будівель можуть споживати значну частину від загальної енергії будівлі. Крім того, дотримання сучасних стандартів і інтеграція розумних систем з насосними системами дозволяє покращити показники енергоефективності в будівництві.

Питання підвищення енергоефективності, зокрема, в будівництві цілком збігається з прийнятими державою програмами та нормативними документами щодо енергоефективності [1 – 3].

Метою роботи є аналіз методів зменшення енерговитрат насосних установок для будівель, зокрема, цивільного призначення шляхом вдосконалення їхніх конструкцій, режимів роботи та систем управління.

Задачі досліджень:

- провести аналіз сучасних насосних систем, які використовуються в будівлях цивільного призначення;
- аналіз основних факторів, що впливають на енергоефективність роботи насосів;

- розглянути технічні рішення, спрямовані на підвищення ефективності роботи насосних систем.

Об’єктом дослідження є насосні установки будівель цивільного призначення.

Предметом дослідження є методи і засоби підвищення енергоефективності насосних систем.

Науковою новизною дослідження є розробка та впровадження методології підвищення енергоефективності насосних установок. Ці методи включають використання інноваційних матеріалів, оптимізацію режимів роботи та впровадження розумних систем управління. Досягнення максимальних показників ефективності при мінімальному впливі на екологію можна досягти за допомогою інтеграції сучасних інженерних рішень і технологій.

# 1 СУЧАСНІ НАСОСНІ СИСТЕМИ

Насосні установки є ключовими елементами інженерних систем будівель, які забезпечують циркуляцію рідин у системах опалення, водопостачання, кондиціонування та пожежогасіння. Їх конструктивні особливості визначаються типом рідини, умовами експлуатації, енергоефективністю та специфічними вимогами до обслуговування. Насоси є універсальними пристроями, які забезпечують роботу інженерних систем у різних галузях. Їхнє призначення охоплює широкий спектр завдань: від транспортування рідин у побутових умовах до підтримки складних промислових і енергетичних процесів.

## 1.1 Конструктивні особливості насосних установок

Галузі застосування насосів саме широке. В промисловості їх використовують, наприклад, для циркуляції охолоджувальних рідин у металургійному виробництві, прокачування охолоджувальної рідини для різноманітних верстатів, перекачування нафти, газу, хімічних речовин на великих відстанях, транспортування корозійно активних середовищ. В енергетиці насоси використовують в гідро- і теплоелектростанціях (подача води під високим тиском на турбіни та перекачування теплоносія у системах охолодження або нагрівання). У сільському господарстві безумовно це полив рослин на полях, видалення надлишкової вологи з грунтів, водопостачання для тваринного господарства. У будівельній сфері насосні станції забезпечують постачання води та водовідведення в будівельних об’єктах, перекачування теплоносія у системах опалення, вентиляції та кондиціонування, в дренажних системах. Цікавим застосуванням насосів в баластних системах суден шляхом перекачування води між резервуарами, а також для охолодження двигунів внутрішнього згоряння. Крім того, насоси використовують для потреб охорони

довкілля, для перекачування рідини через системи фільтрації та очищення та у протипаводкових системах.

Основними функціями насосів є переміщення рідин, коли насоси використовуються для транспортування рідин у трубопроводах, забезпечують рух води, нафти, хімічних розчинів та інших рідин; підтримка необхідного тиску, коли насоси створюють потрібний тиск у системах водопостачання, опалення, охолодження; регулювання потоку, коли насоси забезпечують стабільну витрату рідини для підтримання оптимальних умов роботи систем; рекуперація енергії, коли у деяких системах насоси працюють у режимах зворотного потоку для вироблення енергії.

У якості приводів застосовують електродвигуни (найбільш поширені) та двигуни внутрішнього згоряння (використовують для автономних установок).

Конструктивне виконання насосів залежить від їх призначення, умов експлуатації, необхідної продуктивності, масо-габаритних параметрів тощо (таблиця 1.1, рис. 1.1).

Таблиця 1.1 – Типи насосів за призначенням

| Тип насоса | Призначення | Приклади застосування |
|---|---|---|
| Відцентрові | Переміщення великих об'ємів рідини | Водопостачання, опалення |
| Поршневі | Перекачування високонапірних потоків | Промислові системи, системи тиску |
| Мембранні | Переміщення агресивних рідин | Хімічна та фармацевтична промисловість |
| Шестеренні | Транспортування в'язких речовин | Нафтопереробка, мастильні системи |
| Гвинтові | Переміщення рідин із твердими частинками | Сільське господарство, очищення стоків |

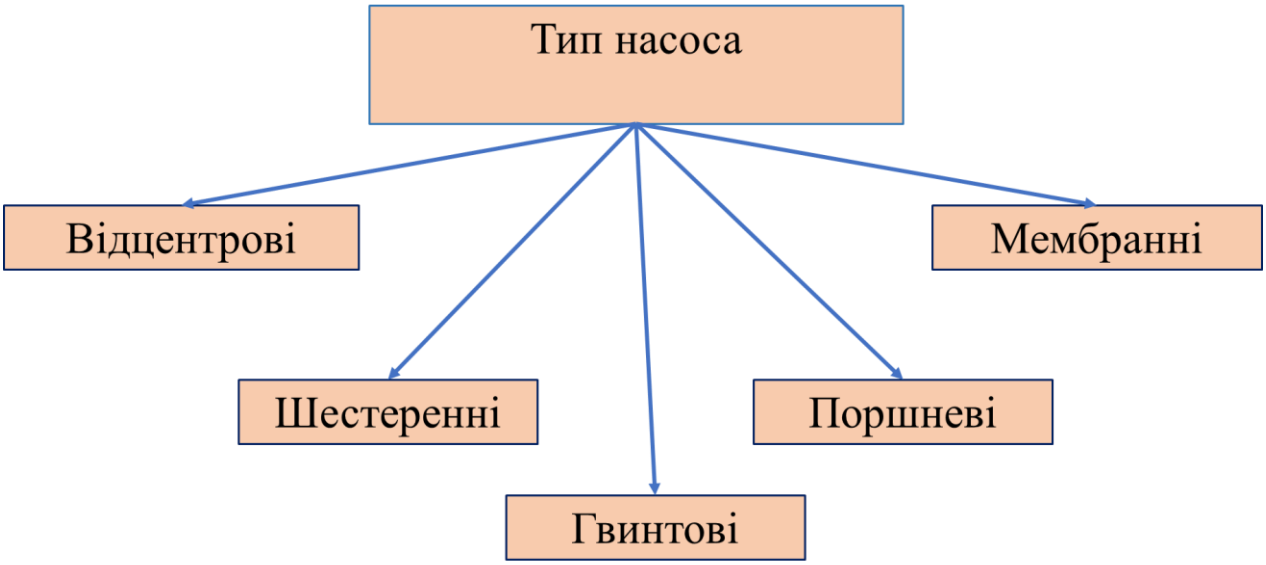



Рисунок 1.1 – Типи насосів

Розглянемо їх коротко.

Відцентрові насоси є одним із найпоширеніших типів насосів, що використовуються для перекачування рідин у різних галузях. Їхній принцип роботи базується на створенні відцентрової сили, яка змушує рідину рухатися від центру робочого колеса до його периферії, забезпечуючи необхідний напір і продуктивність.

Відцентрові насоси поділяють на такі типи [4, 5]:

- одинарні;
- багатоступеневі;
- вертикальні;
- горизонтальні;
- самовсмоктувальні.

Як правило, одинарні відцентрові насоси мають один робочий ступінь (одне колесо) і використовуються для середнього напору та витрати.

Багатоступеневі мають кілька робочих коліс для збільшення напору. Вони використовуються у системах високого тиску (водопостачання багатоповерхівок).

Вертикальні використовуються переважно для обмежених просторів через свою компактність і мають застосування в насосних станціях і дренажних системах.

Горизонтальні відцентрові насоси – це розповсюджений тип із простішим доступом для обслуговування.

Специфікою самовсмоктувальних насосів є те, що вони мають спеціальну конструкцію для роботи з рідинами, які містять газ.

Конструкція типового відцентрового насоса містить такі основні елементи, як робоче колесо (імпелер), корпус, вал, ущільнення, всмоктувальний і напірний патрубки (рис. 1.2).

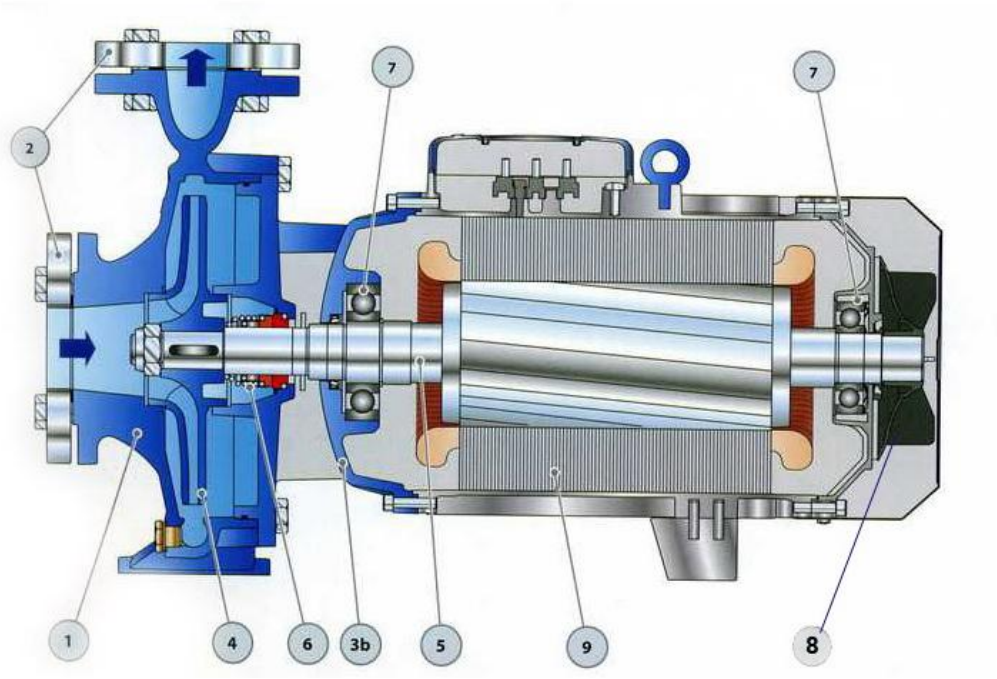



Рисунок 1.2 – Відцентровий насос:

1 – корпус насоса; 2 – фланці трубопроводів; 3 – корпус електромотора;

4 – робоче колесо; 5 – вал електромотора; 6 – ущільнення валу;

7 – підшипники кочення; 8 – крильчатка охолодження мотора; 9 – статор

Корпус захищає внутрішні компоненти та спрямовує потік рідини. Всмоктувальний і напірний патрубки забезпечують подачу та вихід рідини. Робоче колесо (імпелер) – це головний елемент, що створює відцентрову силу і має типи: відкриті, напіввідкриті, закриті. Вал з'єднує колесо з двигуном. Ущільнення запобігає витоку рідини між обертовими і нерухомими частинами.

Принцип роботи відцентрових насосів. Рідина потрапляє у вхідний патрубок і спрямовується в робоче колесо через всмоктувальну камеру. Робоче колесо, яке обертається з великою швидкістю, передає механічну енергію рідині, збільшуючи її швидкість. У розширювальній частині насоса (спіральній камері) швидкість рідини перетворюється на напір.

Основні параметри відцентрового насоса [6 – 8]:

- напір (Н), тобто максимальна висота, на яку насос може підняти рідину;
- витрата (Q), тобто обсяг рідини, яку насос перекачує за одиницю часу;
- коефіцієнт корисної дії (ККД).

Гідравлічну потужність визначають як:

$$P_{гідр} = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H$$

де

$P_{гідр}$ - гідравлічна потужність, Вт;

$\rho$ - густина рідини, кг/м³.

$g$ - прискорення вільного падіння, м/с².

$Q$ - витрата рідини, м³/с.

$H$ - напір, м.

ККД насоса:

$$\eta = \frac{P_{кор}}{P_{спож}} \cdot 100\%$$

А швидкість обертання:

$$n = \frac{60 \cdot \omega}{2\pi}$$

де

$n$ - швидкість обертання, об/хв.

$\omega$ - кутова швидкість, рад/с.

Перевагами відцентрових насосів є:

- простота конструкції за рахунок меншої кількості рухомих частин порівняно з іншими типами насосів;
- висока надійність і термін служби (за умови правильного обслуговування);
- висока продуктивність;
- широкий спектр застосування (водопостачання, опалення, кондиціонування, хімічні процеси, нафтохімія, охолоджувальні системи, іригація та дренаж, системи охолодження);
- високий ККД при оптимальних режимах експлуатації.

Недоліками відцентрових насосів є:

- залежність від наповнення (потребують попереднього заповнення рідиною для запуску);
- чутливість до в’язкості рідини (працюють ефективно тільки з рідинами низької в’язкості);
- ризик кавітації (утворення бульбашок у рідині через недостатній тиск на вході, що може пошкодити робоче колесо).

Отже, відцентрові насоси є універсальними, надійними та ефективними пристроями, які забезпечують широкий спектр завдань у різних галузях. Завдяки своїй простій конструкції, високій продуктивності та адаптованості до сучасних систем управління вони залишаються одним із найпоширеніших типів насосів.

Шестеренні насоси належать до об'ємних насосів, які використовуються для перекачування рідин за допомогою двох або більше зубчастих шестерень. Вони відомі своєю високою точністю дозування та здатністю працювати з в'язкими і густими рідинами.

Шестеренні насоси працюють за принципом об'ємного витіснення. Спочатку рідина потрапляє у простір між зубами шестерень на вході насоса, потім рідина транспортується вздовж стінок корпусу за рахунок обертання шестерень, на виході насоса зуби шестерень з'єднуються, витісняючи рідину у вихідний патрубок [4, 6].

Конструкція шестеренних насосів є доволі простою (рис. 1.3).

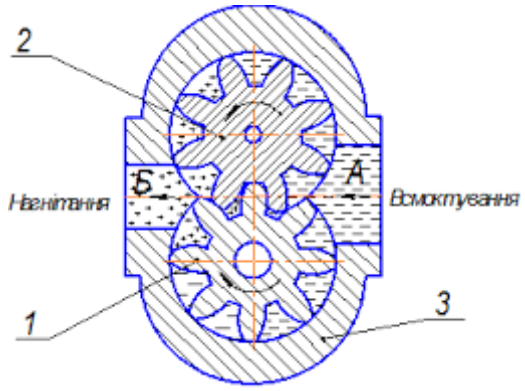



Рисунок 1.3 – Шестеренний насос:
1, 2 – шестерні; 3 – корпус

Переваги шестеренних насосів:

- висока точність;
- рівномірна подача рідини;

- можуть працювати з мастилами і навіть бітумами;
- надійність;
- простота конструкції та довгий термін служби;
- компактність.

Недоліки шестеренних насосів:

- обмеження швидкості;
- чутливість до твердих частинок;
- високий рівень шуму;
- обмеження робочого тиску.

Області застосування:

- в нафтовій промисловості для перекачування в'язких рідин, таких як мастила, бітум, важкі нафтопродукти;
- в хімічній промисловості для транспортування реагентів і розчинів з високою в'язкістю;
- в фармацевтиці для дозування рідин з високою точністю;
- в сільському господарстві для транспортування добрив, рідких кормів;
- в харчовій промисловості для роботи з харчовими маслами, сиропами, шоколадом.

Шестеренні насоси можуть також застосовуватись в будівлях цивільного призначення в деяких системах опалення для перекачування густих теплоносіїв, в паливних системах для подавання дизельного палива або мазуту для котлів (в певних ситуаціях).

Поршневі насоси належать до об'ємних насосів і використовуються для створення високого тиску в системах. Їхня робота базується на зворотно-поступальному русі поршня в циліндрі, який змінює об’єм робочої камери, витісняючи чи засмоктуючи рідину (рис. 1.4).

Типи поршневих насосів [4]:

- одинарної дії, коли рідина перекачується тільки під час одного ходу поршня (нагнітального);

- подвійної дії, коли рідина перекачується під час обох ходів поршня;
- мультиплунжерні мають кілька паралельно працюючих поршнів.

Переваги поршневих насосів:

- здатні створювати надзвичайно високий тиск (до 5000 бар);
- точність дозування;
- робота з агресивними середовищами (завдяки використанню спеціальних матеріалів можуть працювати з кислотами, лугами, абразивами).

Недоліки поршневих насосів:

- низька продуктивність;
- висока вартість обслуговування;
- вимагають регулярного технічного обслуговування клапанів і ущільнень;
- пульсація потоку;
- висока вартість;
- складність конструкції.

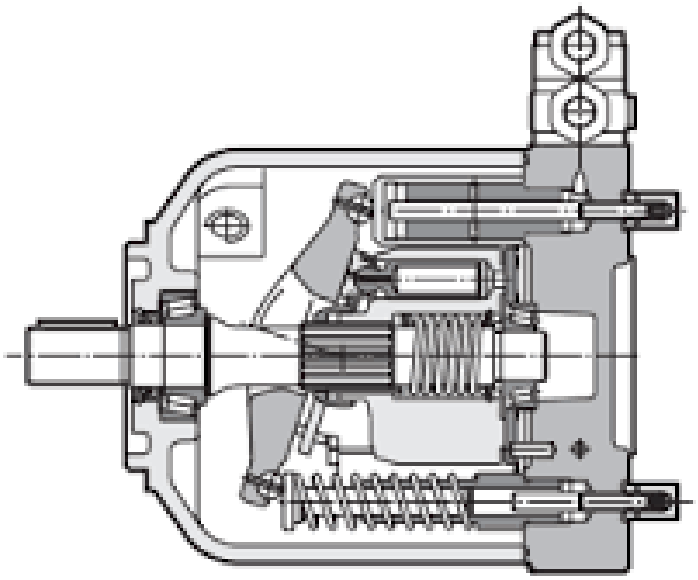


Рисунок 1.4 – Поршневий насос

У будівельній галузі поршневі насоси мають лише специфічне використання. Наприклад, це можуть бути Системи пожежогасіння, де поршневі насоси можуть забезпечувати високий напір води, необхідний для роботи протипожежних систем у багатоповерхових будівлях. Інколи вони можуть використовуватися для створення високого тиску з метою очищення фасадів будівель. Вони актуальні для подачі води на великі висоти, наприклад, у багатоповерхових будівлях або хмарочосах, де потрібно забезпечити тиск вище можливостей звичайних насосів, а також у спеціалізованих будівлях (наприклад, лабораторіях, виробничих приміщеннях) поршневі насоси використовуються для подачі технологічних рідин.

Обмеження застосування поршневих насосів у будівельній галузі можна пояснити декількома факторами. По-перше, поршневі насоси мають відносно низьку продуктивність у порівнянні з відцентровими насосами, що робить їх менш підходящими для систем із великими обсягами рідини. По-друге, це пульсація потоку, що потребує додаткових заходів для згладжування пульсацій (акумулятори, демпфери). По-третє, вони більш дорогі і складні в порівнянні з іншими типами. Також, через високий тиск і зношення ущільнень ці насоси потребують частішого технічного обслуговування. Саме тому у будівельних інженерних системах поршневі насоси використовуються вибірково, переважно там, де потрібен високий тиск або точна подача рідини. Для таких завдань, як пожежогасіння, водопостачання на великі висоти або спеціалізовані технологічні процеси, поршневі насоси можуть бути доцільними. Однак у більшості випадків будівлі використовують відцентрові насоси завдяки їхній універсальності, продуктивності та нижчій вартості.

Мембранні насоси також відноситься до типу об'ємних насосів, у яких транспортування рідини здійснюється за допомогою гнучкої мембрани, що рухається вперед-назад під дією механічного або пневматичного приводу. Вони використовуються в системах, де важливо уникати контакту робочої рідини з механічними частинами насоса [4].

Принцип роботи мембранних насосів має фазу всмоктування і фазу нагнітання (рис. 1.5).

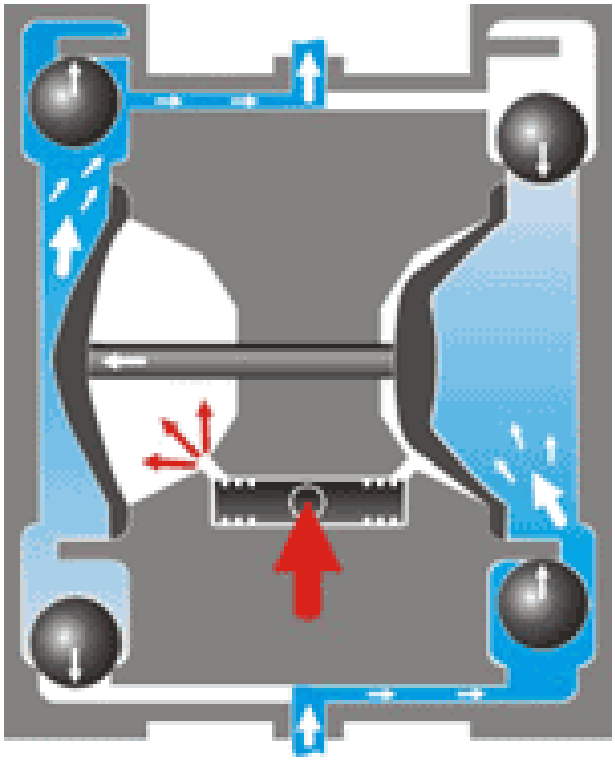


Рисунок 1.5 – Мембранний насос

Під час фази всмоктування мембрана прогинається в одну сторону, створюючи вакуум у робочій камері, що сприяє засмоктуванню рідини через вхідний клапан, а під час фази нагнітання мембрана прогинається в протилежну сторону, витісняючи рідину через вихідний клапан.

Односторонні клапани забезпечують рух рідини тільки в одному напрямку.

Формула розрахунку продуктивності:

$$Q = A \cdot S \cdot n$$

$Q$ – витрата рідини, м³/с.

$A$ – площа мембрани, м².

$S$ – максимальний прогин мембрани, м.

$n$ – частота рухів мембрани, 1/с.

Мембранний насос має такі основні елементи:

- мембрана – еластичний елемент (гума, тефлон, неопрен), що забезпечує герметичність і переміщення рідини;
- камера для рідини являє собою простір, у якому відбувається переміщення рідини;
- привід може бути механічним або пневматичним. При механічному приводу рух мембрани забезпечується важелем або поршнем. При пневматичному – мембрана рухається за рахунок стисненого повітря;
- вхідний і вихідний клапани запобігають зворотному потоку рідини;
- корпус насоса.

Перевагами мембранних насосів є:

- герметичність;
- відсутність прямого контакту рідини з конструктивними частинами, що важливо для агресивних або токсичних середовищ;
- можливість роботи з абразивними рідинами;
- стійкість до корозії.
- здатні працювати без попереднього заповнення робочої камери рідиною;
- низькі експлуатаційні витрати:

Недоліками мембранних насосів є:

- обмежена продуктивність, тому вони не підходять для перекачування великих обсягів рідини;
- низька продуктивність;
- чутливість до високого тиску;
- втома матеріалу, що приводить до пошкодження або повного виходу з ладу мембрани.

У багатьох випадках експлуатація мембранних насосів обмежується специфічними завданнями, наприклад, роботою з токсичними чи агресивними середовищами. Саме тому вони знайшли найбільше розповсюдження в хімічній промисловості (через їх корозійну стійкість); фармацевтиці – для роботи з чистими та стерильними рідинами; в харчовій промисловості для перекачування харчових продуктів, наприклад, таких як соки, масла, сиропи. В будівельній галузі практично не використовуються, окрім випадків приготування сумішей з хімічними реагентами і для систем водоочищення.

Гвинтові насоси належать до об'ємних насосів і використовуються для перекачування рідин із різними в'язкістю та складом. Вони забезпечують стабільний і рівномірний потік без пульсацій, завдяки чому знаходять широке застосування в різних галузях промисловості та інженерних системах [4].

Гвинтовий насос працює за рахунок обертання одного або кількох гвинтів у корпусі, які захоплюють рідину та переміщують її уздовж осі. Рідина заповнює простір між гвинтами і стінками корпусу, рухаючись без значних коливань. Має три фази, а саме фаза всмоктування, коли рідина надходить у простір між витками гвинта; фаза транспортування, при якому обертання гвинта переміщує рідину уздовж корпусу без розриву потоку; фаза нагнітання, коли рідина виходить із нагнітального патрубка під стабільним тиском.

Основними елементами гвинтового насоса є:

- гвинт є основним елементом насоса. Може бути один (моношнековий насос) або кілька (багатошнекові насоси);
- корпус;
- вал;
- ущільнення;
- патрубки.

Гвинтові насоси поділяються на такі типи:

1) одногвинтові (моношнекові), які складаються з одного гвинта, що обертається у корпусі;

2) у двогвинтових використовують два гвинти, що обертаються в протилежних напрямках;
3) багатогвинтові мають три або більше гвинтів, які працюють синхронно. Багатогвинтові насоси забезпечують рівномірний потік для великих обсягів рідини.

Переваги гвинтових насосів:

- рівномірний потік;
- універсальність;
- здатні працювати з рідинами різної в'язкості, включаючи густі та абразивні;
- висока надійність;
- міцність конструкції і мінімальний знос елементів насоса;
- відносна тиха робота;
- енергоефективність;
- високий ККД.

Недоліки гвинтових насосів:

- відносна висока вартість;
- складність у виготовленні;
- більші габарити.

Гвинтові насоси застосовують у нафтовій промисловості для перекачування нафти, мазуту, змащувальних рідин; у хімічній промисловості для роботи з в’язкими хімічними реагентами; у харчовій промисловості; у сільському господарстві для транспортування рідких добрив або кормових сумішей; у будівельній сфері гвинтові насоси майже не використовуються, окрім систем водовідведення та дренажу.

Використання гвинтових насосів у будівельній галузі обмежено, оскільки вони поступаються відцентровим насосам за продуктивністю та економічністю, мають високу вартість. Але, як вже зазначалось вище, вони використовуються в дренажних системах для роботи з густими стоками або мулом, а також в

спеціалізованих об'єктах, де потрібна стабільність потоку густих або в'язких рідин.

Порівняльна таблиця характеристик різних насосів наведена в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Порівняльна характеристика різних типів насосів

| Характеристика | Відцентрові насоси | Шестеренні насоси | Поршневі насоси | Мембранні насоси | Гвинтові насоси |
|---|---|---|---|---|---|
| Продуктивність, м³/год | 10…1000 | 0.5…100 | 0.1…50 | 0.1…100 | 5…500 |
| Тиск (напір), м | до 200 | до 50 | до 3000 | до 200 | до 1000 |
| Робота з в’язкими рідинами, сР | Погана (макс. ~50) | Висока (до 100 000) | Висока (до 200 000) | Висока (до 70 000) | Висока (до 1000 000) |
| Рівномірність потоку | Середня | Висока | Середня | Середня | Висока |
| Герметичність | Низька | Середня | Середня | Висока | Середня |
| Стійкість до агресивних середовищ | Низька | Середня | Висока | Висока | Середня |
| Стійкість до абразивів | Низька | Середня | Висока (залежить від матеріалів) | Висока | Низька |
| Енергоефективність, % | Висока (ККД до 90) | Середня (ККД до 75) | Середня (ККД до 70) | Середня (ККД до 70) | Висока (ККД до 85) |
| Гучність | Середня | Висока | Висока | Низька | Низька |
| Вартість обслуговування | Низька | Середня | Висока | Середня | Висока |
| Стійкість до твердих частинок | Погана | Низька | Висока (залежить від клапанів) | Середня | Низька |
| Ціна (порівняно) | Низька | Середня | Висока | Середня | Висока |

Деякі пояснення до таблиці 1.2.

Відцентрові насоси мають найбільший діапазон продуктивності завдяки своїй універсальності. Поршневі та шестеренні насоси краще підходять для точного дозування.

Поршневі насоси забезпечують найвищий напір, що робить їх найбільш доцільними для систем із високим тиском.

Гвинтові насоси мають найкращу здатність для роботи з в'язкими густими рідинами.

Мембранні насоси мають перевагу у герметичності завдяки ізольованій конструкції.

Відцентрові та гвинтові насоси мають найкращі показники ККД, що знижує витрати енергії.

Гучність насосів залежить від типу механізму (обертальний, поступальний), конструктивних особливостей (наявність шумопоглинаючих елементів) та швидкості обертання. Наприклад, відцентрові насоси зазвичай, в залежності від швидкості обертання робочого колеса мають середній рівень шуму (~50…70 дБ), гвинтові та мембранні насоси мають шум приблизно на рівні ~40…60 дБ, поршневі й шестеренні насоси часто мають вищий рівень шуму (~60…90 дБ) через поступальні рухи або контакт зубів.

Вартість обслуговування залежить від частоти зношування компонентів (ущільнень, клапанів, мембран тощо); специфіки конструкції (чим складніша конструкція, тим дорожче обслуговування). Відцентрові насоси найдешевші в обслуговуванні завдяки простій конструкції. Поршневі та гвинтові насоси дорожчі через складність заміни ущільнень, клапанів або гвинтів. Мембранні насоси мають середню вартість обслуговування, основною проблемою де є заміна мембрани.

Ціна (порівняно) насосів має широкий діапазон в залежності від матеріалів виготовлення (метал, композити, гума), технологічної складності, продуктивності та спеціалізації. Наприклад, відцентрові насоси найдешевші (типова ціна ~ 500…2000 $ для будівельних потреб); гвинтові та поршневі

насоси найдорожчі (можуть коштувати ~ 5000…20000 $ залежно від моделі); мембранні насоси мають середній діапазон цін (~ 1000…5000 $).

## 1.2 Класифікація насосних систем для будівель

Насосні системи використовуються для будівель цивільного та нецивільного призначення. Розглянемо їх спільні риси та відмінності. Насосні системи в будівлях цивільного призначення забезпечують водопостачання, опалення, кондиціонування, дренаж та інші інженерні завдання. Будівлі не цивільного призначення включають промислові об'єкти, військові споруди, інфраструктурні об'єкти, енергетичні комплекси, лабораторії, склади, і спеціалізовані виробничі приміщення. Насосні системи в таких будівлях розробляються з урахуванням підвищених вимог до продуктивності, надійності, адаптивності до екстремальних умов і відповідності специфічним технологічним процесам [6 - 8].

Насосні системи класифікуються за:

- призначенням;
- типом насоса;
- приводом;
- гідравлічними параметрами.

Класифікація насосних систем для цивільних будівель за призначенням:

- системи водопостачання – забезпечують подачу питної або технічної води;
- системи опалення та гарячого водопостачання;
- системи кондиціонування і вентиляції;
- системи дренажу та відведення стоків – використовуються для перекачування дощових, ґрунтових або стічних вод;
- протипожежні системи.

Класифікація за типом насоса. Дане питання було детально розглянуто у попередньому підрозділі.

Класифікація за способом приводу:

- електричний;
- з використанням двигунів внутрішнього згоряння;
- гідравлічні;
- пневматичні (застосовуються для перекачування рідин у вибухонебезпечних умовах).

За принципом роботи:

- динамічні насоси. Такі насоси створюють рух рідини за рахунок кінетичної енергії. До таких відносяться відцентрові, осьові, діагональні насоси;
- об’ємні насоси. Працюють за принципом зміни об’єму робочої камери. Приклади об’ємних насосів: поршневі, мембранні, шестеренні насоси.

За типом транспортування рідини:

- система подачі питної води;
- система транспортування забрудненої або дощової води;
- системи для спеціалізованих рідин.

За умовами роботи:

1) системи низького тиску. Робочий тиск до 10 бар. Застосовуються у водопостачанні та опаленні;
2) системи середнього тиску. Робочий тиск до 50 бар. Використовуються у протипожежних системах.
3) системи високого тиску. Робочий тиск понад 50 бар. Призначені для спеціалізованих задач, наприклад, у системах очищення води.

За типом рідини:

- для води;
- для хімічно агресивних середовищ;

- для густих і в’язких рідин;
- для забруднених рідин.

Наведемо деякі відмінності щодо насосних систем для будівель не цивільного призначення.

Відмінністю за призначенням (додатково до попереднього):

- системи технологічного водопостачання для подачі води в технологічні процеси та охолоджувальні системи;
- системи відведення промислових стоків для транспортування відпрацьованих хімічних, агресивних чи забруднених рідин;
- системи охолодження та теплопостачання для забезпечення циркуляції теплоносія або охолоджувальних рідин у виробничих процесах;
- системи змащення та перекачування технічних рідин, для подачі мастильних матеріалів у обладнання;
- системи перекачування хімічних речовин для транспортування агресивних, токсичних або високов’язких рідин;
- системи транспортування газів та рідин під високим тиском, використовуються на об'єктах високого технологічного навантаження (нафтохімічні комплекси, енергетика).

Щодо класифікації насосів за типом, то вони збігаються з попередньою, але додаються ще спеціалізовані насоси, такі як, наприклад, газові компресори, багатоступеневі насоси і т.д.

За умовами експлуатації:

1) звичайні умови (виробничі будівлі та склади);
2) екстремальні умови:
   - високі температури (металургія, енергетика);
   - вибухонебезпечне середовище (нафтогазова промисловість);
   - високий вміст агресивних або забруднених речовин у рідинах.
3) мобільні системи (аварійне водовідведення або пожежогасіння).

Приклади застосування насосних систем для будівель не цивільного призначення. На нафтопереробних заводах – для транспортування нафтопродуктів; в металургії для систем охолодження плавильних печей, в енергетиці для охолодження конденсаторів і турбін, в хімічній промисловості для перекачування реагентів і агресивних середовищ, на військових об'єктах для підготовки пального або водопостачання в польових умовах.

## 1.3 Аналіз енергоефективності насосних систем

Енергоефективність насосних систем є важливим фактором у зниженні витрат на експлуатацію інженерних систем будівель і промислових об'єктів. Насосні системи споживають значну частину електроенергії в інженерних мережах, і оптимізація їх роботи дозволяє досягти суттєвої економії ресурсів та зниження викидів $CO_2$.

Енергоефективність насосної системи визначається коефіцієнтом корисної дії (ККД), який показує відношення корисної потужності (гідравлічної) до спожитої електричної потужності:

$$\eta = \frac{P_{гідр}}{P_{ел}} \cdot 100\,\%$$

$P_{гідр}$ - гідравлічна потужність, Вт.

$P_{ел}$ - електрична потужність, Вт.

Сучасні насосні системи мають ККД до 90 %, однак у реальних умовах цей показник може знижуватися через некоректний підбір обладнання, втрати в трубопроводах, або недоліки системи керування.

На енергоефективність впливають різноманітні фактори [9, 10], а саме правильний підбір насоса, системи керування, гідравлічна арматура, технічний

стан обладнання, тип насосів. Під правильним підбором насосів мається на увазі, що насоси повинні працювати у зоні найвищого ККД (характеристична точка), а перевантаження або недовантаження насоса призводить до підвищеного енергоспоживання. Раціональна робота системи керування дозволяє оперативно реагувати на вхідні сигнали та швидко адаптувати роботу насоса до змінних умов експлуатації. Гідравлічні втрати виникають через невідповідність діаметра трубопроводів, зайві вигини та нерівності викликають додаткові втрати енергії. Технічний стан обладнання також впливає на енергоефективність, наприклад, зношування робочих коліс, ущільнень, або валів, негативний стан гідравлічної арматури знижує ефективність. Вплив типу насосів можна показати на прикладі, коли відцентрові насоси є більш енергоефективними для роботи з великими об’ємами рідини, тоді як поршневі насоси краще підходять для роботи з високим тиском, але споживають більше енергії. Порівняльна таблиця енергоефективності різних насосів наведена в таблиці 1.3.

Загальні шляхи підвищення енергоефективності. Більш детально це питання буде розглянуто в інших розділах. Якщо коротко, то це можуть бути такі напрямки [7, 8, 11]:

- впровадження частотних перетворювачів (ЧП);
- модернізація трубопроводів;
- теплова ізоляція;
- періодичне обслуговування;
- використання сучасного обладнання.

Для прикладу розглянемо вплив енергоефективності на експлуатаційні витрати. Енергоефективність насосів має прямий вплив на витрати енергії. Наприклад, для насосної станції потужністю 10 кВт, яка працює 4000 годин на рік, зниження ККД на 5% збільшує споживання енергії на:

$$\Delta E = 10 \cdot 0.05 \cdot 4000 = 2000 \text{ кВт·год}$$

А це означає збільшення витрат на:

$$2000 \cdot 6{,}9 = 13800 \text{ грн/рік.}$$

Тобто майже 14000 грн. – це втрати від одного насосу, при зниженні його ККД всього на 5 %. А якщо враховувати, що таких насосів може бути декілька і зниження ККД може бути більше, а значить і сумарні витрати будуть більшими. Причому це витрати, які можна запобігти.

Таблиця 1.3 – Порівняльна таблиця енергоефективності різних насосів

| Тип насоса | ККД, % | Споживання енергії (відносно) | Оптимальні умови роботи |
|---|---|---|---|
| Відцентрові | 70…90 | Низьке | Робота з великими об’ємами при низькому напорі. |
| Поршневі | 50…70 | Високе | Робота з високим тиском, точне дозування. |
| Шестеренні | 60…80 | Середнє | Робота з густими рідинами. |
| Мембранні | 40…70 | Високе | Перекачування агресивних або густих середовищ. |
| Гвинтові | 75…85 | Середнє | Робота з високов’язкими рідинами. |

Отже, як видно енергоефективність насосних систем безпосередньо впливає на витрати електроенергії, екологічний слід та довговічність обладнання.

# 2 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ

## 2.1 Використання частотного регулювання насосів

Частотне регулювання насосів – це один із найефективніших способів оптимізації їхньої роботи. Воно дозволяє адаптувати продуктивність насоса до фактичного споживання рідини, знижуючи витрати енергії, покращуючи економічні показники системи та зменшуючи зношення обладнання [12 – 17].

Частотне регулювання полягає у зміні швидкості обертання електродвигуна за допомогою частотного перетворювача (ЧП). Основний принцип базується на залежності продуктивності насоса від частоти обертання [12].

Закон подібності для насосів:

$$Q \propto n$$

де

$Q$ – продуктивність насоса (м³/год);

$n$ – частота обертання (об/хв).

Залежність напору від швидкості:

$$H \propto n^2$$

$H$ – напір (м).

Залежність потужності від швидкості:

$$P \propto n^3$$

$P$ – споживана потужність (кВт).

Ці залежності показують, що зменшення швидкості обертання навіть на 20 % може знизити споживану потужність на 50 %, а зменшення швидкості до 50 % знижує енергоспоживання приблизно на 87,5 %.

Розглянемо переваги частотного регулювання:

1) зниження енергоспоживання на 30…50 % у системах зі змінним навантаженням;
2) плавний пуск, що супроводжується зменшенням механічних навантажень на систему;
3) збільшення терміну служби обладнання;
4) гнучкість у керуванні, швидке реагування на потреби системи;
5) підвищення надійності системи.

Енергоефективність насосної системи залежить від багатьох факторів, які вже розглядались у попередньому розділі. При розрахунку енергоефективності враховують гідравлічну потужність, продуктивність, напір, питому вагу рідини.

Тоді, гідравлічну потужність насоса знаходять, як:

$$P_{\text{гідр}} = Q \cdot H \cdot \gamma$$

де

$P_{\text{гідр}}$ – гідравлічна потужність, Вт;

$Q$ – продуктивність, м³/с;

$H$ – напір, м.

$\gamma$ – питома вага рідини, Н/м³.

Економія енергії завдяки частотному регулюванню можна знайти як:

$$\Delta E = P_{\text{ст}} \cdot t - P_{\text{чп}} \cdot t$$

де

$P_{\text{ст}}$ – потужність стандартного насоса, Вт;

$P_{чп}$ – потужність насоса з частотним регулюванням, Вт;

$t$ – час роботи, год.

А економічний ефект від впровадження частотних перетворювачів визначаємо як:

$$C_{ек} = \Delta E \cdot C_e$$

де

$C_{ек}$ – економія коштів, грн/рік;

$\Delta E$ – зекономлена енергія, кВт·год;

$C_e$ – вартість 1 кВт·год електроенергії, грн.

На рисунку 2.1 представлено приклад залежності енергоспоживання від частоти обертання.

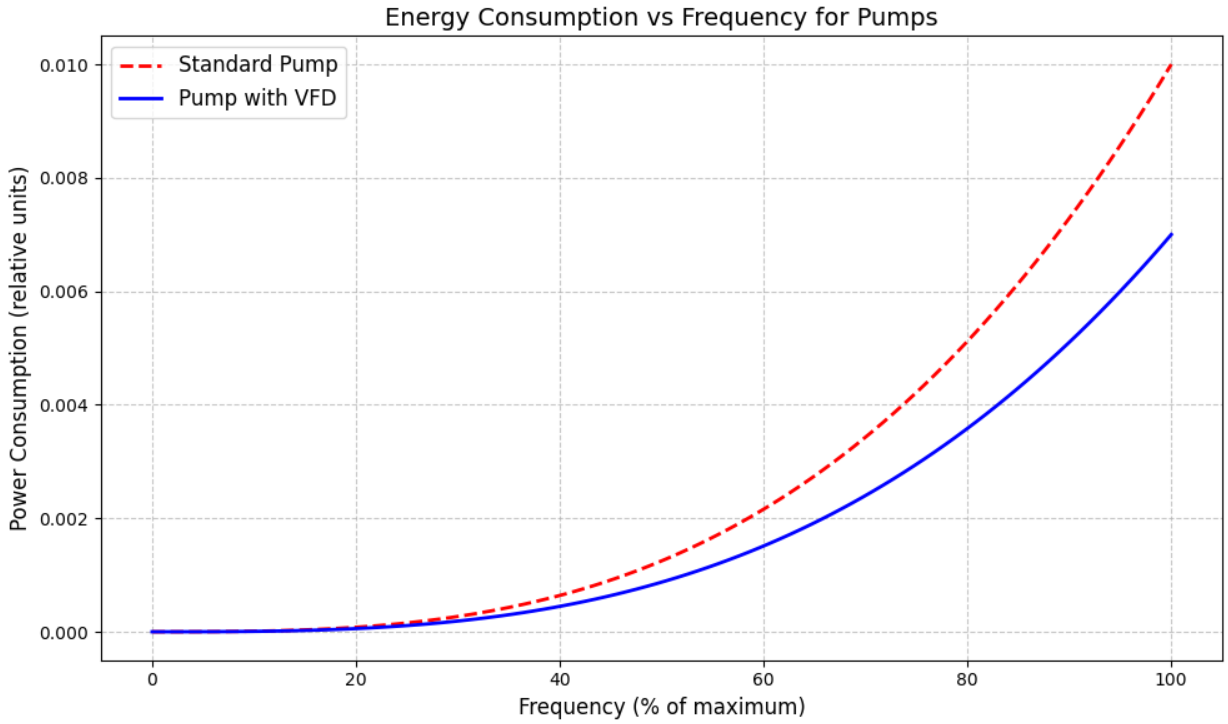



Рисунок 2.1 – Графік залежності енергоспоживання від частоти обертання

Як показує досвід застосування таких систем в реальних об’єктах частотні перетворювачі в системах водопостачання в житловому господарстві дозволяють зменшити витрати на електроенергію до 40 %, для промислових об’єктів впровадження ЧП на насосних станціях скоротило витрати електроенергії на 30 % при транспортуванні рідин.

Енергозбереження у системах з ЧР залежить від умов експлуатації. Наведемо реальні приклади практичного застосування:

1) системи зі змінним потоком, тобто системи, які працюють із змінним навантаженням (наприклад, HVAC, водопостачання), отримують найбільшу користь, оскільки ЧР дозволяє динамічно регулювати швидкість двигуна;
2) зменшення стартових витрат енергії. ЧР забезпечує плавний запуск і зупинку насоса, мінімізуючи енергетичний сплеск під час запуску;
3) зниження системних втрат за рахунок запобігання перекачування зайвих обсягів рідини або дроселювання. ЧР виключає таким чином непотрібне енергоспоживання.

Оцінку енергозбереження (у відносних одиницях) можна здійснити за [18]:

$$E_{ен} = \left(1 - \frac{n^3_{зниж}}{n^3_{макс}}\right) \cdot 100$$

де

$n_{зниж}$ - знижена швидкість (% від максимальної);

$n_{макс}$ - максимальна швидкість.

Наведемо приклад. Нехай потреба продуктивності насоса у певний період буде 70 % від максимальної. Тоді:

$$E_{ен} = \left(1 - \frac{70^3}{100^3}\right) \cdot 100 = 65,7$$

Отже, це означає, що енергоспоживання знизиться на 65,7 %.

Основні етапи роботи ЧП включають випрямлення напруги, коли відбувається перетворення змінного струму (AC) на постійний струм (DC); інвертування, тобто зворотне перетворення постійного струму на змінний із необхідною частотою і напругою.

Керування відбувається за рахунок використання алгоритмів керування для підтримки оптимальних параметрів роботи системи. Частота, що подається на електродвигун, визначає швидкість його обертання, що забезпечує плавне регулювання продуктивності насоса.

Перетворювачі для насосів поділяють на такі типи:

- системи керування постійною напругою
- напівпровідникові перетворювачі;
- плавні пускачі;
- частотні перетворювачі (VFD – Variable Frequency Drive).

Системи керування постійною напругою використовуються в насосах постійного струму і найбільш ефективні для спеціалізованих задач. В будівельній галузі практично не використовуються, тому зупинятися на цьому не будемо.

Напівпровідникові перетворювачі зазвичай застосовуються для високопотужних насосів. Але специфікою їх застосування є те, що вони працюють у системах постійного навантаження [19].

Плавні пускачі мають обмежений функціонал і застосовуються для зменшення пускових струмів та механічних навантажень. Такі системи забезпечують плавний старт і зупинку насоса, але не дозволяють регулювати швидкість.

Найпоширеніший і сучасний тип для регулювання швидкості електродвигунів є частотні перетворювачі (VFD). Складові схеми

перетворювача включають силову частину з вхідними дроселями, напівкерованим випрямлячем, дроселями в колі постійного струму, блоком конденсаторів і вихідним інвертором, який базується на IGBT-модулях (рис. 2.2, 2.3) [20 – 23].

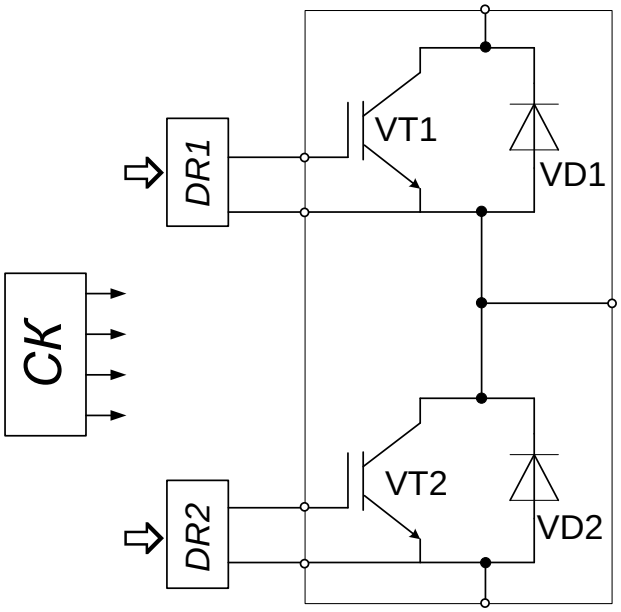



Рисунок 2.2 – IGBT модуль

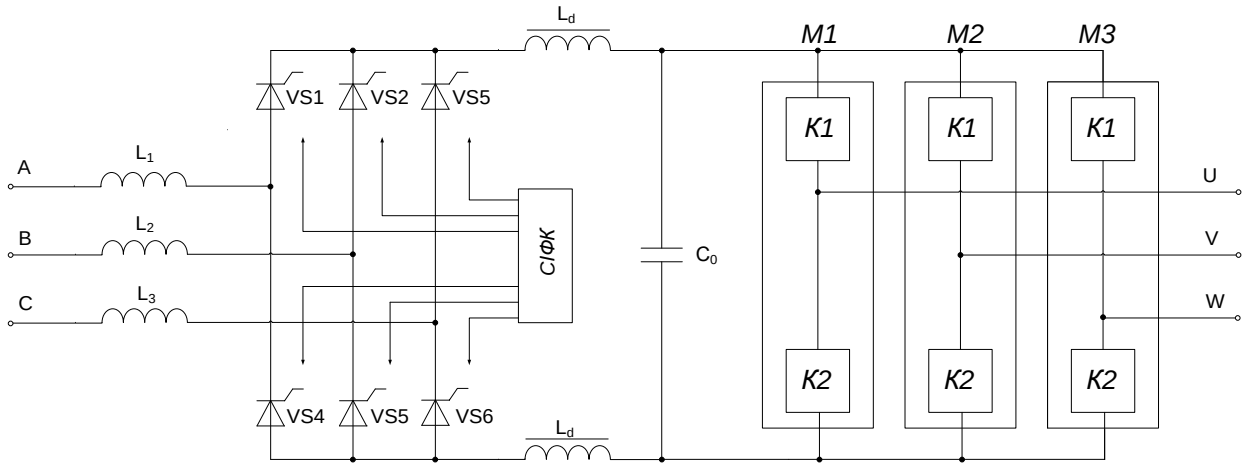



Рисунок 2.3 – Схема перетворювача частоти

Схема Ларіонова складається з тиристорно-діодних модилів, які складають випрямляч. Їхня мета полягає в тому, щоб випрямити вхідну змінну напругу та забезпечити з’єднання силової частини електропривода з мережею.

Незважаючи на те, що вона потребує вдвічі більшої кількості напівпровідників, мостова схема має багато переваг порівняно з нульовою схемою, тому вона широко використовується в електроприводах. Незважаючи на те, що всі напівкеровані випрямлячі мають невеликий зсув споживаного струму відносно живильної напруги, їх форма споживаного струму несиметрична, а діапазон регулювання випрямленої напруги обмежений, що робить інвертування більш складним завданням. Такі випрямлячі використовуються в основному в нереверсивних електроприводах і в ситуаціях, коли не потрібний широкий діапазон регулювання. У колі постійного струму блоки конденсаторів і дроселів створюють низькочастотний фільтр для випрямленої напруги.

Частотні перетворювачі поділяють на такі основні типи:

- скалярні (V/F) перетворювачі;
- векторні перетворювачі;
- перетворювачі з прямим керуванням моментом (DTC).

Скалярні частотні перетворювачі (V/F) регулюють швидкість електродвигуна, змінюючи частоту і напругу змінного струму, підтримуючи між ними пропорційне співвідношення. Вони є найпростішим і найбільш поширеним типом перетворювачів для завдань, де не потрібна висока точність керування [14, 15].

У скалярних перетворювачах швидкість двигуна змінюється відповідно до заданого співвідношення напруги $U$ і частоти $f$:

$$U/f = \text{const}$$

Зміна частоти струму змінює швидкість обертання двигуна. Напруга збільшується або зменшується відповідно до частоти, щоб запобігти перенапруженню або перегріву двигуна.

Особливостями скалярних перетворювачів є простота керування, тобто вони не потребують складних алгоритмів керування; плавний запуск,

забезпечуючи м'який старт двигуна, що знижує механічні навантаження; економічність, тобто доступні за ціною та підходять для невимогливих застосувань.

Скалярні перетворювачі найкраще підходять для застосувань, де динаміка системи не є критичною, наприклад, в насосних системах вони забезпечують регулювання продуктивності залежно від потреб системи; регулюють швидкість обертання вентиляторів залежно від температури або рівня забруднення повітря; в системах опалення та кондиціонування (HVAC), регулюючи подачу повітря чи теплоносія відповідно до потреб.

Перевагами скалярних перетворювачів є:

- простота налаштування;
- відносна низька вартість;
- економія енергії.

Недоліками скалярних перетворювачів є:

- відсутність точного контролю моменту. Скалярні перетворювачі не можуть забезпечити стабільність моменту на валу двигуна за змінних умов;
- непридатність для динамічних застосувань, тобто вони повільно реагують на зміни навантаження;
- залежність від характеристик двигуна. Вони не можуть ефективно працювати з асинхронними двигунами без детального узгодження параметрів.

Деякі скалярні перетворювачі, які можна використовувати в деяких системах водопостачання:

1) Siemens SINAMICS V20:

- потужність: 0,37…30 кВт;
- підходить для насосів і вентиляторів;
- простий у використанні.

2) Delta Electronics VFD-E Series:

- потужність: 0,75…22 кВт;
- вбудовані функції для регулювання швидкості насосів і вентиляторів.

3) Schneider Electric Altivar 12:

- потужність: 0,18…4 кВт;
- компактний розмір, підходить для невеликих систем.

Отже, скалярні частотні перетворювачі (V/F) доцільно використовувати для простих застосувань у будівництві та промисловості, де не потрібна висока динаміка чи точність. Вони економічні, прості в налаштуванні та ефективні у задачах зі змінним навантаженням, таких як насоси, вентилятори та конвеєри. Однак, у випадках, де потрібен точний контроль моменту, доцільніше використовувати векторні або більш складні перетворювачі.

Векторні частотні перетворювачі забезпечують високоточне керування швидкістю та моментом обертання електродвигуна. На відміну від скалярних (V/F) перетворювачів, вони враховують не лише частоту та напругу, але й фазові кути та інші параметри, що дозволяє ефективніше керувати динамічними системами.

Векторні перетворювачі аналізують параметри роботи двигуна, такі як струм, напруга, кут між фазами, щоб обчислити вектор струму та моменту. Це дозволяє точно регулювати швидкість двигуна та підтримувати сталий момент обертання навіть за змінних навантажень.

Векторні перетворювачі можуть бути з сенсорним та безсенсорним векторним керуванням. Сенсорне векторне керування використовує датчики зворотного зв’язку (тахогенератори або енкодери) для точного вимірювання швидкості та положення ротора. Безсенсорне векторне керування застосовує математичні алгоритми для визначення параметрів двигуна без фізичних датчиків.

Особливостями векторних перетворювачів є:

- точний контроль моменту обертання, що дозволяє забезпечувати стабільну роботу при значних змінах навантаження;

- плавний пуск та зупинка, що зменшує механічне зношування та покращує безпеку роботи;
- швидка реакція, що важливо для систем із високими динамічними вимогами;
- висока ефективність, забезпечуючи мінімальне енергоспоживання.

Векторні перетворювачі доцільно використовувати у системах, коли потрібні точний контроль швидкості, стабільний момент обертання та швидка реакція системи. Наприклад, насосні системи підтримують постійний тиск або витрату рідини і їх доцільно використовувати в водопостачанні, каналізації та HVAC [10]; в промисловості для електроприводу конвеєрів, екструдерів, ліфтів та інших механізмів, що потребують стабільності роботи; в вентиляторах та компресорах для ефективного регулювання потоку повітря.

Векторне керування базується на розкладанні струму двигуна на два компоненти, а саме на магнітний потік та момент. Магнітний потік відповідає за створення магнітного поля у статорі, а момент відповідає за обертання ротора. Алгоритм керування постійно обчислює вектор струму для підтримки оптимального моменту обертання та швидкості.

Момент визначають так [15]:

$$M = \frac{2}{3} \cdot \frac{P}{2} \cdot \Phi \cdot I_q$$

де

$M$ – момент обертання;

$P$ – кількість полюсів;

Ф – магнітний потік;

$I_q$ – складова струму моменту.

Переваги векторного керування:

- стабільний контроль моменту навіть за мінімальних швидкостей;

- підтримка різних режимів роботи (постійний момент, змінний момент);
- висока ефективність у системах зі змінними навантаженнями;
- зниження механічного зношування деталей;
- Підтримка різних типів двигунів (асинхронні, синхронні).

Недоліки векторного керування:

- складність;
- необхідність налаштування параметрів для кожного типу двигуна;
- більш дорогі у порівнянні зі скалярними перетворювачами;
- чутливість до умов експлуатації;
- висока температура або забруднення можуть впливати на стабільність роботи.

Приклади моделей.

1) Siemens SINAMICS G120:
- забезпечує точний контроль моменту.
2) ABB ACS880:
- універсальний перетворювач із підтримкою векторного керування.
3) Schneider Electric Altivar 930:
- високопродуктивний пристрій для динамічних систем.

Таким чином, векторні частотні перетворювачі доцільно використовувати для систем, що потребують точного контролю швидкості та моменту обертання. Вони мають широку сферу застосування, забезпечують високу енергоефективність і довговічність обладнання, але вимагають ретельного налаштування та додаткових витрат.

Перетворювачі з прямим керуванням моментом (Direct Torque Control, DTC) представляють собою високотехнологічні пристрої, що забезпечують максимально швидку та точну реакцію на зміни навантаження, не використовуючи складних алгоритмів векторного керування. Вони особливо

ефективні для динамічних систем, де важливі високі показники моменту та швидкості [20 – 22].

На відміну від векторного керування, де здійснюється розрахунок фазових складових струму, у DTC здійснюється прямий контроль моменту та магнітного потоку двигуна. Це досягається завдяки:

- постійному моніторингу напруги і струму двигуна;
- використанню математичних моделей двигуна для розрахунку магнітного потоку та моменту;
- вибору оптимального стану інвертора для підтримки потрібних параметрів.

Алгоритм DTC враховує таке:

- вимірюються струми статора двигуна;
- обчислюється миттєвий момент обертання та магнітний потік;
- контролер порівнює ці значення із заданими та обирає стан інвертора для досягнення оптимальних параметрів.

Особливостями роботи DTC є:

- відсутність датчиків зворотного зв’язку, тобто DTC працює без енкодерів або тахогенераторів, використовуючи виключно дані напруги і струму;
- швидкий відгук – реакція на зміну навантаження у DTC є миттєвою (до 25 мкс);
- максимальна ефективність. Система забезпечує високий коефіцієнт корисної дії за мінімальних втрат енергії;
- точний контроль моменту – DTC дозволяє точно підтримувати момент навіть за дуже низьких швидкостей.

До переваг перетворювачів DTC відносяться:

- швидка реакція на зміни навантаження. DTC має менший час затримки, ніж векторне керування, що забезпечує стабільну роботу навіть у динамічних системах;

- простота налаштування – DTC не потребує складного програмування та налаштування параметрів двигуна;
- висока точність моменту – забезпечує точність у критично важливих застосуваннях;
- енергозбереження;
- широкий діапазон швидкостей (можливість керування моментом навіть при нульових обертах).

До недоліків DTC можна віднести:

- чутливість до умов експлуатації;
- потребує високоточних датчиків напруги та струму;
- вища вартість, вони дорожче навіть систем з векторним керуванням.

Приклади моделей DTC-перетворювачів:

- ABB ACS880, забезпечує пряме керування моментом без датчиків. Використовується в промисловості та транспорті;
- Siemens SINAMICS S120, Підтримує пряме керування моментом для складних систем;
- Danfoss VLT AutomationDrive FC 302, підходить для споживачів з високою динамікою.

Роботу DTC можна формалізувати так:

- момент обертання:

$$M = \frac{2}{3}\frac{P}{2}\Phi \cdot I$$

де

$M$ – момент обертання;

$P$ – кількість полюсів;

Ф – магнітний потік;

$I$ – складова струму моменту.

Магнітний потік:

$$\Phi = \int U\, dt$$

де:

Ф – магнітний потік;

U – напруга статора.

Перетворювачі з прямим керуванням моментом (DTC) може представляти інтерес для систем із високими динамічними вимогами та потребою в точному керуванні моментом. Вони забезпечують максимальну ефективність і простоту у використанні, проте мають вищу вартість, що виправдовується у складних промислових і транспортних системах. У той же час DTC не є оптимальним вибором для будівельних систем через високу вартість і надмірну складність для завдань цієї сфери. Для будівництва більш доцільно використовувати простіші і дешевші перетворювачі, які забезпечують потрібну функціональність.

Критерії вибору частотного перетворювача. На вибір частотного перетворювача впливають декілька чинників, розглянемо деякі з них.

Потужність двигуна. Перетворювач повинен відповідати або перевищувати номінальну потужність двигуна.

Умови експлуатації. Тут враховується температура, вологість та наявність пилу в середовищі.

Функціональні можливості, а саме наявність ПІД-регуляторів, інтерфейсів зв'язку та захисних функцій.

Енергоефективність, тобто здатність перетворювача знижувати енергоспоживання системи.

Вибір відповідного частотного перетворювача має забезпечувати надійну та ефективну роботу будівельних систем, сприяючи зниженню експлуатаційних витрат та підвищенню комфорту в будівлях.

## 2.2 Застосування енергоефективних матеріалів в насосних системах

Енергоефективність насосних систем залежить не лише від технологій керування (наприклад, частотних перетворювачів), але й від матеріалів, які використовуються в їх конструкції. Вони впливають на мінімізацію енергетичних втрат через тертя та гідравлічний опір, підвищення довговічності насосів і зменшення витрат на обслуговування, оптимізацію теплопередачі та запобігання втратам енергії [23 – 25].

Серед сучасних матеріалів для насосів можна виділити композиційні матеріали, нержавіючу сталь, полімерні матеріали, керамічні покриття.

Композиційні матеріали використовуються для виготовлення корпусів насосів і крильчаток і мають такі переваги:

- низька маса, що знижує енергоспоживання;
- висока хімічна стійкість до агресивних рідин;
- зменшення зношування завдяки низькому коефіцієнту тертя.

Нержавіюча сталь використовується для деталей, що контактують із рідиною і має переваги:

- висока міцність і довговічність;
- зменшення енергетичних втрат через гладкість поверхні;
- стійкість до корозії.

Полімерні матеріали (PTFE, PEEK) використовуються для ущільнень, підшипників і крильчаток, мають переваги:

- низький коефіцієнт тертя;
- висока термостійкість і хімічна інертність;
- зниження шуму та вібрацій.

Керамічні покриття застосовуються для захисту поверхонь від абразивного зношування. Їх переваги:

- значне збільшення строку служби;
- зменшення втрат через тертя в гідравлічних каналах.

Для трубопроводів використовують різноманітні енергоефективні матеріали, наприклад, поліетилен високої щільності, карбонові композити, матеріали з низьким коефіцієнтом тертя (PTFE).

Поліетилен високої щільності (HDPE) використовується для трубопроводів. Вони відрізняються низьким гідравлічним опором завдяки гладкій внутрішній поверхні, легкістю монтажу та високою довговічністю, зниженням втрат енергії під час транспортування рідини.

Карбонові композити використовуються для високонапірних трубопроводів. Серед їх відмінностей є висока міцність і стійкість до деформацій, легка вага, що знижує навантаження на насос.

Матеріали з низьким коефіцієнтом тертя (PTFE) використовуються для внутрішніх покриттів труб і зменшує гідравлічний опір, що дозволяє підвищити енергоефективність системи.

Також спеціалісти постійно працюють над розробкою спеціалізованих матеріалів для зменшення втрат енергії. До таких можна віднести антифрикційні покриття, матеріали з підвищеною теплопровідністю, ущільнювальні матеріали.

Для транспортування густих рідин одним із ефективних засобів є нанесення покриття на крильчатки та корпуси насосів, що зменшує тертя. Для охолоджувальних елементів у насосах використовуються матеріали з підвищеною теплопровідністю, які знижують ризик перегрівання й енергетичних втрат.

З метою запобігання витокам і зниження енергоспоживання використовують ущільнювальні матеріали, наприклад, ущільнення з PTFE або еластомерів із низьким тертям.

Гладкі матеріали внутрішніх поверхонь знижують гідравлічний опір, що зменшує енергоспоживання насосів. Стійкі до зношування матеріали мінімізують необхідність у частих ремонтах, що скорочує експлуатаційні

витрати. Використання полімерних і композиційних матеріалів покращує роботу систем.

Оцінку впливу матеріалів можна зробити за такими формулами:

- гідравлічний опір знаходимо як:

$$h_f = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g}$$

де

$h_f$ - втрати на тертя, м;

$f$ – коефіцієнт тертя матеріалу;

$L$ – довжина трубопроводу, м;

$D$ – діаметр труби, м;

$v$ – швидкість рідини, м/с;

$g$ – прискорення вільного падіння, м/с².

Згідно з досвідом використання новітніх матеріалів є конкретні результати. Наприклад, високоефективні насоси із композитними крильчатками, які використовуються в системах водопостачання великих будівель забезпечують зменшення споживання енергії на 10…15 %; поліетиленові труби (HDPE) для систем водопостачання у житлових комплексах дозволило знизити витрати енергії на транспортування води на 20% [24].

Отже, застосування енергоефективних матеріалів у насосних системах дозволяє суттєво зменшити енергоспоживання, підвищити надійність і довговічність обладнання. Це є одним із доцільних шляхів для підвищення енергоефективності і розвитку будівельної галузі та зменшення експлуатаційних витрат. На даний час продовжуються дослідження в напрямку зменшення коефіцієнта тертя поверхонь, розробка заходів з підвищенням опору дії кавітаційних явищ.

## 2.3 Вплив систем рекуперації енергії на продуктивність

Рекуперація енергії в насосних станціях є перспективним напрямком для підвищення енергоефективності та зниження витрат на експлуатацію. Інтеграція турбін, генераторів або насосів, що працюють у режимі PAT – Pump as Turbine, дозволяє значно покращити продуктивність систем. Хоча впровадження таких технологій вимагає початкових інвестицій, вони швидко окупаються завдяки економії енергії та сталому розвитку. Крім того, треба враховувати, що потенційно такі системи можуть працювати стільки, скільки працює насосна система .

Рекуперація енергії базується на процесі повторного використання енергії, яка зазвичай втрачається в системі. У насосних станціях це може бути відновлення кінетичної енергії потоку рідини і перетворення енергії тиску або перепадів висот у корисну роботу.

Використання рекуператорів, таких як турбіни чи генератори, дозволяє зменшити енергетичні втрати. Наприклад, енергія рідини, що тече через скидні клапани, може бути перетворена на електроенергію. Рекуперація підвищує ефективність системи (ККД), оскільки менша кількість енергії втрачається даремно.

Оптимізація роботи системи забезпечується за рахунок зменшення навантаження на основні насоси за рахунок використання відновленої енергії, наприклад, у системах водопостачання або іригації.

Системи рекуперації енергії в насосних станціях можуть використовуватися із застосуванням гідравлічних турбін (PAT). Тут насоси використовуються як турбіни для генерування електроенергії з надлишкового тиску у системі і застосовується у водопостачанні, де є перепади висот або надлишковий тиск у трубопроводах.

Турбоелектричні генератори, де потік рідини обертає турбіну, яка генерує електроенергію і застосовується у великих насосних станціях із високими перепадами тиску.

Системи рекуперації енергії у водоочищенні використовуються для повторного використання енергії, що виділяється під час фільтрації чи скидання рідини.

Енергетична ефективність рекуперації:

$$\eta_{рек} = \frac{E_{рек}}{E_{втр}} 100$$

де

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

$E_{рек}$ – кількість відновленої енергії, Дж;

$E_{втр}$ – втрати енергії без рекуперації, Дж.

Вироблену потужність визначаємо як:

$$P_{рек} = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H, \text{ Вт}$$

де:

$\rho$ – густина рідини, кг/м³,

$g$ – прискорення вільного падіння, м/с²;

$Q$ – витрата рідини, м³/с;

$H$ – напір, м.

Застосування системи РАТ в системах водопостачання, на насосних станціях із перепадом висоти до 100 м може зменшити споживання енергії на 15…20 %. У водоочисних спорудах системи рекуперації енергії дозволяють знизити витрати на очищення води до 10…15 %, а відновлення енергії від скидних клапанів знижує загальні витрати енергії на 10 %.

# 3 ІНТЕГРАЦІЯ РОЗУМНИХ СИСТЕМ У БУДІВЕЛЬНІ НАСОСНІ УСТАНОВКИ

## 3.1 Моделювання режимів роботи електроприводу насосних систем

Моделювання режимів роботи насосних систем дозволяє оцінити ефективність їхньої роботи, оптимізувати енергоспоживання, підібрати параметри для різних умов експлуатації та передбачити поведінку системи в аварійних ситуаціях. Застосування моделювання є доцільним для проєктування та експлуатації насосних станцій у промисловості, будівництві та водопостачанні.

Загальними цілями моделювання є оцінка витрати рідини, напору та потужності за різних режимів роботи, підбір параметрів для зменшення енергоспоживання, аналіз впливу виходу з ладу окремих компонентів системи, підбір насосів і трубопроводів, які забезпечують максимальну ефективність, розрахунок енергоспоживання та витрат на експлуатацію.

Як правило, при моделюванні враховують такі елементи:

- робочі характеристики насосу (напір, витрата, ККД, потужність);
- матеріали труб, їх гідравлічний опір, втрати на тертя, довжина, діаметр трубопроводу;
- частотні перетворювачі для регулювання швидкості, ПІД-регулятори для стабілізації параметрів;
- вплив на стабільність роботи системи та компенсацію пікових навантажень;
- щільність, в'язкість рідини та вплив на втрати енергії.

Як бачимо, моделювання може відбуватися відносно багатьох елементів. Але ми розглянемо моделювання частотних перетворювачів для регулювання швидкості електропривода насосів, як одного з найефективних шляхів енергозбереження. Завдяки автоматизованим системам керування частково

регульовані асинхронни електроприводи вирішують проблеми енергозбереження та технічні проблеми насосних агрегатів.

Як вже зазначалося у першому розділі, найбільше розповсюдження в будівельній галузі отримали відцентрові насоси (рис. 3.1, 3.2), які приводять в рух за допомогою синхронних або асинхронних двигунів.

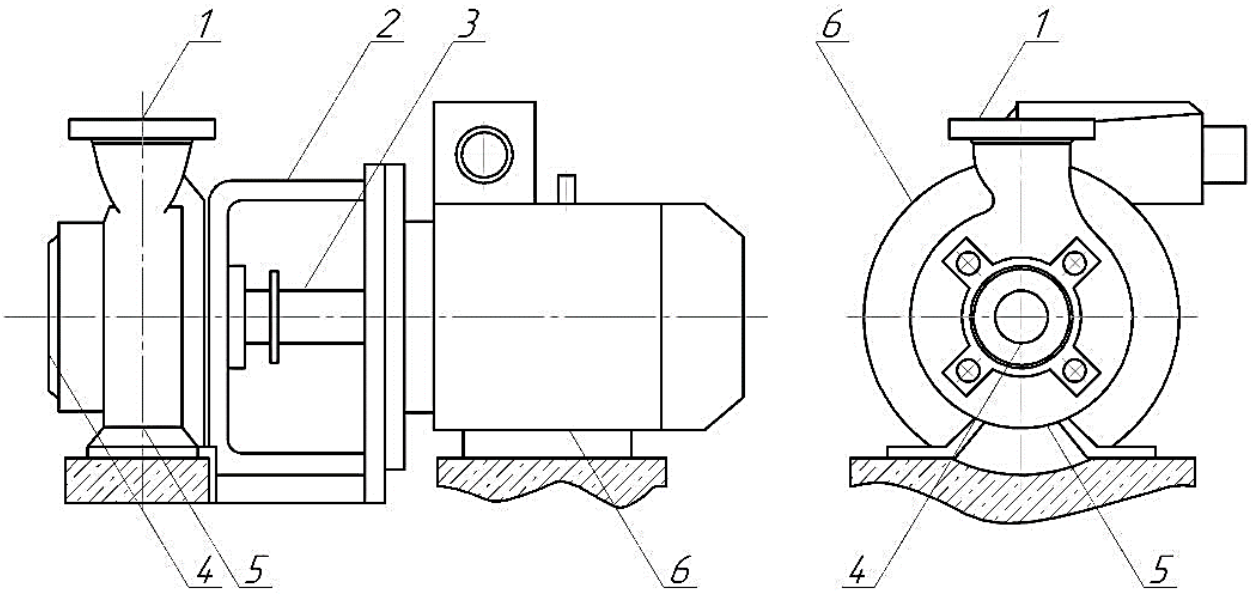



Рисунок 3.1 – Загальний вигляд відцентрового насосу з асинхронним двигуном:

1 – напірний патрубок; 2 – захисний кожух; 3 – вал двигуна;

4 – всмоктувальний патрубок; 5 – корпус насосу; 6 – асинхронний двигун

Нагадаємо, що завдяки постійному руху рідини, відцентрові насоси не створюють пульсацію у трубопроводі. Рух робочого колеса та рідини у відцентровому насосі зображено на рисунку 3.2.

У будівельній галузі в залежності від вимог і умов можуть використовуватися різноманітні електричні двигуни. Розглянемо коротко двигуни електроприводу в будівельній галузі.

Асинхронні двигуни (АД). Асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором мають переваги: простота конструкції та надійність, високий ККД для

постійної роботи; низька вартість обслуговування. Недоліками є обмежений діапазон регулювання швидкості без використання частотного перетворювача (VFD). Найчастіше використовуються в системах водопостачання, опалення, кондиціонування та іригації.

Асинхронні двигуни з фазним ротором мають такі переваги: можливість регулювання пускового моменту, кращий контроль швидкості без використання складного обладнання. Недоліки: складніші у конструкції та дорожчі, ніж двигуни з короткозамкненим ротором. Застосовують у якості великих насосів для промислових будівель або систем з високими пусковими навантаженнями [6].

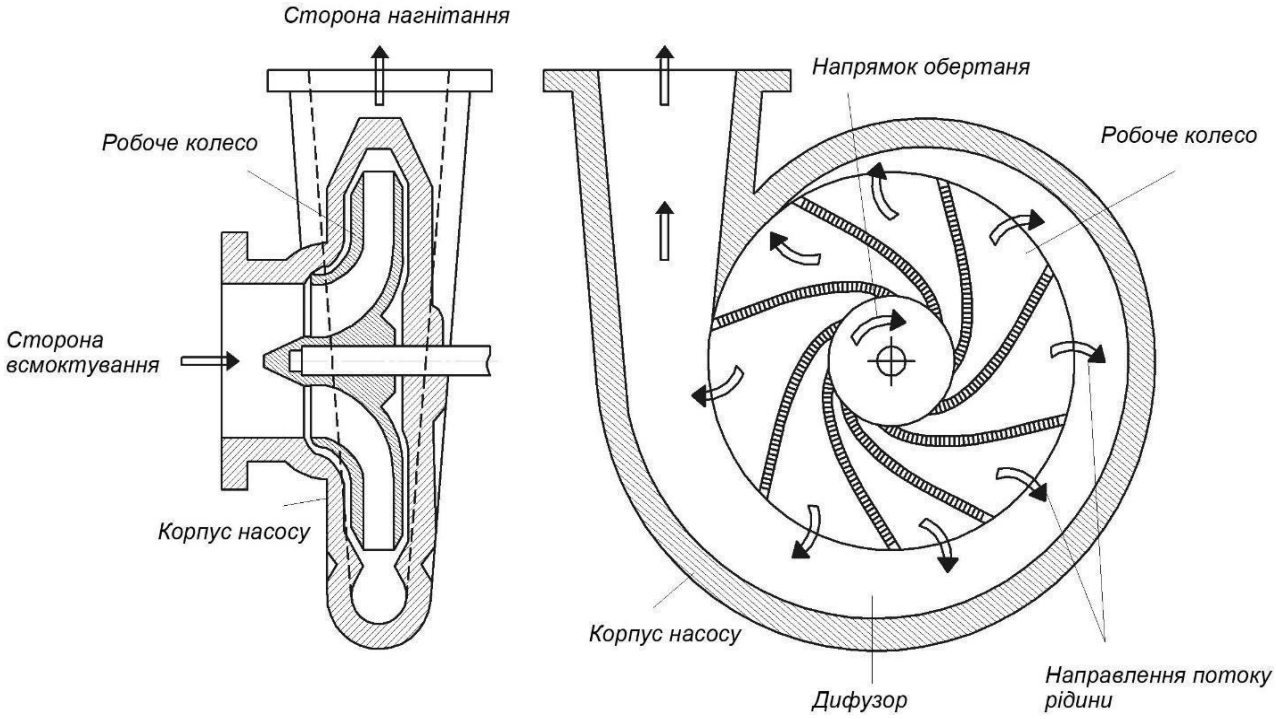



Рисунок 3.2 – Рух робочого колеса та рідини у відцентровому насосі

Синхронні електродвигуни мають такі переваги:

- висока енергоефективність, особливо за постійних навантажень;
- можливість точно підтримувати швидкість обертання незалежно від навантаження.

Недоліками таких двигунів є більш складна конструкція і вищі витрати на обслуговування. Зазвичай можуть використовуватися на великих насосних станціях для житлових та промислових будівель; для обладнання, що працює на високих швидкостях або під постійними навантаженнями.

Двигуни постійного струму (DC) мають такі переваги: відмінне регулювання швидкості, високий пусковий момент. Недоліками DC є: складніша конструкція в порівнянні з AC-двигунами, вищі витрати на обслуговування через щітки та колектор. Можуть бути застосовані для спеціалізованих насосних систем, де потрібен великий діапазон регулювання швидкості.

Безщіткові двигуни постійного струму (BLDC) мають такі переваги:

- високий ККД і тривалий термін служби;
- низький рівень шуму;
- точне керування швидкістю.

До недоліків відноситься вища вартість порівняно з традиційними AC-двигунами.

Застосування:

Насоси для точних систем, таких як гідравлічні контури або системи з інтелектуальним керуванням.

Енергозберігаючі двигуни (IE3, IE4) мають певні особливості, а саме, вони розроблені для відповідності сучасним стандартам енергоефективності (наприклад, IE3, IE4) і забезпечують зменшене споживання енергії. Їх можуть застосувати для приводів насосів у системах опалення, вентиляції, кондиціонування (HVAC), де важлива енергоефективність.

Спеціальні двигуни, які здатні працювати в умовах підвищеної вологи або агресивного середовища. Вони мають корпуси з нержавіючої сталі або захищені спеціальними покриттями та високий ступінь захисту (IP55 і вище). Їх можуть

застосовувати для насосних станцій для водовідведення, каналізації або систем у зонах із підвищеною вологістю.

Отже, асинхронні електродвигуни з короткозамкненим ротором є найпоширенішими для насосних систем у будівництві завдяки їх простоті, надійності та доступності. Однак для спеціалізованих потреб, де потрібен точний контроль швидкості чи висока енергоефективність, можуть використовуватися синхронні двигуни, BLDC чи енергозберігаючі IE3/IE4. Вибір залежить від вимог до системи, умов експлуатації та економічної доцільності. Оскільки асинхронні двигуни найбільш розповсюджені, то у подальшому розгляді візьмемо саме його за основу [27, 28].

Функціональна схема асинхронного частково-регульованого електричного приводу замкнута, і це єдине, що можна зробити, щоб регулювати необхідні статичні та динамічні властивості [21]. Ця замкнута система регулювання представлена на рисунку 3.3.

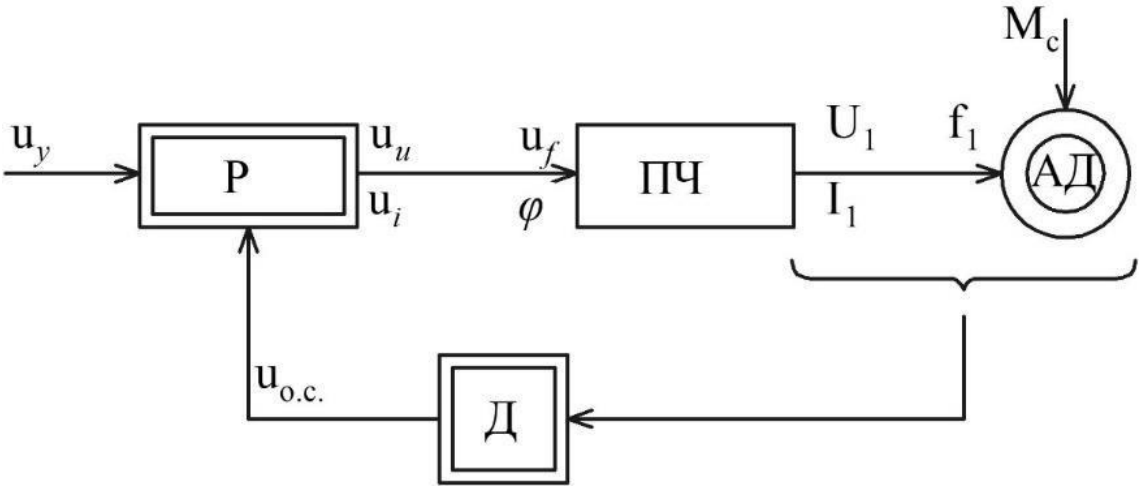



Рисунок 3.3 – Функціональна схема замкнутої системи ПЧ-АД-ВН [21]

Введення від’ємного зворотного зв'язку в систему дозволяє збільшити діапазон регулювання по швидкості. Структурна схема системи ПЧ- АД з негативним зворотним зв'язком за швидкістю матиме вигляд (рис.3.4) [21]:

Таким чином, було встановлено, що в асинхронному електричному пристрої можна регулювати зміни напруги, подібні до зміни напруги в двигуні

постійного струму з незалежним збудженням, шляхом зміни частоти напруги та струму обертання статора. Для реалізації цих можливостей потрібно використовувати керований перетворювач частоти для харчування обмотки статора двигуна. Регулювання частоти вимагає значних ступенів перетворення енергії, що робить його технічно більш складним, ніж регулювання випрямленої напруги. В цій схемі є два канали управління: один для контролю частоти, а інший для контролю напруги, яка впливає на збудження.

Розробка математичної моделі PCH-AD-VN. Треба розробити математичну модель для системи PCH-AD-BH. Рівняння руху можна записати в наступному вигляді, згідно з передавальною функцією W1 структурної схеми [28]:

$$\frac{d\Delta\omega}{dt} = \frac{1}{\beta T_M}(\Delta M - \Delta M_c)$$

де $\Delta\omega$ – приріст швидкості;

$\Delta M$ – приріст моменту;

$\Delta M_c$ – приріст стАтичного моменту навантаження.

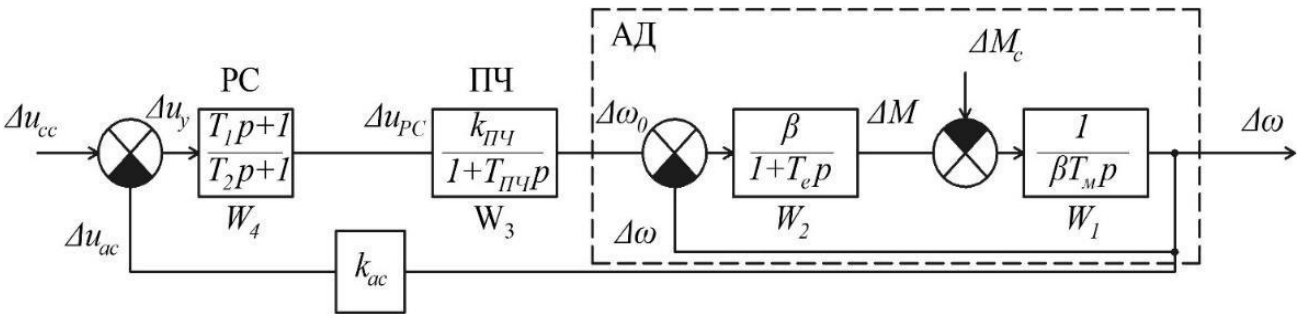



Рисунок 3.4 – Структурна схема системи ПЧ-АД з від'ємним зворотним зв'язком за швидкістю:

$\beta$ – модуль жорсткості механічної характеристики;

$T_e$ – еквівалентна електромагнітна постійна часу ланцюгів статора і ротора АД;

$k_{ПЧ}$ – передавальний коефіцієнт функції ПЧ;

$T_{ПЧ}$ – постійна часу кола керування ПЧ;

$T_м$ – електромеханічна постійна часу

Запишемо вираз у вигляді диференціального рівняння:

$$T_e \frac{d\Delta M}{dt} + \Delta M = \beta(\Delta\omega_0 - \Delta\omega)$$

де

$\Delta\omega_0$ – приріст кутової швидкості електромагнітного поля АД.

Виходячи з передавальної функції W3, запишемо рівняння перетворювача частоти як:

$$T_{ПЧ} \frac{d\Delta\omega_0}{dt} + \Delta\omega_0 = k_{ПЧ} \Delta U_{РС}$$

Передавальну функцію W4 представимо рівнянням:

$$T_{РС} \frac{d\Delta U_{РС}}{dt} = k_{РС} T_{РС} \frac{d\Delta U_y}{dt} + \Delta U_y$$

Приріст $\Delta U_y$ запишемо в наступному вигляді:

$$\Delta U_y = \Delta U_{з.с} - k_{о.с} \Delta\omega$$

$k_{о.с}$ - коефіцієнт зворотного зв’язку по швидкості;

де $\Delta U_{з.с}$ - приріст задаючого сигналу.

Отже, математичний опис частотно – регульованого електроприводу відцентрового насоса можна представити наступною системою рівнянь [28]:

$$\begin{cases} \frac{d\Delta\omega}{dt} = \frac{1}{\beta T_M}(\Delta M - \Delta M_C); \\ T_e \frac{d\Delta M}{dt} + \Delta M = \beta(\Delta\omega_0 - \Delta\omega); \\ T_{ПЧ} \frac{d\Delta\omega_0}{dt} + \Delta\omega_0 = k_{ПЧ}\Delta U_{РС}; \\ T_{РС} \frac{d\Delta U_{РС}}{dt} = \Delta U_y - k_{РС}T_{РС}k_{ОС}\frac{d\Delta\omega}{dt} - k_{РС}T_{РС}k_{ОС}\Delta\omega; \\ \Delta U_y = \Delta U_{з.с} - k_{о.с}\Delta\omega. \end{cases}$$

Як зазначалося вище, ПЧ необхідно обирати із зворотним зв’язком за швидкістю та ПІД- регулюванням для автоматичного регулювання. Тобто ПІД-регулятор є одним із основних компонентів замкнутої системи, який може регулювати різні параметри, такі як тиск, витрати, рівень, швидкість, температура та інші.

Регулятор PID має два входи в перетворювач частоти [29]. Уставка або сигнал завдання необхідної величини параметра надходить на один вхід. На другий відображається сигнал зв’язку датчика про реальне значення параметра. Сигнал, який генерується на виході ПІД-регулятора, залежить від величини і знака неузгодженості між цими сигналами. Це робиться з метою максимально зрівняти уставку і реальний рівень сигналу. Величина незгоди (пропорційна складова), тривалість незгоди (інтегральна складова) і швидкість зміни незгоди визначають вихідний сигнал ПІД-регулятора (рис. 3.5).

Пропорційна складова намагається усунути непряму помилку в значенні регульованого параметра, який зберігається зараз. Значення цієї складової прямо відрізняється від вимірюваної величини від уставки. Подібний регулятор називається адміністративним або «П»-регулятором. Він генерує помилку управління e(t), змінену на коефіцієнт Kp [29]:

$$u(t) = K_p e(t)$$

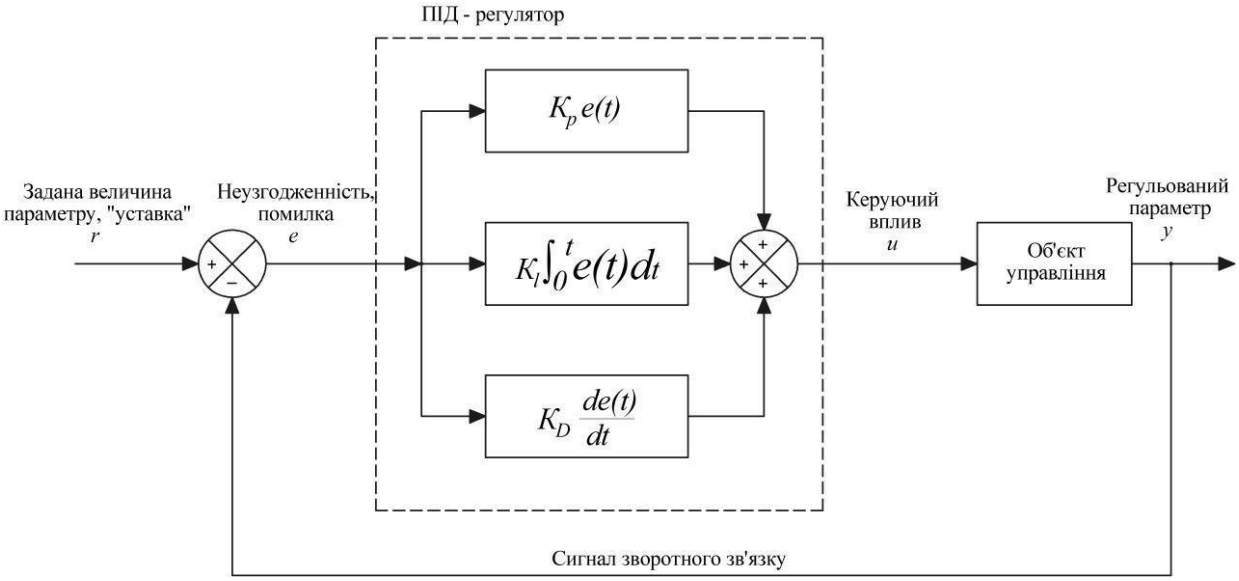



Рисунок 3.5 – Структурна схема ПІД – регулятора [22]

При використанні лише прямого регулятора статична помилка завжди виникає. Значення регульованої величини ніколи не буде встановлено на певне значення. У міру збільшення коефіцієнта операційності швидкість і точність відпрацювання відхилення зростають, але стійкість системи знижується, що може призвести до коливального процесу. Для усунення статичної плутанини в структурі регулятора буде використано інтегральну складову з коефіцієнтом Kl [22]:

$$u(t) = K_p e(t) + K_I \int_0^t e(t)dt$$

Такий регулятор називають інтегральним або інформаційним регулятором. Вихідний сигнал інтегратора забезпечує нульову помилку в сталому стані, але уповільнює перехід. Регулятор PD має вихідний сигнал, який відповідає як вхідному, так і похідному сигналу. Похідна показує тенденцію зміни регульованої величини. Регулятор може передбачити, у який бік і на скільки відхилилася

регульована величина під дією цього збурення, використовуючи величину та знак впливу від похідної. Завдяки цьому передбаченню регулятор може впливати на можливе відхилення від норми. Таким чином, регулювання виконується швидше. Для прискорення перехідних процесів у структурі регулятора буде введено диференціальну складову з коефіцієнтом KD:

$$K_p e(t) + K_I \int_0^t e(t)dt + K_D \frac{de(t)}{dt}$$

Зазвичай замкнута система будується для здійснення регулювання за допомогою перетворювача частоти. Розглянемо, як створити систему, яка може підтримувати необхідний рівень тиску палива, незалежно від вартості (рис. 3.6). Сигнал реального тиску та сигнал завдання тиску, отримані з датчика зовнішнього зв’язку, передаються на її вхід. ПІД-регулятор перетворює сигнал завдання частки перетворювача на відхилення між реальними та заданими значеннями [28]. Під впливом сигналу завдання перетворювач змінює швидкість обертання електродвигуна насоса. Він намагається досягти нульового відхилення між встановленим і фактичним значенням тиску.

З цієї причини, якщо тиск в системі знизиться, наприклад через збільшення витрат палива, ПІД-регулятор збільшить вихідну частку ПЧ. Це призведе до збільшення швидкості обертання насоса і підвищення тиску в системі. ПІД-регулятор зменшить вихідну часту, якщо тиск підвищиться через зниження витрати палива. У результаті тиск зменшиться. Таким чином, тиск у системі залишається постійним і не залежить від витрат [29].

встановлення перетворювачів частоти з ПІД-регулятором у системах автоматичного регулювання У перетворювачі частоти завдання частоти визначає необхідний рівень тиску.

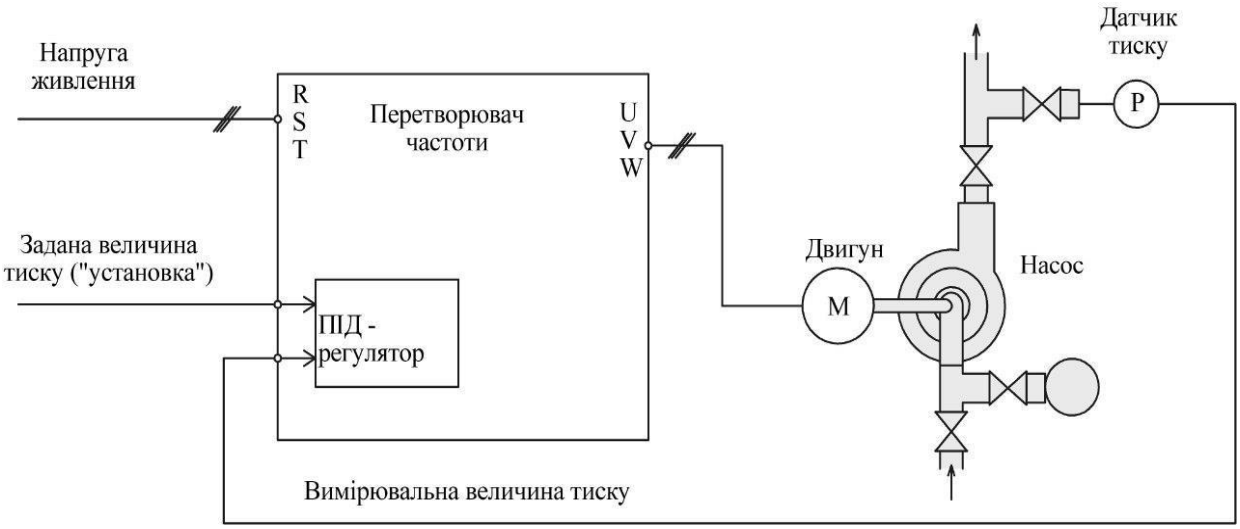



Рисунок 3.7 – Система автоматичної підтримки заданого тиску [28]

Згідно з технологією випробувань, обраний перетворювач частоти та обраний датчик тиску можуть визначити необхідну частоту так:

$$F_з = \frac{P \cdot F_{max}}{P_{max}}$$

де

$F_з$ – необхідна частота, Гц;

$P$ – необхідний тиск у системі, бар;

$F_{max}$ – максимальна вихідна частота ПЧ, Гц;

$P_{max}$ – максимальний тиск датчику, бар.

Зауважимо, що насос із системою «Перетворювач частоти – асинхронний двигун» із зв’язком за швидкістю є єдиним механізмом, який має механічну стійкість і працює з маховою масою, створеною ротором електричного двигуна та робочим колесом насосів. Насос у ньому змінюється [29]:

$$T_н \frac{dz}{dt} + z = b \cdot \omega + h_0 \cdot \omega^2$$

де

$h_0$ – наведений натиск холостого ходу насоса;

b – коефіцієнт, що характеризує лінійну залежність між напором і подачею насоса.

Математичну модель розглядуваної системи можна представити у вигляді:

$$\begin{cases} \frac{d\Delta\omega}{dt} = \frac{1}{\beta T_M}(\Delta M - \Delta M_C); \\ T_e \frac{d\Delta M}{dt} + \Delta M = \beta(\Delta\omega_0 - \Delta\omega); \\ T_{ПЧ} \frac{d\Delta\omega_0}{dt} + \Delta\omega_0 = k_{ПЧ} \Delta U_{РС}; \\ T_{РС} \frac{d\Delta U_{РС}}{dt} = \Delta U_y - k_{РС} T_{РС} k_{ОС} \frac{d\Delta\omega}{dt} - k_{РС} T_{РС} k_{ОС} \Delta\omega; \\ T_н \frac{dz}{dt} + z = b \cdot \omega + h_0 \cdot \omega^2. \end{cases}$$

де

$T_н$ – постійна часу перехідних процесів в робочому колесі насоса (аналогічна електромагнітної постійної часу електродвигуна).

Для зручності дослідження перехідних процесів динаміки системи ПЧ - АД зі зворотним зв'язком за швидкістю і відцентровий насос, після нескладних перетворень представимо в наступному вигляді:

$$\begin{cases} \dfrac{dx_1}{dt} = \dfrac{1}{\beta T_M}(x_2 - A); \\ \dfrac{dx_2}{dt} = \dfrac{\beta}{T_e}x_3 - \dfrac{\beta}{T_e}x_1 - \dfrac{1}{T_e}x_2; \\ \dfrac{dx_3}{dt} = \dfrac{k_{ПЧ}}{T_{ПЧ}}x_4 - \dfrac{1}{T_{ПЧ}}x_3; \\ \dfrac{dx_4}{dt} = u - \dfrac{k_{PC}T_{PC}k_{OC}}{T_{PC}}\dfrac{dx_1}{dt} - \dfrac{k_{PC}T_{PC}k_{OC}}{T_{PC}}x_1; \\ \dfrac{dx_5}{dt} = \left(\dfrac{b}{T_н} + \dfrac{2h_0x_0}{T_н}\right)x_1 - \dfrac{1}{T_н}x_5. \end{cases}$$

де $x_1 = \Delta\omega$; $x_2 = \Delta M$; $x_3 = \Delta\omega_0$; $x_4 = \Delta U_{РС}$;

$x_0$ – коефіцієнт лінеаризації змінної $\omega^2$.

Задаючи вхідні параметри двигуна і системи отримуємо вихідні дані системи.

## 3.2 Використання датчиків і моніторингових систем

Із розвитком технологій з’являються різноманітні діагностичні комплекси, включаючи датчики та моніторингові системи. Ці інноваційні прилади відіграють важливу роль у забезпеченні ефективної роботи насосних систем. Вони можуть виконувати роль, як діагностичного комплексу, збираючи дані про поточний стан обладнання, умови експлуатації та ключові параметри роботи, так і допомагають реагувати на потреби у споживанні робочої рідини, газу, повітря тощо. Це дозволяє оптимізувати енерговитрати, забезпечувати безперебійну роботу, зменшувати витрати на обслуговування та підвищувати надійність.

У насосних системах доцільно використовувати такі типи датчиків:

1) датчики тиску, які виконують моніторинг тиску в системі для уникнення аварійних ситуацій. Такі датчики виконують регулювання роботи насоса залежно від тиску в трубопроводах.

Типові показники:

- діапазон: від 0 до 100 бар;
- точність: ±0,1 %;

2) датчики витрати вимірюють об’єм рідини, що проходить через систему. Застосування для контроля продуктивності насосів.

Мають такі типи:

- ультразвукові;
- турбінні;
- магнітно-індуктивні;

3) датчики температури відстежують температури рідини або деталей насоса. Застосовують для уникнення перегріву насоса та рідини.

Мають типові показники:

- діапазон: -40°C…+ 150 °C;
- точність: ±0,5 °C;

4) вібраційні датчики проводять моніторинг вібрацій насосного обладнання. Застосовують для виявлення механічних несправностей, таких як дисбаланс ротора або зношування підшипників.

Мають типи:

- п'єзоелектричні;
- акселерометри;

5) датчики рівня проводять контроль рівня рідини в резервуарах чи баку. Вони запобігають сухому ходу насоса або переливу.

Мають типи:

- ємнісні;
- ультразвукові;
- поплавкові;

6) датчики енергоспоживання проводять моніторинг потужності та енергії, споживаної насосною системою. За їх допомогою можна робити оцінку енергоефективності системи.

Моніторингові системи інтегрують інформацію з датчиків і дозволяють візуалізувати, аналізувати та керувати роботою насосів у реальному часі.

Іншим напрямком є розробка систем, таких як:

1) SCADA-системи здійснюють Централізований контроль і управління насосною системою.

Функції системи:

- збір даних із датчиків;
- відображення в реальному часі;
- попередження про відхилення від нормальних умов.

Дана система має здатність до високої інтеграції з іншими системами автоматизації.

2) IoT-платформи – це система Інтернету речей (IoT) для збирання та аналізу даних.

Її функції:

- віддалений доступ до параметрів системи;
- використання штучного інтелекту для прогнозування збоїв.

Така система має економічність і гнучкість і підходить для модернізації існуючих систем.

3) Системи діагностики аналізують стан обладнання для прогнозування поломок.

Їх основні функції:

- аналіз вібрацій;
- температури;
- тиску.

Завдяки даним із датчиків частотні перетворювачі можуть регулювати швидкість двигуна, знижуючи споживання енергії. Своєчасне виявлення

несправностей запобігає перевантаженням і простою. Моніторинг дозволяє здійснювати обслуговування за потребою, а не за графіком. Контроль витрат і рівня рідини запобігає втратам через протікання або неправильну роботу системи.

Аналіз ефективності моніторингу. Енергоефективність насоса розглядалась у другому розділі. Втрати енергії через вібрації:

$$P_{\text{втрат}} = 12 \cdot m \cdot a^2 \cdot t, \text{ Дж}$$

де:

$m$ – маса ротора, кг;

$a$ – амплітуда вібрації, м/с²;

$t$ – час, с.

Датчики тиску дозволяють автоматично змінювати швидкість роботи насосів для підтримки стабільного тиску. Датчики рівня запобігають переливу резервуарів і забезпечують своєчасне увімкнення насосів. Датчики витрати дозволяють точно дозувати воду залежно від потреб.

Використання датчиків і моніторингових систем у насосних системах дозволяє суттєво підвищити ефективність роботи, знизити витрати на обслуговування та уникнути аварійних ситуацій.

Також у роботі вже торкалися датчика тиску ПІД, який призначений для контролю перетворювача частоти. При виборі датчика тиску для перетворювача частоти, необхідно врахувати діапазон тиску, точність, температуру, вихідний сигнал і сертифікати. Вимірювання діапазону тиску та прогнозовані вимірювання відносного або абсолютного тиску є основним критерієм пошуку відповідних методів вимірювання. Особливі функції необхідно враховувати залежно від застосування. Виготовлення та вимірювання також потребують окремих діапазонів вимірювань, які стандартні датчики з діапазонами тиску ISO

не можуть забезпечити. В цьому випадку необхідні датчики, щоб визначити потрібний рівень тиску.

Крім того, важливим є питання про те, яким чином має перетворюватися виміряний тиск. Аналоговий або цифровий інтерфейс, Modbus, I2C При передачі аналітичного сигналу тиск перетворюється на сигнал, який все ще потребує вимірювання.

В деяких випадках важко визначити температурний фактор. Розробники часто не знають, в яких діапазонах температур працює датчик тиску. Наприклад, багато датчиків тиску розроблені для роботи з температурами від -30 до 100 ℃.

## 3.3 Сумісність насосних систем із розумними мережами

Інтеграція насосних систем у розумні мережі дозволяє значно підвищити їхню енергоефективність, зменшити експлуатаційні витрати та сприяти стабільності енергосистеми. Розумні мережі надають можливість для насосів адаптивно працювати залежно від зміни попиту, тарифів на електроенергію та умов експлуатації.

Розумні мережі (Smart Grids) – це інтегровані енергетичні системи, що використовують цифрові технології для управління виробництвом, розподілом і споживанням електроенергії. Основні особливості розумних мереж:

- двосторонній зв'язок між постачальниками та споживачами;
- інтелектуальне керування навантаженням;
- інтеграція відновлюваних джерел енергії (ВДЕ).

Особливості сумісності насосних систем із Smart Grids можуть включати декілька позицій [29, 30]:

1) інтелектуальне керування навантаженням. Це означає, що насосні системи можуть регулювати свою продуктивність відповідно до енергетичних

умов. Використання частотних перетворювачів (VFD) дозволяє змінювати швидкість роботи насосів залежно від потреб у реальному часі.

2) Використання гнучкого графіка роботи. Розумні мережі забезпечують доступ до інформації про змінні тарифи на електроенергію. Насосні системи можуть бути запрограмовані на інтенсивну роботу в години, коли тарифи на електроенергію нижчі.

3) Рекуперація енергії. Енергія, що генерується у процесі роботи насосів (наприклад, через перепади тиску), може повертатися до мережі (було вже розглянуто вище).

4) Інтеграція з відновлюваними джерелами енергії (ВДЕ). Насосні системи можуть використовувати енергію, генеровану сонячними панелями або вітровими турбінами, що зменшує залежність від основної енергомережі.

Переваги інтеграції насосних систем із розумними мережами дозволяє підвищити енергоефективність за рахунок адаптивної роботи. Використання даних про попит дозволяє уникати перевантаження системи. Зниження витрат забезпечується за рахунок оптимізації роботи відповідно до змінних тарифів на електроенергію. Також може бути зменшення витрат на обслуговування завдяки прогнозуванню несправностей. Можливе розподілення навантаження у мережі за рахунок гнучкої роботи насосів та уникнення або обмеження пікових навантажень. Моніторинг у реальному часі дозволяє оперативно реагувати на зміни умов роботи.

Інтеграція розумних систем в насосні системи водопостачання можлива шляхом, наприклад, за рахунок використання інтелектуальних датчиків рівня та тиску для регулювання продуктивності насосів залежно від попиту. Підключення до розумних мереж забезпечує зниження енергоспоживання у години пікових тарифів.

Можливе регулювання роботи насосів системи водовідведення залежно від навантаження на мережу. Інтеграція з резервуарами для накопичення рідини у години пікового енергоспоживання.

В іригаційних системах можливе використання енергії, згенерованої вітровими турбінами або сонячними батареями для роботи насосів. Програмування насосів для роботи у періоди з низьким енергетичним попитом.

Вимоги до сумісності насосних систем із Smart Grids. Необхідно забезпечити підтримку зв’язку з розумними мережами через протоколи (Modbus, Ethernet) та із системами прогнозування навантаження. Системи моніторингу вже були розглянуті у попередньому підрозділі. Також доцільним є забезпечувати інтеграцію з накопичувачами енергії і задіяння їх в періоди пікових навантажень.

Але слід враховувати і можливі обмеження, а саме:

- високі початкові витрати на інтеграцію насосів із розумними мережами;
- обслуговування інтелектуальних систем потребує спеціальних знань;
- старі насосні системи можуть потребувати модернізації.

Таким чином, сумісність насосних систем із розумними мережами дозволяє підвищити енергоефективність, зменшити експлуатаційні витрати та зробити роботу енергосистем більш стабільною. Інтеграція сучасних технологій, таких як частотні перетворювачі, інноваційні матеріали, моніторингові та діагностичні системи, накопичувачі енергії, дозволяє підвищити енергоефективність будівельної галузі в цілому.

# ВИСНОВКИ

В ході проведених досліджень можна зробити такі висновки.

У роботі проведено аналіз можливих шляхів підвищення енергоефективності насосних установок у будівельній галузі. Інтеграція сучасних технологій дозволяє суттєво зменшити експлуатаційні витрати та вплив на довкілля.

Застосування частотних перетворювачів визначено як ключовий напрямок енергозбереження в насосних системах. Регулювання швидкості обертання насосів залежно від реального попиту може забезпечити економію енергії до 50 % у системах із змінною витратою.

У роботі було розглянуто використання сучасних матеріалів, які підвищують довговічність та надійність насосів, знижують енергоспоживання. Ці матеріали також сприяють зменшенню витрат на технічне обслуговування і забезпечують надійність роботи системи.

Впровадження розумних систем моніторингу і діагностики дозволяє в режимі реального часу відслідковувати роботу насосів і виявляти несправності. Такий підхід підтримує концепцію розумних мереж і підвищує стабільність роботи системи.

Підвищення ефективності насосних установок сприяє зменшенню витрат на електроенергію і викидів $CO_2$, що відповідає глобальним цілям сталого розвитку. Проте, незважаючи на значні переваги сучасних технологій, існують бар’єри у вигляді високих початкових витрат і потреби у кваліфікованих кадрах.

# СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ


1. Директива (ЄС) 2024/1275 Європейського парламенту та Ради від 12 березня 2024 року про енергетичну ефективність будівель. EUR-Lex. URL: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32024L1275 (дата звернення: 24.11.2024).
2. Про енергетичну ефективність: Закон України від 21 жовтня 2021 року № 1818-IX. Верховна Рада України. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1818-20 (дата звернення: 24.11.2024).
3. Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG). Bundesministerium der Justiz. URL: https://www.gesetze-im-internet.de/eeg_2014/EEG_2023.pdf (дата звернення: 24.11.2024).
4. Види насосів, їх пристрій, область застосування та класифікація Відомості про доступ: [Електронний ресурс] URL: https://tehnika.expert/dlya-sada/nasos/vidy-i-ih-klassifikaciya.html
5. Кондусь В. Ю., Котенко О. І. Лопатеві насоси: навчальний посібник. Суми Видавництво: Сумський державний університет. 2021, 112 с. URL: https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream/123456789/83650/3/Kondus_lopatevi_nasosy.pdf
6. Насосне обладнання [Електронний ресурс]. – Режим доступу:\WWW/ URL: http://www.agrovodcom.ru/info_regular_pumps.php – 08.04.2013
7. Sultan I. A. Positive Displacement Machines: Modern Design Innovations and Tools. Amsterdam: Elsevier. 2019, 468 с. URL: https://books.google.com/books/about/Positive_Displacement_Machines.html?id=VNCmDwAAQBAJ
8. Positive Displacement Pumps: A Guide to Performance Evaluation: American Institute of Chemical Engineers. 2007 URL: https://www.amazon.com/Positive-Displacement-Pumps-Performance-Evaluation/dp/0470180978

9. Качан, Ю.Г. Основи енергозбереження / Для студ. ЗДІА спец. 7.000008 "ЕМ": Конспект лекцій / ЗДІА. - Запоріжжя: ЗДІА, 2005. - 183 с.: іл.
10. Волинець В. А., Калінік А. В., Сторожук Р. В. Особливості застосування теплових насосів в системах теплопостачання індивідуальних житлових будівель. Наукові праці Вінницького національного технічного університету Рік: 2021 Випуск: 1 Сторінки: 106–112 URL: https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/35622/106749.pdf?sequence=2
11. Дідур В. А., Журавель Д. П., Палішкін М. А., Міщенко А. В., Борхаленко Ю. О. Гідравліка: підручник. Київ: Ліра-К, 2015. 546 с. URL: https://www.academia.edu/118029939/Гідравліка_підручник
12. Ніколенко І. В., Толстой М. Ю. Шляхи підвищення енергетичної ефективності способів регулювання насосів у системах водопостачання. Вісник Іркутського державного технічного університету. 2015. № 10 (105). С. 192 – 198. URL: https://journals.istu.edu/vestnik_irgtu/journals/2015/10/articles/24
13. Пісемський О. В., Рибачук О. І. Підвищення енергоефективності насосних установок шляхом застосування регульованого електропривода. Вісник ЖДТУ. Серія "Технічні науки". 2012. № 1 (59). С. 83–87. URL: https://eztuir.ztu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/3041/16.pdf?sequence=1
14. Системи керування електроприводами: навч. посіб. / уклад.: В. П. Кравець, О. В. Кравець, О. В. Кравець. – Краматорськ: ДДМА, 2018. – 225 с. URL: https://files.znu.edu.ua/files/Bibliobooks/Inshi73/0054403.pdf
15. Автоматизований електропривод машин і установок: навч. посіб. / уклад.: В. П. Кравець, О. В. Кравець, О. В. Кравець. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 150 с. URL: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/48716/1/Avtomatyzovanyi.pdf

16. Способи підвищення енергоефективності насосних установок [Електронний ресурс]. URL: https://nppsst.ru/article/sposoby-povysheniya-energoeffektivnosti-nasosnyh-ustanovok
17. Соколовський О. Ф. Напрямки енергозбереження в насосних установках. Вісник ЖДТУ. Серія "Технічні науки". 2008. № 1 (3). С. 102–108. URL: https://vtn.ztu.edu.ua/article/view/83412
18. Котиш А. І., Сіріков О. І., Кубкін М. В., Солдатенко В. П. Розрахунок ефективності впровадження регульованого електроприводу в насосних установках. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. 2012. Вип. 25, ч. 2. С. 91–95. URL: https://dspace.kntu.kr.ua/bitstream/123456789/1497/1/18.pdf
19. Керовані випрямлячі: Навчальний посібник/М.М. Казачковський. – Дніпропетровськ: НГА Украини, 1999. – 229 с.
20. Nikolić A. Application of Frequency Converters on Pumps in Water Treatment Plants and Water Utilities. Journal of Water Supply: Research and Technology – AQUA. 2017. Т. 66, № 7. С. 456–465. URL: https://www.researchgate.net/publication/318542975_Application_of_Frequency_Converters_on_Pumps_in_Water_Treatment_Plants_and_Water_Utilities
21. Pyrhönen J., Viholainen J., Niemelä M. Назва статті: Monitoring of Centrifugal Pump Operation by a Frequency Converter Назва журналу: LUT Scientific and Expertise Publications Рік: 2008 Сторінки: 1–8 URL: https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/69656/isbn9789522650764.pdf?sequence=1
22. Viholainen J., Niemelä M., Pyrhönen J. Energy-Efficient Control Strategies for Variable Speed Driven Parallel Pumping Systems. Energy Efficiency. 2013. Т. 6, № 3. С. 525–537. URL: https://link.springer.com/article/10.1007/s12053-013-9234-6

23. Sulzer Pumps. Centrifugal Pump Handbook. Oxford: Elsevier, 2010. 305 с. URL: https://edupump.ir/Uploads/cata/Centrifugal%20Pump%20Handbook%20third%20edition.pdf
24. Gülich J. F. Centrifugal Pumps. Berlin: Springer, 2014. 1116 с. URL: https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-14788-4
25. Бонковський А. Ю. Прогресивні технології виготовлення деталей насосного обладнання. Вісник Поліського національного університету. 2021. № 208. С. 45–52. URL: https://ir.polissiauniver.edu.ua/bitstream/123456789/12513/1/Bonkovsky_AYu_KR_208_2021.pdf
26. Як регулюється подача і натиск центробіжного насоса [Електронний ресурс]. URL: https://termocom.com.ua/ua/jak-reguljuietsja-podacha-i-natisk-centrobizhnogo-nasosa/
27. Качан, Ю. Г. Управління проектами енерговикористання [Текст] : навч. посібник для внз : [рек. М-вом освіти і науки України] / Ю. Г. Качан, К. О. БрАтковська ; ЗДІА. - Запоріжжя : ЗДІА, 2014. - 140 с.
28. Сотник В. В. Моделювання робочого процесу відцентрових насосів. Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси і обладнання. 2014. № 18. С. 123–128. URL: https://repository.kpi.kharkov.ua/bitstream/KhPI-Press/9156/1/vestnik_HPI_2014_18_Sotnyk_Modeliuvannia.pdf
29. Мірошник Ю. В. Інтелектуальні енергетичні системи «Smart Grid». Вісник Київського політехнічного інституту. Серія: Енергетика. 2014. № 1. С. 45–50. URL: https://jour.fea.kpi.ua/article/download/93788/89334
30. How Smart Pumping Is Shaping the Industry. Pumps & Systems. 2015. URL: https://www.pumpsandsystems.com/how-smart-pumping-shaping-industry