

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
АЕРОКОСМІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ  
КАФЕДРА КОМП'ЮТЕРИЗОВАНИХ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ  
ТА ТЕХНОЛОГІЙ

ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ  
Завідувач випускової кафедри  
В.П. Квасніков  
“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2021 р.

**ДИПЛОМНА РОБОТА**  
**(ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА)**  
**ЗДОБУВАЧА ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ «БАКАЛАВР»**

**Тема: «Проектування та застосування регульованих синхронних  
електроприводів на технічних об'єктах»**

Виконавець студент групи ЕЕ-416  
Хаян Сергій В'ячеславович

Керівник доцент  
Калмикова Лариса Миколаївна

Нормоконтролер кандидат технічних наук  
Катаєва Марія Олександрівна

Київ 2021

# НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Аерокосмічний факультет

Кафедра: комп'ютеризованих електро-технічних систем та технологій

Освітній ступень: «Бакалавр»

Спеціальність: 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»,

Освітньо-професійна програма «Електротехнічні системи електроспоживання»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

В.П. Квасніков

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 р.

## ЗАВДАННЯ

### на виконання дипломного проекту

Хаян Сергій В'ячеславович

(П.І.Б. випускника)

1. Тема проекту «Проектування та застосування регульованих синхронних електроприводів на технічних об'єктах».

затверджена наказом ректора від «29» квітня 2021 № 686/ст.

2. Термін виконання проекту: з 10.05.2021 по 14.06.2021 .

3. Вихідні дані до проекту: Регульовані синхронні електроприводи.

4. Зміст пояснювальної записки: Розробити технічне рішення використання елктроприводів.

5. Перелік обов'язкового ілюстративного матеріалу: рисунки, таблиці.

6. Календарний план-графік

№	Завдання	Термін виконання	Підпис керівника
1.	Вивчення інформаційних джерел	10.05-15.05	
2.	Розділ 1. Загальні поняття про частотно-регульований привод та відцентрові насоси	16.05-23.05	
3.	Розділ 2. Принцип дії ЧРП та відцентрових насосів	24.05-28.05	
4.	Розділ 3. Моделювання процесів частотного регулювання на насосних станціях	29.05-05.05	
5.	Розділ 4. Аналіз та обґрунтування застосування частотно-регулюючих приводів	16.05-09.05	
6.	Розробка рисунків та таблиць	10.05-14.05	

7. Дата видачі завдання: “ 10 ” квітня 2021 р.

Керівник дипломної роботи (проекту) \_\_\_\_\_ Л. М. Калмикова  
(підпискерівника) (П.І.Б.)

Завдання прийняв до виконання \_\_\_\_\_ С. В. Хаян  
(підписвипускника) (П.І.Б.)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до дипломної роботи «Проектування та застосування регульованих асинхронних електроприводів на технічних об'єктах»: **68 сторінок, 18 рисунків, 17 використаних джерел.**

**Об'єкт дослідження** – насоси станції водовідведення з регульованою частотою обертання приводів.

**Предмет дослідження** –забезпечення ефективного керування насосами водовідведення за критеріями мінімізації енергетичних втрат на основі визначення залежності параметрів насосних агрегатів від режимів роботи частотно-регульованих приводів.

**Мета роботи:** оптимізація керування насосами станції водовідведення за критеріями найбільшого енергозбереження в умовах циклічної зміни фактичного навантаження.

**Методи дослідження.** Для оцінки оптимізації керування необхідно мати в аналітичній формі сімейство навантажувальних характеристик агрегату і залежність споживаної потужності від навантаження для кожної з частот. Слід враховувати відмінності в специфіці роботи насосів на станції водовідведення. В першому випадку вимагається підтримання постійного тиску при будь-якому відведенні рідини, що досягається формуванням необхідної навантажувальної характеристики шляхом частотного регулювання. У другому – тиск встановлюється в залежності від поточної подачі агрегату, яка визначається змінюваними на протязі доби потребами з водовідведення. При підвищенні швидкості тиск зростає за рахунок в'язкого тертя, збільшуючи питомі витрати енергії.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ.....	6
РОЗДІЛ 1 ЗАГАЛЬНІ ПОНЯТТЯ ПРО ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНИЙ ПРИВОД ТА ВІДЦЕНТРОВІ НАСОСИ.....	7
1.1. ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНИЙ ПРИВІД. ВИЗНАЧЕННЯ ТА ЗАСТОСУВАННЯ ЧАСТОТНО- РЕГУЛЬОВАНОГО ПРИВОДА.....	7
1.2. ПЕРЕВАГИ ТА НЕДОЛІКИ ЗАСТОСУВАННЯ ЧРП.....	13
1.3. КЛАСИФІКАЦІЯ, ХАРАКТЕРИСТИКИ ТА ПРИЗНАЧЕННЯ ВІДЦЕНТРОВИХ НАСОСІВ.....	13
1.4. ОСНОВНІ ВУЗЛИ (ЕЛЕМЕНТИ) ВІДЦЕНТРОВИХ НАСОСІВ.....	20
1.5 ЗАСТОСУВАННЯ ВІДЦЕНТРОВИХ НАСОСІВ У ПРОМИСЛОВОСТІ.....	22
РОЗДІЛ 2 ПРИНЦИП ДІЇ ЧРП ТА ВІДЦЕНТРОВИХ НАСОСІВ.....	24
2.1 ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНИЙ ПРИВОД ЯК ЗАСІБ ПІДВИЩЕННЯ ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ.....	24
2.2 СТРУКТУРА ЧАСТОТНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА.....	26
2.3 ПРИНЦИП РОБОТИ ПЕРЕТВОРЮВАЧА ЧАСТОТИ.....	26
2.4 ПРИНЦИП ДІЇ ВІДЦЕНТРОВИХ НАСОСІВ.....	31
2.5 ПРИВОДИ ВІДЦЕНТРОВИХ НАСОСІВ.....	34
2.6 РОЗРАХУНКИ ПО ВИБОРУ ЕЛЕКТРОДВИГУНА.....	37
РОЗДІЛ 3 МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ЧАСТОТНОГО РЕГУЛЮВАННЯ НА НАСОСНИХ СТАНЦІЯХ ВОДОВІДВЕДЕННЯ.....	40
3.1 ФОРМУЛИ ДЛЯ РОБОЧОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАСОСІВ.....	40
3.2 ФОРМУЛИ ДЛЯ ОБЧИСЛЕННЯ СПОЖИВАНОЇ НАСОСОМ ПОТУЖНОСТІ..... ПРИ ЧАСТОТНОМУ РЕГУЛЮВАННІ.....	42
3.3 ВИВІД СПІВВІДНОШЕНЬ ДЛЯ АНАЛІЗУ ЗАЛЕЖНОСТІ ККД НАСОСА ВІД РЕЖИМІВ РОБОТИ.....	45
3.4 СПРОЩЕНИЙ ПІДХІД ДО ОЦІНКИ ОЧІКУВАНОВОГО ЕФЕКТУ ВІД ПРОВАДЖЕННЯ ЧАСТОТНОГО УПРАВЛІННЯ НАСОСАМИ.....	53
РОЗДІЛ 4 АНАЛІЗ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАСТОСУВАННЯ ЧАСТОТНО-РЕГУЛЮЮЧИХ ПРИВОДІВ.....	54
4.1 ВИЗНАЧЕННЯ ВИХІДНИХ ДАНИХ.....	55
4.2 ОСНОВНІ ЗАЛЕЖНОСТІ, ХАРАКТЕРИЗУЮТЬ ЕНЕРГЕТИКУ АГРЕГАТІВ.....	57
4.3 РОЗРАХУНОК ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИВОДУ І ЕКОНОМІЧНОГО ЕФЕКТУ.....	58
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	66
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	67

## ВСТУП

Сучасний рівень розвитку технологій виготовлення напівпровідникових приладів надав можливість реалізації пропорційного керування частотою двигунів змінного струму з потужностями до кількох сотень кіловат. Тандем електронного частотного керування з конструктивно надійною асинхронною машиною виявився найбільш раціональним підходом до створення регульованих приводів, завдяки чому останні зазнали широкого застосування в багатьох господарських і промислових сферах.

Одним з застосувань частотного керування приводів є насосні агрегати станцій водовідведення, навантаження на які постійно зростає. Вочевидь, за таких умов проблема енергозбереження є актуальною і потребує ефективного її розв'язання.

Найбільш поширеними є насоси, принцип дії яких заснований на прискоренні водяної маси за рахунок дії відцентрової сили при обертанні робочого колеса з лопатями, яке приводиться в обертальний рух електродвигуном. Основним параметром, що ілюструє роботу насоса, є навантажувальна характеристика агрегату, яка представляє собою сімейство кривих залежності тиску на виході насоса від його поточної подачі при певних значеннях частоти обертання колеса.

Конструкційні особливості відцентрових насосів дозволяють підтримувати будь-яку швидкість руху рідини (від нульової до максимальної) без порушення допустимих умов експлуатації, при чому тиск в такій системі встановлюється у відповідності з навантажувальною характеристикою насоса. Спожита двигуном електроенергія залежить від швидкості потоку і не зменшується до нуля при зупинці останнього, що призводить до зниження ККД системи. При різних кінцевих (цільових) подачах насосного агрегату існує деяка відмінна від номінальної частоти обертання, за якої досягається максимум ККД для кожної подачі. Саме ця залежність і підлягає визначенню.

## **ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ**

ЧРП - частотно-регульований привід

ШІМ- широтно-імпульсна модуляція

АН- автономний інвертор напруги

САР- система автоматичного керування

СКІ ШІМ- система керування широтно-імпульсного модулятора

АД- асинхронний двигун

ПРЧ- привод з регульованою частотою

## РОЗДІЛ 1

### ЗАГАЛЬНІ ПОНЯТТЯ ПРО ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНИЙ ПРИВОД ТА ВІДЦЕНТРОВІ НАСОСИ

#### 1.1. Частотно-регульований привід. Визначення та застосування частотно-регульованого привода

Частотно-регульований привід (частотно-керований привід, VariableFrequencyDrive) - це система, що керує швидкістю обертання асинхронного (синхронного) електродвигуна. Складається з двох елементів: електродвигуна та частотного перетворювача.

Завдяки досягненню високих експлуатаційних характеристик частотно-керованих приводів (потужна навантажувальна характеристика при будь-якій частоті обертання, висока надійність, мінімальні габарити і маса) вони знайшли застосування в багатьох приладах різного технічного призначення, таких як обладнання текстильної промисловості, координатні верстати, побутові пральні машини, кондиціонери тощо.

Перетворювач частоти - пристрій, що складається з випрямляча (міст постійного струму), який перетворює змінний струм промислової частоти в постійний та інвертора (перетворювача), що перетворює постійний струм в змінний необхідної частоти і амплітуди.

Частотно-регульований електропривод являє собою систему керування швидкістю обертання електродвигуна змінного струму. Він керує частотою електроенергії, що подається до електродвигуна. Частотно-регульований електропривод являється особливим типом приводу з регульованою швидкістю. Частотно-регульовані електроприводи також називають приводами з регульованою частотою (ПРЧ), приводи з

регульованою швидкістю, інверторні приводи, приводи змінного струму.

Автоматичне підстроювання частоти складається з первинного електричного ланцюга, який перетворює змінний струм в постійний струм, а потім перетворить його назад в змінний струм необхідної частоти. Внутрішня втрата енергії в пристрої автоматичного підстроювання частоти оцінюється приблизно як 3,5%. [1]

Частотно-регульовані електроприводи широко використовуються в насосах і приводах верстатів, компресорах і системах вентиляції великих будівель. Частотно-регульовані електродвигуни вентиляторів економлять енергію за рахунок того, що управляють відповідністю переміщуваного об'єму повітря поточним потребам системи.

До числа причин використання автоматичного підстроювання частоти можна віднести функціональні якості установок і економію електроенергії. Наприклад, автоматичне підстроювання частоти використовується в насосах, в яких потік повинен відповідати обсягу або тиску. Насос регулює оберти до заданого значення за допомогою контуру налаштування. Регулювання витрати або тиску у відповідності з поточними потребами системи знижує споживання електроенергії.

Частотний перетворювач в комплекті з асинхронним електродвигуном дозволяє замінити електропривод постійного струму. Системи регулювання швидкості двигуна постійного струму досить прості, але слабким місцем такого електроприводу є електродвигун. Він дорогий і ненадійний. При роботі відбувається іскріння щіток, що призводить до зношення колектора. Такий електродвигун не може використовуватися в запиленому і вибухонебезпечному середовищі.

Асинхронні електродвигуни перевершують двигуни постійного струму за багатьма параметрами: вони прості по пристрою і надійні, тому що не мають рухомих контактів. Вони мають менші в порівнянні з двигунами постійного



струму розміри, масу і вартість при тій же потужності. Асинхронні двигуни прості у виготовленні і експлуатації.

Основний недолік асинхронних електродвигунів - складність регулювання їх швидкості традиційними методами (змінюючи напругу живлення, введенням додаткових опорів в ланцюг обмоток).

Управління асинхронним електродвигуном в частотному режимі до недавнього часу було великою проблемою, хоча теорія частотного регулювання була розроблена ще в тридцятих роках. Розвиток частотно-регульованого електроприводу стримувався високою вартістю перетворювачів частоти. Поява силових схем з транзисторами IGBT-, розробка високопродуктивних мікропроцесорних систем управління дозволило різним фірмам Європи, США та Японії створити сучасні перетворювачі частоти доступної вартості. [5]

Відомо, що регулювання частоти обертання виконавчих механізмів можна здійснювати за допомогою різних пристроїв: механічних варіаторів, гідравлічних муфт, додатково вводяться в статор або ротор резисторами, електромеханічними перетворювачами частоти, статичними перетворювачами частоти.

Застосування перших чотирьох пристроїв не забезпечує високої якості регулювання швидкості, неекономічно, вимагає великих витрат при монтажі та експлуатації.

Статичні перетворювачі частоти є найбільш досконалими пристроями управління асинхронним приводом в даний час.

Застосування регульованого електроприводу забезпечує енергозбереження і дозволяє отримувати нові якості систем і об'єктів. Значна економія електроенергії забезпечується за рахунок регулювання якого-небудь технологічного параметра. Якщо це транспортер або конвеєр, то можна регулювати швидкість його руху. Якщо це насос або вентилятор - можна підтримувати тиск або регулювати продуктивність. Якщо це верстат, то можна плавно регулювати швидкість подачі або головного руху.

ЧРП застосовуються в:

- судновому електроприводі великої потужності;
- прокатних станах (синхронна робота клітей) ;
- високооборотному приводі вакуумних турбомолекулярних насосів (до 100.000 об / хв.) ;
- конвеєрних системах;
- різальних автоматах;
- верстатах з ЧПУ - синхронізація руху відразу декількох осей (до 32 - наприклад в поліграфічному або упаковувати обладнанні) (сервоприводи) ;
- насосах, вентиляторах, компресорах;
- пральних машинах;
- на електротранспорті: електровозах, електропоїздах, трамваях і тролейбусах;
- в текстильній промисловості (для підтримки постійної швидкості і натягу тканини між різними вузлами машини). [7]

Найбільший економічний ефект дає застосування ЧРП в системах вентиляції, кондиціонування і водопостачання, де застосування ЧРП стало фактично стандартом.

Застосування дозволяє:

- підвищити точність регулювання;
- знизити витрати електроенергії у разі змінного навантаження.

Застосування перетворювачів частоти на насосних станціях.

Класичний метод керування подачею насосних установок передбачає дроселювання напорних ліній і регулювання кількості працюючих агрегатів, з якого-небудь технічного параметру (наприклад, тиску у трубопроводі). Насосні агрегати в цьому випадку вибираються виходячи з якихось розрахункових характеристик (як правило, в більшу сторону) і постійно функціонують в

заданому режимі з постійною частотою обертання, не враховуючи при цьому коливання витрат і напорів, викликаних змінним водоспоживанням. Тобто простими словами, навіть коли не потрібно значних зусиль, насоси продовжують роботу в заданому робочому темпі, при цьому витрачаючи значну кількість електроенергії. Так, наприклад, відбувається в нічний час доби, коли споживання води різко падає.

Народження регульованого електроприводу дозволило піти від зворотного в технології системи подачі: тепер не насосна установка диктує умови, а безпосередньо самі характеристики трубопроводів. Широке застосування у світовій практиці отримав частотно регульований електропривод з асинхронним електродвигуном загальнопромислового застосування. Частотне регулювання швидкості обертання валу асинхронного двигуна, здійснюється за допомогою електронного пристрою, який прийнято називати частотний перетворювач. Вищевказаний ефект досягається шляхом зміни частоти і амплітуди трифазного напруги, що надходить на електродвигун. Таким чином, змінюючи параметри живлячої напруги (частотне управління), можна робити швидкість обертання двигуна як нижче, так і вище номінальної.

Метод перетворення частоти ґрунтується на наступному принципі. Як правило, частота промислової мережі становить 50 Гц. Для прикладу візьмемо насос з двополюсним електродвигуном. При такій частоті мережі швидкість обертання двигуна становить 3000 (50 Гц x 60 сек) оборотів в хвилину і дає на виході насосного агрегату номінальний напір і продуктивність (тому що це його номінальні параметри, згідно паспорту). Якщо за допомогою частотного перетворювача, знизити частоту, що подається на нього, змінної напруги, то відповідно знизяться швидкість обертання двигуна, а, отже, змінитися натиск і продуктивність насосного агрегату. Інформація про тиск у мережі надходить до блоку частотного перетворювача за допомогою спеціального датчика тиску, встановленого в трубопроводі, на підставі цих даних перетворювач відповідним чином змінює частоту, що подається на двигун.

Сучасний перетворювач частоти має компактне виконання, пило і вологозахищений корпус, зручний інтерфейс, що дозволяє застосовувати його в найскладніших умовах і проблемних середовищах. Діапазон потужності досить широкий і становить від 0,4 до 500 кВт і більше при стандартному харчуванні 220/380 В і 50-60 Гц. Практика показує, що застосування частотних перетворювачів на насосних станціях дозволяє:

- Економити електроенергію, налаштувавши роботу електроприводу залежно від реального водоспоживання (ефект економії 20-50%);

- Знизити витрату води, за рахунок скорочення витоків при перевищенні тиску в магістралі, коли витрата водоспоживання насправді малий (в середньому на 5%);

- Зменшити витрати на профілактичний і капітальний ремонт споруд та обладнання (всієї інфраструктури подачі води), в результаті припинення аварійних ситуацій, викликаних зокрема гідравлічним ударом, який нерідко трапляється в разі використання нерегульованого електроприводу (доведено, що ресурс служби обладнання підвищується мінімум в 1, 5 рази);

- Досягти певної економії тепла в системах гарячого водопостачання за рахунок зниження втрат води, що несе тепло;

- Збільшити тиск вище звичайного у разі необхідності;

- Комплексно автоматизувати систему водопостачання, тим самим знижуючи фонд заробітної плати обслуговуючого та чергового персоналу, і виключити вплив «людського фактора» на роботу системи, що теж важливо. За оцінками вже реалізованих об'єктів, термін окупності проекту з впровадження перетворювачів частоти складає 1-2 роки. [2]

## **1.2. Переваги та недоліки застосування ЧРП**

### **Переваги застосування ЧРП:**

- Економія електроенергії у разі змінного навантаження ;
- Пусковий момент, рівний;
- Підвищений ресурс обладнання;
- Зменшення гідравлічного опору трубопроводу через відсутність регулюючого клапана;
- Плавний пуск двигуна, що значно зменшує його знос;
- ЧРП як правило містить в собі ПДД-регулятор і може підключатися безпосередньо до датчика регульованої величини (наприклад, тиску);
- Стабілізація швидкості обертання при зміні навантаження;
- Значне зниження акустичного шуму електродвигуна,
- Дозволяють замінити собою автоматичний вимикач.

### **Недоліки застосування ЧРП:**

- Більшість моделей ЧРП є джерелом завад;
- Порівняно висока вартість для ЧРП великої потужності (окупність мінімум 1-2 роки) ;

## **1.3. Класифікація, характеристики та призначення відцентрових насосів**

Відцентрові насоси, являють собою вид обладнання, що відповідає за перекачування води та створення напору за допомогою обертання робочого колеса, в результаті чого діють відцентрові сили.

Відцентровий агрегат має ключові елементи: спіральний корпус і робоче колесо, яке насаджено на вал. Вал, в свою чергу, обертається в підшипниках. Крім цього, конструкція насоса включає: приймальний зворотний клапан забезпечений сіткою (при заливці перед пуском стримує рідину всередині корпусу і

всмоктуючого патрубку), засувка на всмоктуючому патрубку, вакуумметр (для виміру розрідження на стороні всмоктування).

Характеристики відцентрових насосів прив'язані до його конструкції, матеріалам деталей, принципам функціонування основних робочих вузлів. Найбільш точно характеристики насоса можливо визначити дослідним шляхом на практиці. У процесі того, як відцентрові насоси функціонують, враховується величезне число зовнішніх факторів і впливів, які, як правило, неможливо повною мірою передбачити в теорії.

Маючи один загальний принцип роботи, відцентрові насоси відрізняються по конструкції, розмірам і показниками продуктивності. В основному, дані відмінності відносяться до робочих колес і розташуванням вала в корпусі. Самий нескладний вид відцентрових насосів - одноступінчатий, який є найбільш поширеним. Діапазон роботи таких насосів при витраті і тиску води широкий, але вони створюють порівняно невисокий напір води.

Багатоступінчасті секційні відцентрові насоси є більш досконалішими. Конструкція таких насосів передбачає кілька робочих колес і ступенів, які розташовуються послідовно один за одним. В даному випадку потік води переміщається від забірної отвору ступені до вхідного отвору наступному ступені, при цьому остаточний показник напору дорівнює сумі напорів, які створює кожен ступінь комплексу. При цьому загальний вал може бути орієнтований як вертикально, так і горизонтально. При виборі відцентрового насоса варто звертати увагу на той факт, що насоси мають торцеве ущільнення вала, є більш сучасними, ніж застарілі аналоги з сальникової набиванням. Основна перевага першої конфігурації полягає в збереженні герметичності і відсутності витоків, а також хорошому рівні герметичності при вібраціях і невеликому зсуві валу. [10]

Насоси загального призначення Це найбільш поширена група насосів, призначених для перекачування чистих або злегка забруднених, хімічно нейтральних, маловязких рідин з температурою до 85°C (105°C). Вони знаходять

застосування в різних галузях промисловості, в сільському господарстві, в системах опалення та водопостачання міського комунального господарства та ін. [14].

За конструктивними ознаками насоси загального призначення поділяють на ряд типів. При відносно низьких подачах і напорах ( $Q \leq 300 \text{ м}^3/\text{ч}$   $H \leq 85 \text{ м}$ ) застосовуються консольні насоси типу К і КМ. Конструкція насоса типу К наведена на рис.1.1, а насоса типу КМ на рис.1.2.

Конструкція насоса типу К і його основні розміри повинні відповідати Міжнародному стандарту ІСО 2858-75 [18].

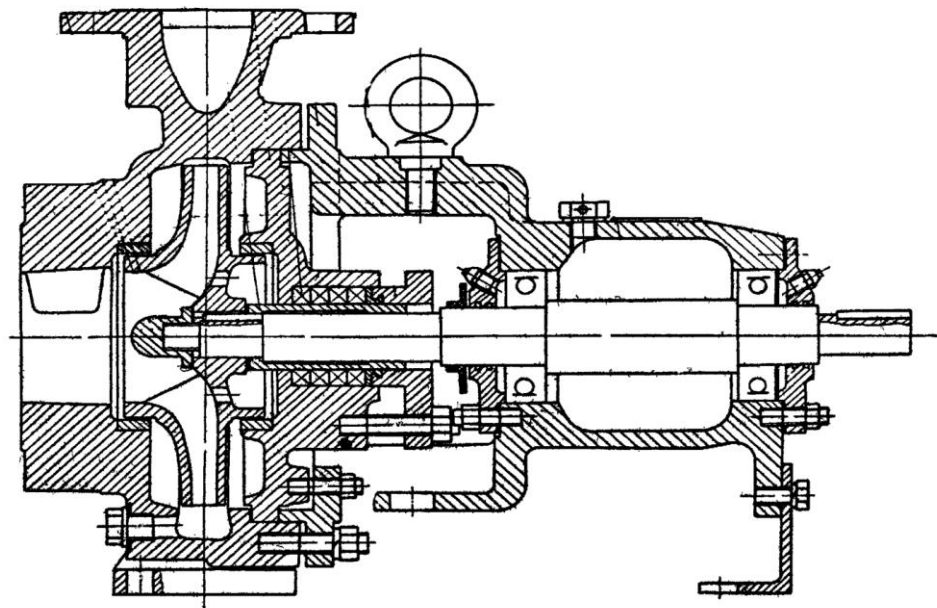


Рисунок 1.1. Насос консольний типу К загального призначення

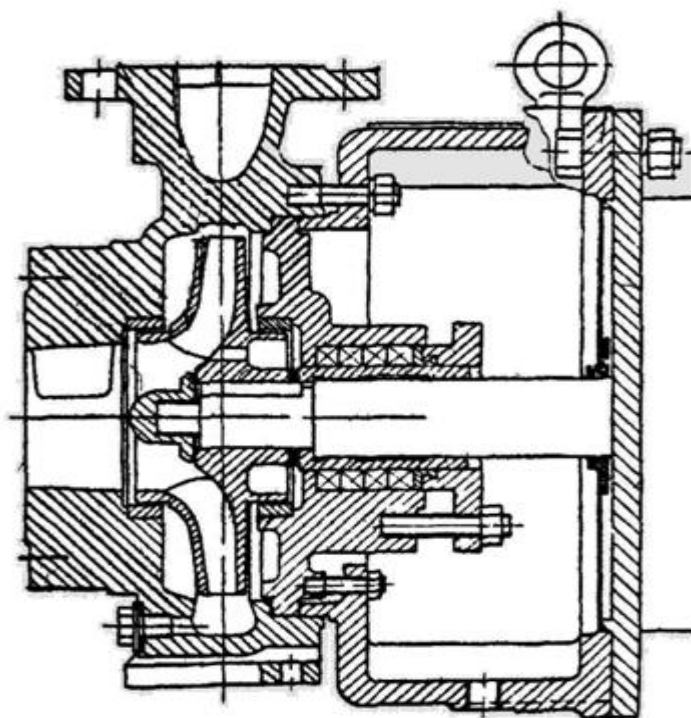


Рисунок 1.2. Насос консольний моноблочний типу КМ загального призначення

У них робоче колесо встановлюється на кінці вала електродвигуна, а підшипники електродвигуна служать опорами і насоса.

При високих напорах ( $H \leq 2000\text{м}$ ) застосовуються багатоступінчасті конструкції типу ЦНС (ДСТУ 4132-2002), при цьому різні напори досягаються зміною кількості ступенів (секцій). Типова конструкція таких насосів наведена на рис.1.3.



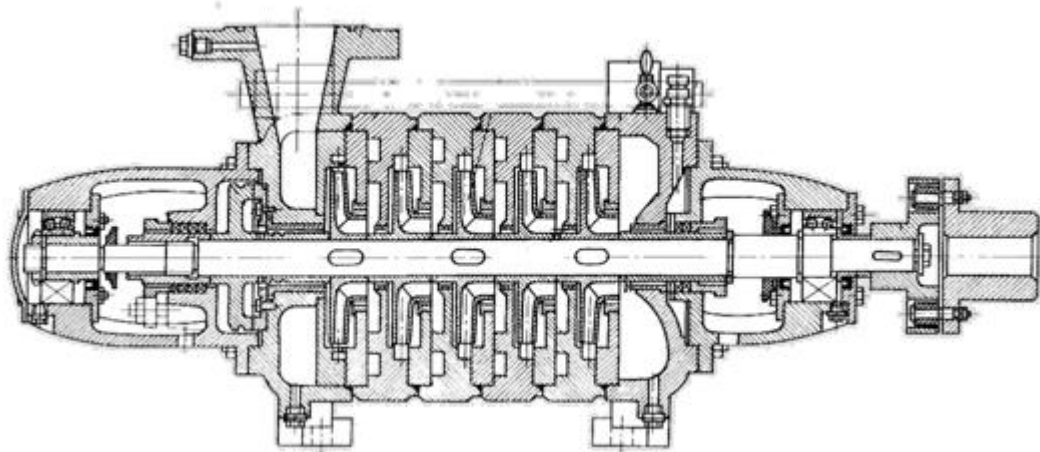


Рисунок 1.3. Насос багатоступінчастий секційний типу ЦНС загального призначення

Для перекачування відносно невеликих кількостей рідини  $Q \leq 160 \text{ м}^3/\text{ч}$  і невеликих напорах до 160м при числі ступенів менше чотирьох доцільно застосовувати багатоступінчасті насоси консольного типу [17]. У цьому випадку на відміну від одноступінчатих насосів фланець напірного патрубку повинен бути розрахований на номінальний тиск 2,5 МПа замість 1,6, а також застосований більш потужний опорний кронштейн (на увазі підвищеного навантаження на підшипники).

При відносно високих подачах ( $Q \leq 12500 \text{ м}^3/\text{ч}$ ), але низьких напорах ( $H \leq 160 \text{ м}$ ) зазвичай застосовуються насоси двостороннього входу типу Д (ГОСТ10272-77). Конструкція насоса типу Д наведена на рис.1.4.

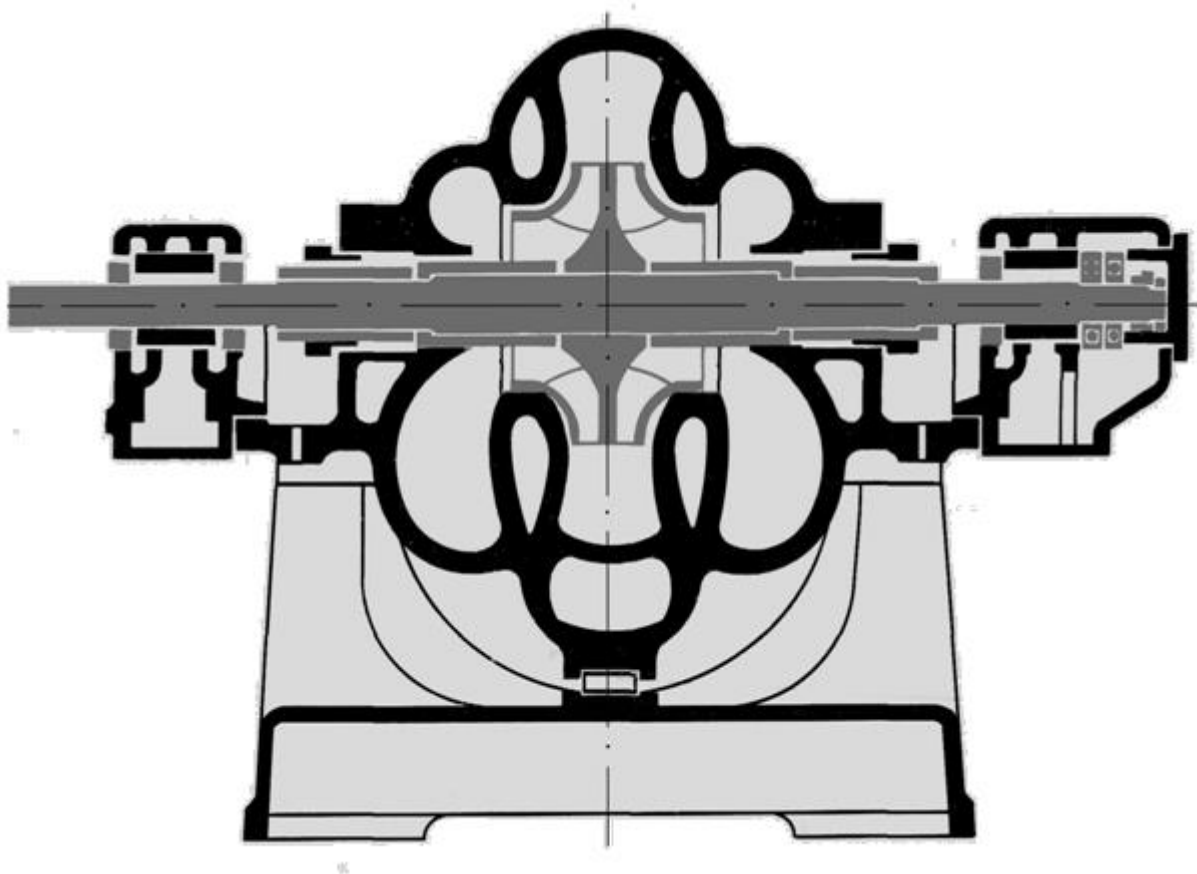


Рисунок 1.4. Насос двостороннього входу типу Д загального призначення

Основні фактори, що визначають економічну, надійну і довговічну роботу відцентрового насоса:

1. Вибір оптимальної конструктивної схеми: вертикальне чи горизонтальне виконання, консольна або з прохідним валом, дво- або однокорпусні, з різним розташуванням робочих коліс, оптимальне число ступенів (бажано мінімальне) і потоків .

2. Забезпечення зовнішньої герметичності.

3. Кваліфікований розрахунок проточної частини та інших елементів насоса.

4. Правильний вибір матеріалів основних деталей і якісне виготовлення.

5. Кваліфікований монтаж.

6. Кваліфікована експлуатація.

Переваги відцентрових насосних установок можна розділити, в основному, на конструктивні і функціональні.

За своєю конструкцією відцентрові насоси компактні завдяки тому, що агрегат з'єднаний безпосередньо з паровими турбінами і електродвигуном. Як наслідок такі установки мають невелику вагу і габаритами при високих показниках продуктивності і вимагають маленьку площу установки і порівняно легкий фундамент. Відцентрові насосні установки легко демонтувати і встановлювати. Вони надійні, довговічні, економічні в експлуатації і нескладні у використанні.

Функціональні плюси включають, зокрема, здатність насоса до швидкої активації і нескладного регулювання. Вони плавно і безперервно подають воду, тому в напірному дроті усуваються гідравлічні удари.

Відцентрові насоси широко використовуються для перекачування речовин, що містять суспензії, сміття, забруднення.

Розумна вартість насоса складається з порівняльної дешевизни використовуваних матеріалів при його виготовленні: чавун, полімери, сталь.

Відцентрові насоси виробляються в наступних варіантах конструктивного виконання:

Одноступінчаті відцентрові насоси у вертикальному або горизонтальному виконанні, багатоступінчасті відцентрові насоси, напівзаглибені відцентрові насоси, занурювальні відцентрові насоси, відцентрові насоси двостороннього входу з корпусом типу "в лінію,

герметичні відцентрові насоси.

Класифікації відцентрових насосів можна також розбити на три основні типи: за принципом конструктивних особливостей, рівнем напору і показником швидкохідності робочого колеса, а також типом перекачуваної рідини:

Згідно вазі перекачуваної рідини, насоси можна поділити на водопровідні агрегати, агрегати, які використовуються в каналізаційній системі, агрегати для роботи з кислотними рідинами т.д.

#### **1.4. Основні вузли (елементи) відцентрових насосів**

Відцентрові насоси оснащені такими ключовими вузлами: спіральним корпусом і робочим колесом, що знаходяться всередині корпусу з кріпленням на валу за допомогою шпонки. У підшипниках вал здійснює обертальні рухи. Для ущільнення прохідного отвору, де вал проходить через корпус, є сальники. Рідина, через всмоктуючий патрубок потрапляє в корпус насоса і подається в центр робочого колеса, яке здійснює обертальні рухи. Речовина обертається під дією лопатей і від центру колеса відкидається на периферію, потрапляючи потім в спіральну частину корпусу насоса (в спіральних насосах), після чого вона переміщається по напірному трубопроводу крізь нагнітає патрубок. Так, лопаті діють на молекули води в слідстві чого і освіту кінетичної енергії двигуна в швидкісний напір струменя рідини під тиском.

Напір струменя рідини, який створює насос, вимірюють у таких одиницях як метр стовпа речовини, що перекачується. Рідина всмоктується через розрідження перед лопатей колеса. Опукла форма лопатей забезпечує більш сильний напір рідини і більш якісне набрякання, при цьому робоче колесо здійснює обертальні рухи у напрямку нагнітання опуклою стороною лопатей.

Відцентрові насоси, як правило, мають наступні прилади і арматуру:

- Приймальний зворотний клапан оснащений сіткою, який служить для стримування води у всмоктуючому патрубку корпусу насоса в процесі його затоки перед активацією. Сітка призначена для фільтрації суспензій містяться у воді;
- Засувку;
- Вакуумметр, який відповідає за завмер розрідження на стороні всмоктування. Він встановлений на трубопроводі між корпусом і засувкою. Відцентровий насос також має кран, призначений для випуску повітря в процесі затоки (розташований вгорі корпусу), зворотний клапан, розташований на напірному трубопроводі, який не дає воді переміщатися назад по відцентровому насосу при необхідності;

- Засувку, розташовану на напорному трубопроводі, яка забезпечує: запуск процесу, зупинку, а також контроль продуктивності напору, створюваного відцентровим насосом;
- Манометр для вимірювання напору рідини, який створює відцентровий насос. Манометр розташовується на напірному патрубку насоса;
- Запобіжний клапан, що забезпечує захист відцентрового насоса від гідравлічних ударів. Даний клапан поміщений на напірний патрубок за засувку для захисту насоса. Відцентровий насос, також часто має пристрій для заточки насоса, а також різні прилади автоматики.



Рисунок 1.5. Креслення (типова схема) одноступінчатих відцентрових насосів

1. Спіральний корпус (равлик), включаючи всмоктуючий і нагнітальний патрубок, в класичному виконанні (всмоктуючий патрубок - розташований горизонтально, нагнітальний - вертикально)
2. Робоче колесо

3. Вузол ущільнення вала
4. Вал
5. Лабіринтове ущільнення масляної камери підшипників
6. Підшипникова опора
7. розвантажувати вал несуча опора
8. Вічко-рівнемір для контролю рівня масла в камері підшипникового вузла [10]

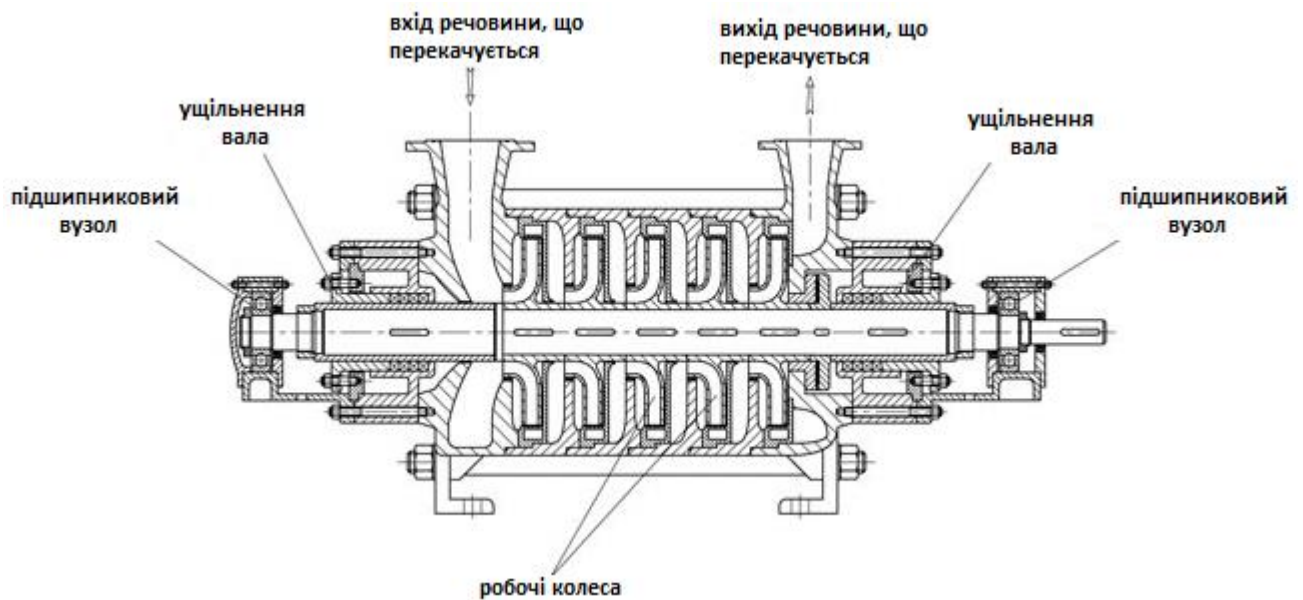


Рисунок 1.6. Креслення (типова схема) багатоступеневих відцентрових насосів

### 1.5. Застосування відцентрових насосів у промисловості

Відцентрові насоси працюють з водою будь-якої температури, рідинами високої в'язкості, стічними водами, речовинами з різними домішками (пісок, шлак, ґрунт, торф, вугілля). Внаслідок чого, такі насоси часто застосовуються в хімічній і нафтовій галузі, при роботі на шахтах, для побутових і комунальних потреб.

Для опалювальних систем, а також установок охолодження та кондиціонування використовуються відцентрові насоси, призначені для роботи з водою. Такі моделі забезпечують безперервну циркуляцію рідини по замкнутому контуру для того, щоб підтримувати постійну температуру. Найчастіше, дані типи насосів використовують на присадибних ділянках.

Занурювальні насоси використовуються при відкачуванні чистою і води середньої забрудненості. Такі насоси використовуються для того, щоб отримати чисту воду з колодязя або свердловини, або для осушення затоплених приміщень. Погружной насос може працювати безперервно протягом тривалого часу.

Самовсмоктувальний насос активно використовується в якості складового елемента насосної станції. Такий насос здатний виконувати будь-яку роботу, пов'язану з перекачуванням рідин з самим різним рівнем забруднення.

#### **висновок до розділу**

1. У розділі було розглянуто загальні поняття, опис, характеристики і призначення частотно регульованих приводів та відцентрових насосів, перелік переваг та недоліків, застосування ЧРП та відцентрових насосів у промисловості.

## РОЗДІЛ 2

### ПРИНЦИП ДІЇ ЧРП ТА ВІДЦЕНТРОВИХ НАСОСІВ

#### 2.1. Частотно-регульований привод як засіб підвищення економічної ефективності

Особливий економічний ефект від використання перетворювачів частоти дає застосування частотного регулювання на об'єктах, що забезпечують транспортування рідин. Дотепер найпоширенішим способом регулювання продуктивності таких об'єктів є використання засувки або регулюючих клапанів, але сьогодні доступним стає частотне регулювання асинхронного двигуна, що приводить в рух, наприклад, робоче колесо насосного агрегату.

При роботі з проектною витратою засувка відкрита повністю і, відповідно, споживана потужність електродвигуном насоса буде максимальною. При зниженні витрати допомогою прикриття засувки (дроселювання) споживана потужність електродвигуном зменшується, але залишається більше ніж при зниженні швидкості обертання насоса.

Для дроселювання - в точці  $Q = 0$  ( $P_{\min}$ ) засувка закрита, а в точці  $Q = 1$  ( $P_{\max}$ ) засувка відкрита.

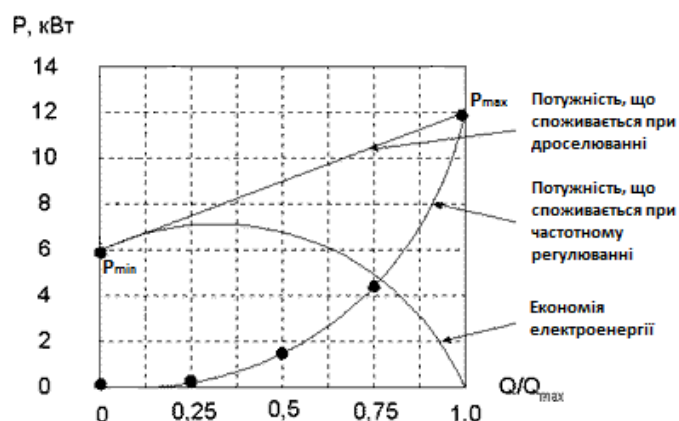


Рис. 2.1. Дросельне та частотне керування



Таким чином, при дроселюванні потік речовини, стримуваний засувкою або клапаном, не робить корисної роботи. Застосування регульованого електроприводу насоса або вентилятора дозволяє задати необхідний тиск або витрата, що забезпечить не тільки економію електроенергії, але і знизить втрати речовини, що транспортується. [2]

Принцип регулювання продуктивності насоса зміною швидкості обертання його робочого колеса представлений на Рис. 2.2. Режими роботи насоса визначаються точками перетину  $a$ ,  $a_1$  і  $a_2$  характеристик насоса  $H_n = f(Q)$  з постійною для даної мережі характеристикою  $H_c = f(Q)$ . При різних швидкостях обертання робочого колеса  $n_2 < n < n_1$  буде різна продуктивність насоса  $Q_{n2} < Q_n < Q_{n1}$  і різні напори  $H_{n2} < H_n < H_{n1}$ . Зі збільшенням швидкості обертання робочого колеса натиск і витрата збільшуються. Споживані потужності  $P_{n2}$ ,  $P_n$ ,  $P_{n1}$  і к.к.д.  $\eta_{n2} < \eta_n < \eta_{n1}$  так само можуть визначені за рис. .

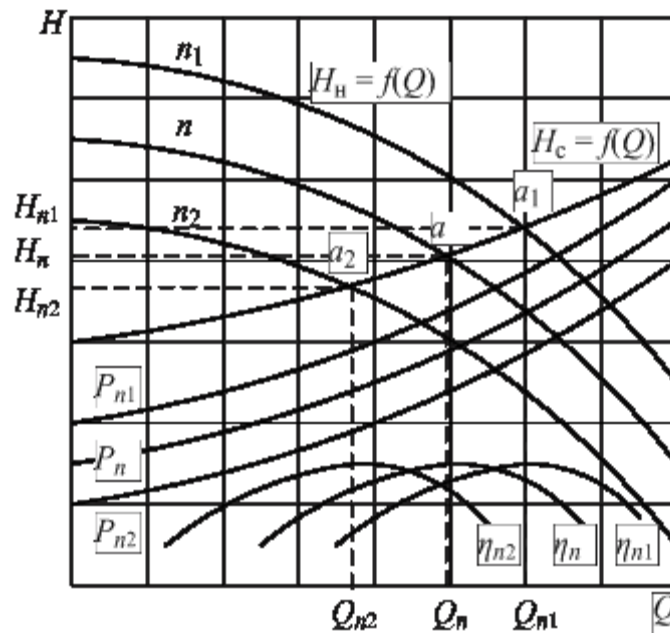


Рис. 2.2. Регулювання продуктивності насоса зміною швидкості обертання робочого колеса

## 2.2. Структура частотного перетворювача

Більшість сучасних перетворювачів частоти побудовано за схемою подвійного перетворення. Вони складаються з наступних основних частин: ланки постійного струму (некерованого випрямляча), силового імпульсного інвертора і системи управління.

Ланку постійного струму складається з некерованого випрямляча і фільтра. Змінна напруга живильної мережі перетвориться в ньому в напругу постійного струму.

Силовий трифазний імпульсний інвертор складається з шести транзисторних ключів. Кожна обмотка електродвигуна підключається через відповідний ключ до позитивного і негативного висновків випрямляча. Інвертор здійснює перетворення випрямленої напруги в трифазну, змінну напругу потрібної частоти і амплітуди, яке прикладається до обмоток статора електродвигуна.

У вихідних каскадах інвертора в якості ключів використовуються силові IGBT транзистори. У порівнянні з тиристорами вони мають більш високу частоту перемикання, що дозволяє виробляти вихідний сигнал синусоїдальної форми з мінімальними спотвореннями. [4]

## 2.3 Принцип роботи перетворювача частоти

Принцип частотного методу регулювання швидкості асинхронного двигуна полягає в тому, що, змінюючи частоту живлячої напруги  $f$ , можна у відповідності з виразом:

$$\omega_0 = 2\pi f / p \quad (2.1)$$

при незмінному числі пар полюсів  $p$  змінювати кутову швидкість магнітного поля статора.

Цей спосіб забезпечує плавне регулювання швидкості в широкому діапазоні, а механічні характеристики мають високу жорсткість.

Регулювання швидкості при цьому не супроводжується збільшенням ковзання асинхронного двигуна, тому втрати потужності при регулюванні невеликі.

Для отримання високих енергетичних показників асинхронного двигуна - коефіцієнтів потужності, корисної дії, перевантажувальної здатності - необхідно одночасно з частотою змінювати і напругу.

Закон зміни напруги залежить від характеру моменту навантаження  $M_c$ . При постійному моменті навантаження  $M_c = \text{Const}$  напруга на статорі повинна регулюватися пропорційно частоті:

$$\frac{U_1}{f_1} = \text{const} \quad (2.2)$$

Для вентиляторного характеру моменту навантаження цей стан має вигляд:

$$\frac{U_1}{f_1^2} = \text{const} \quad (2.3)$$

При моменті навантаження, обернено пропорційному швидкості:

$$\frac{U_1}{\sqrt{f_1}} = \text{const} \quad (2.4)$$

Таким чином, для плавного безступінчастого регулювання частоти обертання валу асинхронного електродвигуна, перетворювач частоти повинен

забезпечувати одночасне регулювання частоти і напруги на статорі асинхронного двигуна.

Перетворювач частоти складається з некерованого діодного силового випрямляча В, автономного інвертора, системи управління ШІМ, системи автоматичного регулювання, дроселя L і конденсатора фільтра С (рис . 2.3 ).

Регулювання вихідної частоти  $f_{вих}$  і напруги  $U_{вих}$  здійснюється в інверторі за рахунок високочастотного широтно-імпульсного управління. Широтно-імпульсна управління характеризується періодом модуляції, всередині якого обмотка статора електродвигуна підключається по черзі до позитивного і негативного полюсів випрямляча.

Тривалість цих станів всередині періоду ШІМ модулюється за синусоїдальним законом. При високих (зазвичай 2 ... 15 кГц) тактових частотах ШІМ, в обмотках електродвигуна, внаслідок їх фільтруючих властивостей, течуть синусоїдальні струми.

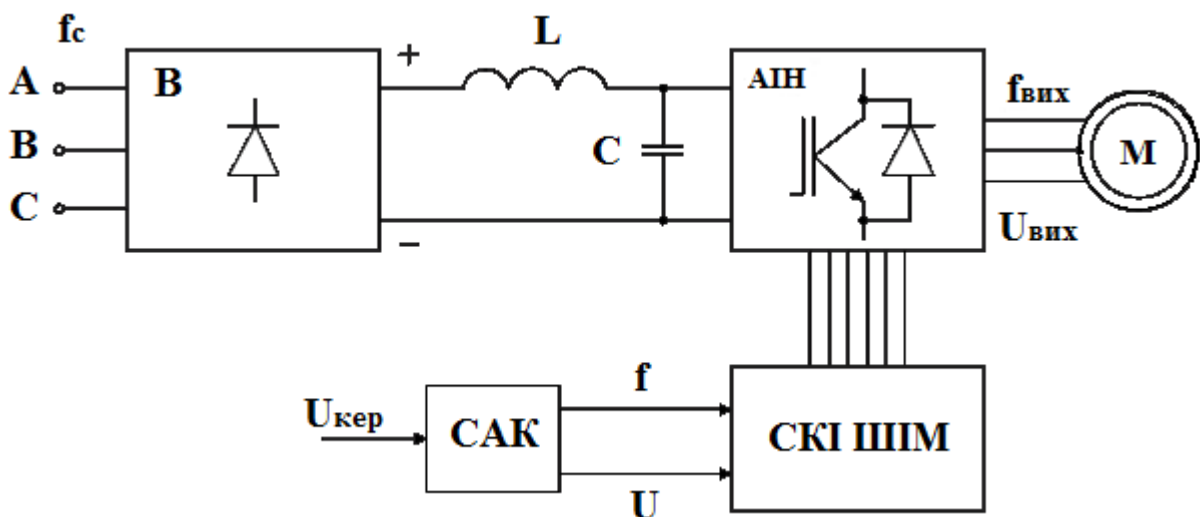


Рис.2.3. Структурна схема ЧРП

Таким чином, форма кривої вихідної напруги являє собою високочастотну двухполярну послідовність прямокутних імпульсів (рис . 2.4). Частота імпульсів визначається частотою ШІМ, тривалість (ширина) імпульсів протягом періоду вихідної частоти АІН промодульовані за синусоїдальним законом. Форма кривої

вихідного струму (струму в обмотках асинхронного електродвигуна) практично синусоїдальний.

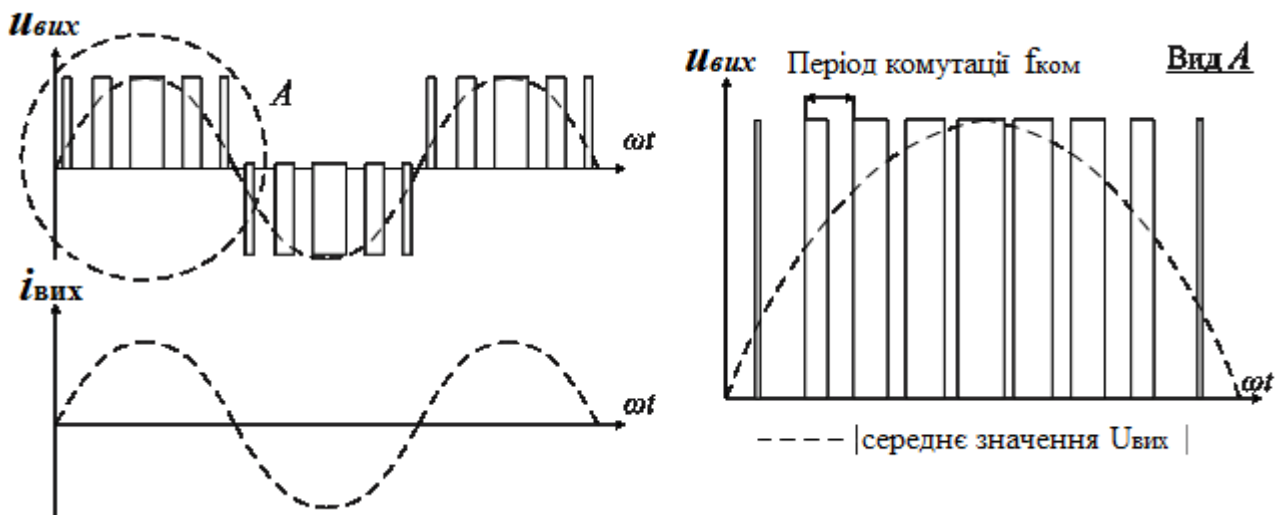


Рис. 2.4. Форми кривих вихідних напруги та струму

За такою схемою функціонують переважна більшість представлених на ринку ЧРП. Відмінності полягають у функціях системи управління, які можна поділити на три групи:

- Управління силовими ключами вихідного генератора;
- Забезпечення захисту двигуна, мережі та ПРЧ;
- Інтерфейс із зовнішніми інформаційними системами.

Коефіцієнт корисної дії ЧРП високий і становить у середньому 98%. При цьому з мережі споживається практично тільки активна складова струму навантаження.

Мікропроцесорна керуюча система забезпечує високу якість управління електродвигуном і контролює безліч його параметрів, запобігаючи тим самим можливість виникнення аварійних ситуацій.

Застосування ЧРП дозволяє реалізувати наступні технічні можливості:

- Регулювання швидкості від нуля до номінальної і вище до технічно допустимої;

- Плавний пуск і зупинка;
- Обмеження струму на рівні номінального в пускових, робочих та аварійних режимах;

- Збільшення терміну служби механічної та електричної частин обладнання.

Регулювання вихідної напруги інвертора можна здійснити двома способами: амплітудним (АР) за рахунок зміни вхідної напруги  $U_{в}$  і широтно-імпульсним (ШІМ) за рахунок зміни програми перемикання вентилів V1-V6 при  $U_{в} = \text{Const}$ .

Другий спосіб набув поширення в сучасних перетворювачах частоти завдяки розвитку сучасної елементної бази (мікропроцесори, IGBT-транзистори). При широтно-імпульсній модуляції форма струмів в обмотках статора асинхронного двигуна виходить близької до синусоїдальної завдяки фільтруючим властивостям самих обмоток.

Таке управління дозволяє отримати високий ККД перетворювача і еквівалентно аналоговому управлінню за допомогою частоти і амплітуди напруги.

Сучасні інвертори виконуються на основі повністю керованих силових напівпровідникових приладів - замикаються GTO - тиристорів, або біполярних IGBT-транзисторів з ізольованим затвором. На рис. 2.5 представлена Трифазна мостова схема автономного інвертора на IGBT транзисторах.

Вона складається з вхідного ємнісного фільтра СФ і шести IGBT транзисторів V1-V6-включеними зустрічно-паралельно діодами зворотного струму D1-D6.

За рахунок почергового перемикання вентилів V1-V6 за алгоритмом, заданим системою управління, постійне вхідний напруга  $U_{в}$  перетворюється в змінну прямокульно-імпульсна вихідна напруга. Через керовані ключі V1-V6 протікає активна складова струму асинхронного електродвигуна, через діоди Д1-Д6 - реактивна складова струму.

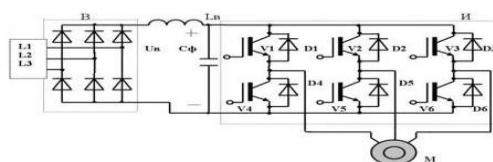


Рис. 2.5 Трифазна мостова схема автономного інвертора на IGBT транзисторах

I - трифазний мостовий інвертор;  
В - трифазний мостовий випрямляч;  
Сф - конденсатор фільтру;

## **2.4 Принцип дії відцентрових насосів**

В основі принципу дії відцентрових насосів лежать відцентрові сили, що виникають в корпусі насоса в момент його роботи, внаслідок обертання робочого колеса. Робоче колесо посаджено шпонковим з'єднанням на вал насоса, від якого йому передається крутний момент створюваний приводом насоса. Вал насоса з'єднується з валом приводу електродвигуна за допомогою пружної муфти.

Відцентрові насоси є найбільш поширеним видом насосів, який призначений для перекачування рідких речовин.

Відцентрові насоси функціонують тільки за умови, що корпус агрегату заповнений водою. Дані насоси працюють під дією відцентрової сили, яку викликає обертання робочого колеса. У корпусі насоса розташовані одне або кілька коліс, які жорстко закріплені на валу. Кожне колесо, якщо їх декілька, має опуклі лопаті, що з'єднують пару дисків. Рідина надходить через всмоктуючий патрубок. При активації агрегату вал, який з'єднаний з електромотором, запускає колесо. Воно починає захоплювати воду і відкидати її від центру до периферії колеса. Наростаюча відцентрова сила сприяє переміщенню рідини в нагнітальний трубопровід за допомогою направляючої камери. Так, між лопатями зростає тиск у міру того як звільняється простір, що і дозволяє новій порції рідини надходити з трубопроводу. Зазвичай всмоктуючий патрубок має фільтр, який не дає суспензіям і сміттю проникати в корпус насоса. Принцип дії одноступінчатих і багатоступінчатих насосів аналогічний. Різниця полягає в тому, що в багатоколісних агрегатах тиск зростає в кожному наступному колесі. [11]

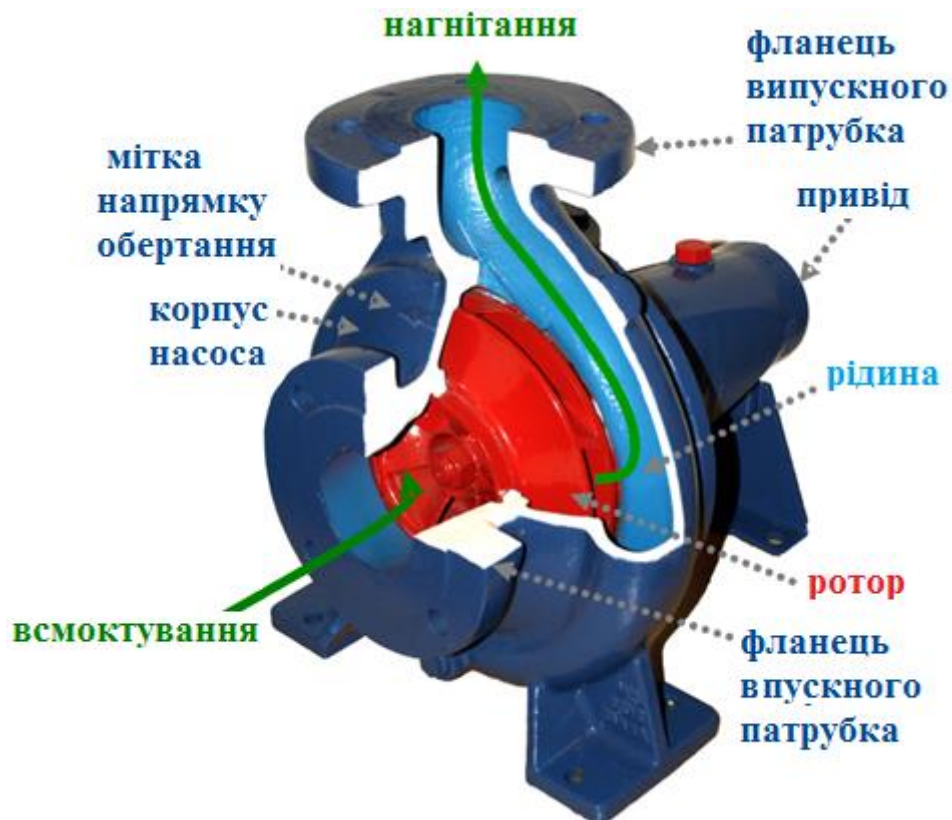


Рис 2.6. Відцентровий насос у розрізі

Для забезпечення безаварійної роботи відцентрових насосів, їх необхідно комплектувати певним набором контрольно-вимірювальних приладів.

Щоб забезпечити захист робочого колеса насоса, від випадкового потрапляння в трубопровід з перекачуємим середовищем чужорідних тіл, на лінії входу в насос рекомендується встановлювати засувку і фільтр.

Щоб уникнути можливої появи процесу кавітації, внаслідок відтоку перекачуваного середовища, встановлюється зворотний клапан і манометр для контролю тиску потоку на вході в насос.

Для захисту від можливого гідроудару з-за зачиненої засувки на лінії нагнітання, відразу за насосом встановлюють зворотний клапан і манометр для контролю тиску, що розвивається насосом.

Вибираючи відцентровий насос з типової розмірної лінійки, слід зупинити свій вибір на насосі основні робочі характеристики (продуктивність і напір) якого знаходяться в середині робочого інтервалу на графіках кривих залежностей основних робочих характеристик для обраного модельного ряду.



При виборі розміру насоса орієнтуються на максимальні значення потрібних ключових характеристик насоса, продуктивності та напору, який насос повинен забезпечувати, враховуючи опору системи, в яку буде встановлений насос.

Для ефективної безаварійної роботи насоса необхідно забезпечити його без кавітаційну роботу, яка забезпечується дотриманням наступної умови: «кавітаційний запас насоса повинен бути нижче кавітаційного запасу системи, в яку насос буде встановлено».

Матеріальне виконання проточної частини насоса і деталей, що контактують з перекачуємим середовищем, вибирається, виходячи з корозійної активності перекачується насосом середовища.

Мінімально допустимою при правильному виборі матеріального виконання проточної частини насоса вважається швидкість корозії 0,1 мм / рік (макс.)

Обрана сталь повинна забезпечувати швидкість корозії проточної частини нижче 0,1 мм / рік.

Фізико-хімічними властивостями рідини визначається, конструкція і тип вживаного в насосі вузла ущільнення. Відцентрові насоси можуть комплектуватися сальниковим і різними видами механічних ущільнень.

Споживана потужність насоса визначається за графіками кривих залежностей основних робочих характеристик насоса при значеннях максимальної продуктивності.

Стандартно такі графіки розраховуються по воді, у разі якщо щільність рідини, що перекачується відрізняється з щільністю води, необхідно отримане на графіку значення споживаної потужності насоса помножити на відношення щільності рідини / до щільності води.

## 2.5 Приводи відцентрових насосів

Збільшення потужності і розширення областей застосування відцентрових насосів зумовило збільшення типів застосовуваних приводів.

В даний час найбільш поширеним типом приводу відцентрового насоса залишаються електродвигуни різного виконання, а серед них - електродвигуни змінного струму синхронні і асинхронні з частотою обертання до 3000об / хв.

Синхронна частота обертання визначається виразом:

$$n_{\text{синх}} = 60 f / p, \quad (2.2)$$

де  $f$ -частота струму;  $p$  - число пар полюсів.

Зазвичай застосовуються асинхронні трифазні короткозамкнені електродвигуни, частота обертання яких на відміну від синхронних змінюється залежно від навантаження.

Величина ковзання визначається виразом:

$$s = \frac{n_{\text{синх}} - n}{n_{\text{синх}}}, \quad (2.3)$$

де  $n$ -Частота обертання асинхронного електродвигуна.

У невеликих двигунах  $S = 5-6\%$ , у потужних  $S = 1-2\%$ .

Частота обертання синхронних і асинхронних електродвигунів при різному числі пар полюсів, при частоті струму 50Гц наведена в табл.2.1.

Критеріями вибору типу електродвигуна поряд з особливостями їх характеристик як технічних, так і економічних є традиції. Наприклад, для приводу насосів загальнопромислового призначення частіше застосовуються асинхронні електродвигуни, а для нафтової промисловості - синхронні.

Синхронні електродвигуни застосовуються у великих установках, коли не потрібно регулювання частоти обертання і частих пусків.

Таблиця 2.1

Залежність частоти обертання електродвигунів від числа пар полюсів

Число пар полюсів	1	2	3	4	5	6
Частота обертання електродвигуна, об/хв:						
синхронного;	3000	1500	1000	750	600	500
асинхронного* (залежно від ковзання)	2950	1450	960	730	560	480

Електродвигуни потужністю 400 кВт і вище поставляються за окремими замовленнями. Максимальна потужність таких двигунів 12500кВт.

В останні роки все більш актуальним стає питання енергозбереження за рахунок використання нетрадиційних видів енергії, зокрема енергії, існуючої в безперервних технологічних циклах у вигляді перепадів тиску рідини. Найпростішим шляхом використання цієї енергії може бути установка в місці перепаду тиску турбіни, яка може рекуперировать енергію рідини за допомогою генератора або ж працювати в якості приводу.

До створення рекуперативних турбін в Україні приступили у другій половині 80-х років у ВНДІАЕН . Були проведені теоретичні та експериментальні дослідження, відпрацьовані високоекономічні проточні частини для багатоступневих турбін. Створені гідротурбіни двох типів: однопоточні багатоступінчасті секційні та двопоточні одноступінчасті спіральні з витратою

800 - 4000м<sup>3</sup>/год, напором 180 - 500м і потужністю 700 - 2000кВт. При розробці конструкції турбін використаний досвід створення потужних відцентрових насосів для теплової та атомної енергетики, нафтохімічної промисловості. Ряд вузлів: опорні і наполегливі підшипники, кінцеві ущільнення, з'єднувальні муфти роторів - запозичені з цих насосів. Окремі турбіни виконані на базі серійних насосів і відрізняються від останніх лише робочими колесами. Рекуперативні гідротурбіни можуть бути використані у виробництвах газоочистки, нафтохімії і т.п. як допоміжний привід насосних агрегатів. При цьому утворюється агрегат мотор-насос-турбіна, що складається з насоса, турбіни та електродвигуна. Застосування рекуперативних турбін дозволяє значно знизити споживану насосами потужність. Одним з перспективних напрямів використання рекуперативних гідротурбін і агрегатів з допоміжним турбоприводу є їх установка замість дросельних клапанів на електростанціях, на лінії рециркуляції потужних живильних насосів. Як приклад можна привести насос ПЕА 1650-80, при роботі якого на лінії рециркуляції з витратою 500м<sup>3</sup>/ч втрати потужності при дроселюванні складають приблизно 3000кВт. Заміна дроселів рекуперативними турбінами дозволить поряд з економією електроенергії значно знизити рівень шуму, знос і вібрацію арматури.

Враховуючи загальну тенденцію підвищення частоти обертання в насособудуванні (більше 3000об / хв), принциповим стає питання вибору високооборотного приводу. У цьому випадку можливі такі варіанти приводів:

- 1 Турбіна парова, газова або гідравлічна.
- 2 Звичайний електродвигун з мультиплікатором.
- 3 Звичайний електродвигун з гідродинамічної муфтою і вбудованим мультиплікатором
- 4 Частотно-регульований електродвигун.

Переваги та недоліки турбінного приводу наведені в табл.2.2. Звичайний електродвигун має свої недоліки, на які накладається надійність додаткового елемента - мультиплікатора, при цьому головний недолік - відсутність можливості регулювання частоти обертання. При включенні до складу приводу

гідродинамічної муфти цей недолік усувається, але ускладнюється установка, знижується її економічність і підвищується вартість. Застосування частотно-регульованих електродвигунів (з тиристорними перетворювачами частоти) забезпечує плавне регулювання частоти обертання в широкому діапазоні, проте їх дорожнеча значно стримує їх широке застосування [16].

В цілому вибір того чи іншого типу приводу визначається призначенням, параметрами та умовами експлуатації відцентрового насоса.

## 2.6 Розрахунки по вибору електродвигуна

Електродвигун для приводу при з'єднанні валів допомогою муфти вибирається за максимальної потужності насоса, Вт, обумовленої умовами роботи агрегату:

$$N_{\max} = \frac{k\rho g Q_{\max} H_{Q_{\max}}}{1000 \cdot 3600 \eta_{Q_{\max}}}, \quad (2.4)$$

де  $Q_{\max}$  – максимально можлива подача насоса, м<sup>3</sup>/год;

$H_{Q_{\max}}$ ,  $\eta_{Q_{\max}}$  – відповідно натиск, м і ККД насоса при  $Q_{\max}$ ;

$\rho$  - щільність рідини, кг/м<sup>3</sup>;

$k$  – коефіцієнт запасу, який обирали в межах 1.5-1.05, залежно від умов роботи агрегату. За ГОСТ 12878-67 рекомендуються такі значення коефіцієнта запасу залежно від потужності насоса: до 20кВт  $k = 1.25$ ; від 20 до 50кВт  $k = 1.2$ ; від 50 до 300кВт  $k = 1.15$ ; від 300 до 500кВт  $k = 1.1$ ; вище 500кВт  $k = 1.05$ .

За отриманим значенням максимальної потужності  $N_{\max}$  вибирається найближчий по каталогу тип електродвигуна. Номінальна потужність двигуна повинна бути більше  $N_{\max}$ .

Після вибору електродвигуна необхідно перевірити відповідність його пускових характеристик умовам роботи агрегату в системі. Для цього будується графічна залежність моменту опору агрегату від частоти обертання (рисунок.2.7).

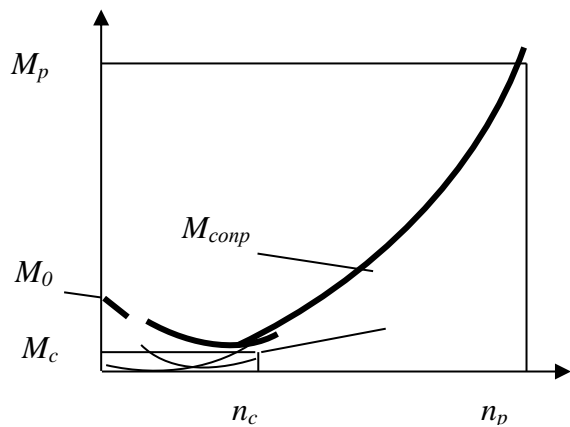


Рисунок 2.7-Пускова моментна характеристика

Зазвичай в інженерній практиці використовують наближені методи побудови кривої моменту опору насосного агрегату в процесі пуску, ґрунтуючись на експериментальних даних. Момент опору насосного агрегату складається з суми моменту тертя обертових частин і моменту, що витрачається на прискорення маси рідини в трубопроводах. Для нормального пуску

момент, створюваний електродвигуном, повинен бути більше сумарного моменту опору. Так як відцентрові насоси найчастіше запускаються в роботу при закритій засувці, момент, що витрачаються на прискорення рідини в трубопроводі, не береться до уваги.

Графічна залежність  $M_{conp} = f(n)$  будується за наступними точками:

-початковий момент зрушення з місця ( $n = 0$ );

по опитним даним:  $M_0 = 0,21M_{ном}$ ,

де  $M_{ном} = 9736 N_{ог}/n$  – номінальний момент на валу електродвигуна, н·м;

-Момент виходу електродвигуна на номінальну частоту обертання ( $n = n_{ном}$ ):

$$M_p = 9736 N/n, \quad (2.5)$$

З початку координат через точку  $M_p$  будуюмо квадратичну параболу  $M \approx n^2$ , так як складові моменту опору пропорційні квадрату частоти обертання. Експерименти показують, що в початковий момент пуску крива моменту опору різко відрізняється від параболи. Для того щоб отримати криву, близьку за формою до дійсної, на графік наносять додаткову точку «С» з координатами:

$$n_c = 0,3n_{ном}$$

$$M_c = 0,03M_{ном}$$

Точки  $M_0$  і  $M_c$  з'єднуються плавною кривою, що перетинає квадратичну параболу. У місці перетину виконується плавне сполучення двох кривих.

### **висновок до розділу**

Регулювання продуктивності агрегатів зміною швидкості обертання приводу дозволяє істотно знизити витрату електроенергії і реалізовувати плавний пуск електродвигуна, що полегшує роботу електрообладнання та обладнання підключених інженерних систем. Особливий економічний ефект від використання перетворювачів частоти дає застосування частотного регулювання на об'єктах, що забезпечують транспортування рідин.

Регулювання частоти обертання виконавчих механізмів можна здійснювати за допомогою різних пристроїв: механічних варіаторів, гідравлічних муфт, що додатково вводяться в статор або ротор резисторами, електромеханічними перетворювачами частоти, статичними перетворювачами частоти, які є найбільш досконалими пристроями управління асинхронним приводом в даний час.

## РОЗДІЛ 3

### МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ЧАСТОТНОГО РЕГУЛЮВАННЯ НА НАСОСНИХ СТАНЦІЯХ ВОДОВІДВЕДЕННЯ

#### 3.1. Формули для робочої характеристики насосів

Залежність тиску  $p(50)$  при номінальній частоті 50 Гц від фактичної витрати  $V$ :

$$p(50) = p_m \left( 1 - \frac{(V - V_0)^2}{(V_m - V_0)^2} \right) = p_m \left( 1 - \left( \frac{V - V_0}{V_m - V_0} \right)^2 \right), \quad (3.1)$$

де:  $p_m$  - максимальний тиск на робочій характеристиці,

$V_0$  - витрата, що відповідає максимуму тиску,

$V_m$  - максимальна витрата на холостому ході ( $p=0$ ).

Фактично це перевернута парабола з вершиною в точці  $p_m, V_0$  і переходом через 0 тиску при витраті  $V_m$ .

Залежність тиску  $p(f, V)$  при довільній частоті  $f$  від фактичної витрати  $V$ :

$$p(f, V) = p_m \left( \frac{f}{f_0} \right)^2 \left( 1 - \left( \frac{V - V_0 \frac{f}{f_0}}{\frac{f}{f_0} (V_m - V_0)} \right)^2 \right) = p_m \left( \frac{f}{f_0} \right)^2 \left( 1 - \left( \frac{V \frac{f_0}{f} - V_0}{V_m - V_0} \right)^2 \right), \quad (3.2)$$



де:  $f$  - фактична частота,

$f_0$  - номінальна частота,

$p_m$  - максимальний тиск при частоті  $f_0$ ,

$V_0$  - витрата, що відповідає максимуму тиску при частоті  $f_0$ ,

$V_m$  - максимальна витрата на холостому ходу ( $p=0$ ) при частоті  $f_0$ .

Вираз отримано з використанням формул подібності. При зниженні частоти характеристика по осі витрати  $V$  зменшується пропорційно зміні частоти, а по осі тиску  $p$  - пропорційно квадрату цієї зміни.

Зворотня формула – визначення витрати  $V(p, f)$  по фактичному тиску  $p$  і частоті  $f$ :

$$V(p, f) = \frac{f}{f_0} \left( V_0 \pm (V_m - V_0) \sqrt{1 - \frac{p}{p_m} \left( \frac{f_0}{f} \right)^2} \right), \quad (3.3)$$

Знак  $\pm$  вказує на неоднозначність зворотного рішення, проте використовувати у формулі слід тільки знак  $+$ , так як друге рішення нестійке (нижче максимуму тиску). Дана формула справедлива тільки для випадку, коли вираз під радикалом невід'ємний, тобто коли :

$$\frac{p}{p_m} \left( \frac{f_0}{f} \right)^2 \leq 1 \quad \text{або} \quad \frac{p}{p_m} \leq \left( \frac{f}{f_0} \right)^2, \quad (3.4)$$

Третя залежність, яка виводиться більш складно, але дозволяє автоматизувати розрахунки - пошук необхідної частоти  $f(p, V)$  по заданому тиску  $p$  і витраті  $V$ :

$$f(p, V) = f_0 \frac{\sqrt{(VV_0)^2 + \left( V^2 + \frac{p}{p_m} (V_m - V_0)^2 \right) (V_m^2 - 2V_m V_0) - VV_0}}{V_m^2 - 2V_m V_0} \quad (3.5)$$

### 3.2. Формули для обчислення споживаної насосом потужності при частотному регулюванні

Формула для визначення потужності, споживаної відцентровим насосом при частотному регулюванні:

$$W(f, V) = \left(\frac{f}{f_0}\right)^2 \left[ W_0 + \frac{W_n - W_0}{k_0} V \left( 1 - \frac{V}{V_m f} k_w \right)^2 \right], \quad (3.6)$$

де:  $f$  - фактична частота,

$f_0$  - номінальна частота,

$W_0$  - паспортна споживана потужність при закритій засувці ( $V=0$ ) і частоті  $f_0$

$W_n$  - номінальна споживана потужність при номінальній витраті  $V_n$  і частоті  $f_0$ ,

$V_m$  - максимальна витрата на холостому ходу ( $p=0$ ) при частоті  $f_0$ ,

$k_0$  - коефіцієнт, який має розмірність витрати  $V$  і близький до номінального паспортного значення  $V_n$ .

$k_w$  - коефіцієнт введеної нелінійності характеристики потужності, що має розмірність частоти  $f$  і зазвичай не перевищує половини значення частоти  $f_0$ .

Особливістю даної моделі є те, що в ній відсутня залежність результату обчислення потужності від створюваного насосом тиску (ця залежність лише непряма). Однак вона найбільш повно відповідає всім паспортними даними насосів і результатами експериментальних досліджень діючих насосних станцій при частотному регулюванні.

Для визначення потужності використані два основних процеси, що формують дві різні складові споживаної потужності.

Перша складова моменту навантаження на валу насоса сформована вузькому тертям робочого колеса в нерухомій рідині (заслінка закрыта). Момент

в'язкого тертя пропорційний швидкості обертання колеса, отже, потужність буде пропорційна квадрату цієї швидкості (або частоти).

$$W_1(f) = \left(\frac{f}{f_0}\right)^2 W_0. \quad (3.7)$$

На номінальній робочій частоті  $f_0$  дана складова потужності  $W_1(f)$  приймає значення  $W_0$ , вказане в паспорті насоса і виміряний при атестації експериментально. При зміні (зниженні) частоти із закритою заслінкою значення  $W_1(f)$  зменшується пропорційно квадрату частоти, що також підтверджено експериментально.

Друга складова навантаження сформована процесом віддачі кінетичної енергії прискорюваної рідини і, грубо кажучи, пропорційна кількості рідини в одиницю часу (тобто витраті) при фіксованій частоті:

$$W_2(f, V) = \left(\frac{f}{f_0}\right)^2 \frac{W_n - W_0}{k_0} V \left(1 - \frac{V}{V_m f} k_w\right)^2. \quad (3.8)$$

При коефіцієнті нелінійності  $k_w = 0$  ця формула набуває спрощений вигляд:

$$W_2(f, V) = \left(\frac{f}{f_0}\right)^2 \frac{W_n - W_0}{k_0} V. \quad (3.9)$$

Результат добре узгоджується з паспортними даними. Квадратична залежність закону споживаної потужності  $W_2(f, V)$  від частоти при постійній витраті  $V$  може бути пояснена тим, що при зниженні частоти кінетична енергія одиниці перекачується рідини падає пропорційно квадрату її швидкості, а оскільки сумарний витрата рідини приймається постійним, то і загальна енергія потоку буде також пропорційна квадрату швидкості елементарної ділянки, тобто  $f^2$ . І це все при тому, що на достатньому видаленні від насоса процес переміщення

рідини в трубі буде однаковим в обох випадках (на двох різних частотах) і слід було б очікувати рівності енергетичних витрат, чого немає насправді. Не можна нехтувати також і тим, що тиск, що створюється насосом в двох цих випадках також (при постійній витраті на різних частотах) ніяк не може бути однаковим, а падає пропорційно квадрату частоти (див. Формули подібності), що і відновлює "енергетичну" справедливість. Результат обумовлений специфікою відбору при швидкості рідини з відцентрового насоса. Рідина йде з периферії обсягу, в якому обертається робоче колесо, де вона має максимальну і постійну при конкретній частоті швидкість. Кінетична енергія відводиться потоку буде, таким чином, прямо пропорційна кількості минає рідини в одиницю часу. Якщо ж сповільнити колесо, не змінивши перетин відбору рідини, її енергія зменшиться пропорційно квадрату зміни частоти, з одного боку, і пропорційно першого ступеня частоти у зв'язку зі зменшенням обсягу водяного потоку, що перекачується в одиницю часу, з іншого боку. Якщо тепер відновити витрата збільшенням перетину відбору рідини, перша ступінь зникне і квадратичний закон залежності потужності від частоти відновиться.

Проаналізувавши розглянуту формулу, можна сказати, що друга її частина  $W_2(f, V)$  описує процес, що характеризує кубічну залежність споживаної потужності від частоти обертання при постійному тиску в реальному трубопроводі. Експериментальне зняття даної характеристики на насосах КНС, де, як правило, рідина викачується на певну висоту через трубопровід великого перерізу (тиск постійно, а втратами на в'язке тертя можна знехтувати), дозволять чітко визначити два окремих ділянки, на одному з яких залежність носить квадратичний характер, а на іншому - кубічний. Причому, добре локалізується точка перегину, відповідна балансу тисків - створюваного насосом і з боку трубопроводу - при нульовій витраті (момент відкривання зворотного клапана).

Коефіцієнт нелінійності, введений в другу частину формули, дозволяє привести теоретичний закон у більш повну відповідність з характеристиками деяких насосів, отриманими експериментально. Форма нелінійності обрана математично і не має чіткого фізичного обґрунтування, яке через її мале значення

не було встановлено остаточно. Деякі з можливих моделей процесу відбору рідини з периферії колеса давали близький результат по нелінійності (у відомому наближенні) і ґрунтувалися на тому, що зі збільшенням відбору рідини з насоса відводяться не тільки периферійні шари, але і більш глибокі, у яких кінетична енергія нижче (за рахунок меншої їх швидкості). В цілому результат залежить від конкретної конфігурації корпусу, в якому розміщено робоче колесо, розмірів елементів, зазорів і т. п. Однак, введення запропонованої нелінійності цілком достатньо для вельми точної оцінки поведінки насосного агрегату при зміні частоти обертання робочого колеса.

### **3.3. Вивід співвідношень для аналізу залежності ККД насоса від режимів роботи**

Для математичного визначення ККД насоса та аналізу його залежності від поточної продуктивності в різних частотних режимах роботи, а також при підрізуванні колеса, дамо визначення поняття корисної потужності насосного агрегату: це корисна робота, виконувана насосом з підняття певної кількості рідини в одиницю часу на відповідну висоту. Фактично це зміна потенційної енергії жене рідини. При цьому насос відчуває навантаження по тиску, виражену в метрах водяного стовпа, відповідну висоті підйому рідини, а перекачує таке її кількість, яка впливає з робочої характеристики насоса для даного тиску. Тому для визначення корисної потужності насоса введемо зв'язок між висотою підйому рідини і тиском.

Нехай насос підіймає рідина з питомою щільністю  $\rho$  на висоту  $h$  по вертикальній трубі перетином  $S$ . маса рідини  $m$ , що знаходиться в цій трубі, буде равна:

$$m = \rho V_{oo} = \rho Sh, \quad (3.10)$$

де  $V_{oo} = Sh$  - об'єм рідини в трубі (об'єм труби).

Стовп рідини чинить тиск  $p$  на дно вертикально розташованої труби:

$$p = \frac{mg}{S} = \frac{\rho Shg}{S} = \rho gh, \quad (3.11)$$

де  $g$  – прискорення вільного падіння біля поверхні Землі.

Як бачимо, тиск залежить тільки від щільності рідини і висоти стовпа, тому, якщо мова йде про воду, зручніше виключити константи ( $\rho \approx 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$  и  $g \approx 9,81 \frac{\text{м}}{\text{сек}^2}$ ) і виражати тиск тільки в метрах водяного стовпа. Тепер повернемося до насоса. Нехай він перекачав за час  $t$  загальну кількість води  $m$  на висоту  $h$ . Виконана при цьому їм корисна робота  $A$  буде дорівнювати:

$$A = mgh \quad (3.12)$$

Знаючи продуктивність насоса  $V$ , виражену в  $\frac{\text{м}^3}{\text{час}}$ , можемо виявити масу  $m$  рідини, перекачаної за час  $t$ :

$$m = \rho V_{\text{об}} = \rho Vt. \quad (3.13)$$

Тепер підставимо це значення у вираз для роботи:

$$A = \rho Vtgh. \quad (3.14)$$

Щоб визначити потужність, залишається поділити роботу  $A$  на час  $t$ , за яке вона виконана, у результаті чого отримуємо:

$$W = \frac{A}{t} = \frac{\rho Vtgh}{t} = \rho Vgh, \quad (3.15)$$

але оскільки тиск стовпа рідини висотою  $h$  рівна  $p = \rho gh$ , як отримано вище, то отримуємо:

$$W = \rho Vgh = pV . \quad (3.16)$$

Це універсальний результат, який може використовуватися для обчислення корисної роботи насоса незалежно від того куди (на яку висоту  $h$ ) і кожну рідину (значення щільності  $\rho$ ) перекачує насос, так як ці величини в підсумковій формулі відсутні. Для практичного використання цієї формули треба перейти до подання продуктивності насоса  $V$  в  $\frac{м^3}{сек}$ , для чого ввести коефіцієнт 3600 (сек/год):

$$W = \frac{pV}{3600} . \quad (3.17)$$

Крім того, якщо використовувати значення тиску в метрах водяного стовпа, то замість  $p$  в останній формулі слід записати його розшифровку  $\rho gh$ , а також підставити значення  $\rho$  для води:

$$W = \frac{pV}{3600} = \rho \cdot \frac{ghV}{3600} = 10^3 \frac{9,81hV}{3600} = 2,725hV [Bm]. \quad (3.18)$$

Результат, обчислений за такою формулою, буде виражений у ваттах.

Зазвичай ККД насоса залежно від конструкції становить від 0,55 до 0,85, тому можна зробити висновок, що подібний насос може бути розрахований на роботу з двигуном потужністю близько 37-45кВт. Нехай насос підключений до труби перетином  $S$ . Лінійна швидкість водяного потоку при цьому складе:

$$v = \frac{V}{S} [м/час]. \quad (3.18)$$

Визначимо масу рідини  $m$ , що виходить з труби за час  $t$ :

$$m(t) = \rho V_{об}(t) = \rho vSt = \rho \cdot \frac{V}{S} \cdot St = \rho Vt , \quad (3.19)$$

де  $V_{об}(t) = vSt$  - обсяг рідини, що виходить з труби перетином  $S$  зі швидкістю  $v$  за час  $t$ .

Кінетична енергія води  $A_k(t)$ , що вийшла з труби за час  $t$ , складе:

$$A_k(t) = \frac{m(t)v^2}{2} = \frac{\rho Vt \cdot V^2}{2S^2} = \rho \frac{V^3 t}{2S^2}, \quad (3.20)$$

а потужність потоку  $W_k$  буде такою:

$$W_k = \frac{A_k(t)}{t} = \rho \frac{V^3}{2S^2}. \quad (3.21)$$

Прийmemo діаметр труби  $d$  рівним 400 мм. Розрахуємо її перетин:

$$S = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot (0,4)^2}{4} = 0,1256 \text{ м}^2. \quad (3.22)$$

Оцінимо швидкість водяного потоку в такій трубі для обраного насоса:

$$v = \frac{V}{S} = \frac{450}{3600 \cdot 0,1256} = 0,995 \approx 1 \text{ м/сек}. \quad (3.23)$$

Слід зазначити, що така швидкість потоку в трубі вважається вже граничною для більшості трубопроводів середньої протяжності, що пов'язано з втратами тиску на в'язкому терті об стінки труби, які пропорційні довжині труби і квадрату швидкості рідини. Обчислимо тепер потужність потоку по виведеній формулою:

$$W_k = \rho \frac{V^3}{2S^2} = 10^3 \cdot \frac{\left(\frac{450}{3600}\right)^3}{2 \cdot (0,1256)^2} = 61,9 \text{ Вт}. \quad (3.24)$$

Дані викладки були підтверджені експериментально при дослідженні залежності споживаної потужності і продуктивності насоса від частоти обертання робочого



колеса на насосній станції з насосом і трубопроводом, аналогічними розглянутим вище. Оскільки частота змінювалася східчасто (на 5Гц), можна було поспостерігати характер зміни обох контрольованих величин в період часу після чергового стрибка частоти. Виявилось, що скачок частоти в початковий момент не супроводжується яким-небудь значною зміною потужності або витрати. Процес встановлення нових значень витрати і споживаної потужності носить досить тривалий характер, період завершення якого становить близько 20 сек (згадайте, що таке  $3\tau$  для експоненційних процесів і порівняйте 20 сек і 9 сек). Характерно, що для аналізу даного процесу досить контролювати тільки один з названих параметрів. Поведінка сигналу потужності, формованого перетворювачем, добре узгоджується з даними витратоміра. Плавна (затягнута) зміна споживаної потужності після стрибка частоти спостерігається тільки при рухомій рідині: якщо ж рідину до і після стрибка нерухома (створюваний тиск нижче початкового тиску в трубопроводі і зворотний клапан закритий), ніякого багатосекундного процесу не спостерігається. Відбувається короткочасний (оборотний) стрибок потужності, обумовлений наявністю моменту інерції робочого колеса насоса і швидкий перехід на новий рівень споживаної потужності, викликаний тільки зміною моменту в'язкого тертя.

Знаючи вирази для розрахунку споживаної насосним агрегатом потужності і корисної потужності, виведемо формулу для розрахунку ККД насоса, а потім проаналізуємо характер його залежності від режимів роботи.

$$\begin{aligned}
 \text{ККД} = \frac{W_{us}}{W_{2\eta}} = \frac{pV}{W_{2\eta}} = \frac{p_m V \left(\frac{\eta f}{f_0}\right)^2 \left[1 - \left(\frac{V \frac{f_0}{\eta f} - V_0}{V_m - V_0}\right)^2\right]}{\left(\frac{\eta f}{f_0}\right)^2 \left[\eta_2 W_0 + \frac{W_n - W_0}{k_0} V \left(1 - \frac{V}{V_m f} k_w\right)^2\right]} = \frac{p_m V \left[1 - \left(\frac{V \frac{f_0}{\eta f} - V_0}{V_m - V_0}\right)^2\right]}{\eta_2 W_0 + \frac{W_n - W_0}{k_0} V \left(1 - \frac{V}{V_m f} k_w\right)^2}
 \end{aligned}
 \tag{3.22}$$

Результат у загальному вигляді виглядає вельми неповоротко. Тут використані повні формули, що враховують як частотне регулювання, так і підрізування колеса, причому в двох варіантах оцінки спожитої потужності для випадку подрезанного колеса: для першого  $\eta_2 = 1$ , а для другого  $\eta_2 = \eta$  (ступінь підрізки). Складно буде показати, що для другого варіанту підрізування колеса не змінить значення максимуму ККД (це неочевидно з формули), на відміну від першого. Розрахунки з використанням електронних таблиць це підтверджують. Ми ж обмежимося більш простим рішенням - виведемо вираз для визначення положення максимуму характеристики ККД на осі витрати  $V$ , причому для насоса, у якого зсув  $V_0 = 0$ , а залежність спожитої потужності від витрати лінійна -  $k_w = 0$ .

$$КПД(V) = \frac{p_m V \left( 1 - \left( \frac{V}{V_m} \cdot \frac{f_0}{\eta f} \right)^2 \right)}{\eta_2 W_0 + \frac{W_n - W_0}{k_0} V}. \quad (3.23)$$

Навіть таке просте рівняння не просто вирішується щодо знаходження положення і значення його максимуму. Запишемо чисельник похідною за змінною  $V$  від ККД і прирівняємо його 0:

$$\frac{\partial(КПД)}{\partial V} = \frac{p_m \left( 1 - 3 \left( \frac{V}{V_m} \cdot \frac{f_0}{\eta f} \right)^2 \right) \left( \eta_2 W_0 + \frac{W_n - W_0}{k_0} V \right) - p_m V \left( 1 - \left( \frac{V}{V_m} \cdot \frac{f_0}{\eta f} \right)^2 \right) \frac{W_n - W_0}{k_0}}{\left( \eta_2 W_0 + \frac{W_n - W_0}{k_0} V \right)^2} = 0. \quad (3.24)$$

Після перетворень вираз набуде вигляду:

$$2 \left( \frac{V}{V_m} \cdot \frac{f_0}{\eta f} \right)^2 \frac{W_n - W_0}{k_0} V + 3 \left( \frac{V}{V_m} \cdot \frac{f_0}{\eta f} \right)^2 \eta_2 W_0 - \eta_2 W_0 = 0 \quad (3.25)$$

або:

$$V^3 + \frac{3 W_0 k_0 \eta_2}{2 (W_n - W_0)} V^2 - \frac{W_0 k_0 \eta_2}{2 (W_n - W_0)} \left( \frac{\eta f}{f_0} V_m \right)^2 = 0. \quad (3.26)$$

Це кубічне рівняння відносно  $V$  і воно в загальному вигляді не має однозначного рішення, що охоплює всю область можливих значень коренів при довільних коефіцієнтах. Хоча нас цікавить тільки один з трьох можливих дійсних коренів, який фізично обґрунтований, рівняння слід вирішувати з використанням повноцінного методу Вієта-Кардано.

Використавши заміну

$$z = \frac{W_0 k_0 \eta_2}{2(W_n - W_0)} \quad (3.27)$$

рівняння можна записати у вигляді:

$$V^3 + 3zV^2 - z\left(\frac{\eta f V_m}{f_0}\right)^2 = 0. \quad (3.28)$$

Таким чином в кубічному рівнянні загального вигляду

$$x^3 + ax^2 + bx + c = 0$$

ми маємо справу з коефіцієнтами

$$a = 3z, \quad b = 0, \quad \text{и} \quad c = -z\left(\frac{\eta f V_m}{f_0}\right)^2. \quad (3.29)$$

Запишемо результат одного з рішень

$$V_{\text{КПД}} = z \left[ \sqrt[3]{\left| 1 - \frac{1}{2} \left( \frac{\eta f V_m}{z f_0} \right)^2 \right| + \sqrt{\left( 1 - \frac{1}{2} \left( \frac{\eta f V_m}{z f_0} \right)^2 \right)^2}} - 1 + \frac{1}{\sqrt[3]{\left| 1 - \frac{1}{2} \left( \frac{\eta f V_m}{z f_0} \right)^2 \right| + \sqrt{\left( 1 - \frac{1}{2} \left( \frac{\eta f V_m}{z f_0} \right)^2 \right)^2}} - 1} - 1 \right], \quad (3.29)$$

в який слід не забути ввести раніше прийняту підстановку

$$z = \frac{W_0 k_0 \eta_2}{2(W_n - W_0)} \quad (3.30)$$

Причому саме це рішення справедливо лише в певній області значень назв параметрів. Можна спробувати підставити цей вираз у формулу для ККД і переконатися в тому, що значення максимуму його при витраті  $V_{ККД}$  – величина постійна, якщо  $\eta_2 = \eta$  (входить в  $z$ ), і змінюється, якщо  $\eta_2 = 1$ . Але краще це зробити розрахунковим шляхом в Excel.

Обчислення виконані для таких значень параметрів:

$$f_0 = 50 \text{ Гц},$$

$$V_m = 800 \text{ м}^3/\text{год}$$

$$p_m = 80 \text{ мв.с.},$$

$$W_0 = 33,33 \text{ кВт},$$

$$W_n = 100 \text{ кВт},$$

$$k_0 = 400 \text{ м}^3/\text{год}.$$

При  $\eta_2 = \eta$  вийшов максимум ККД = 67,6% при витраті 321  $\text{м}^3/\text{год}$  не змінюється при підрізуванні колеса, зрушуючи по осі витрати до 0 пропорційно ступеня підрізування. Формула працює тільки в діапазоні частот вище 12,5 Гц. Нижче вираз під радикалом стає негативним і потрібно використовувати інше рішення кубічного рівняння для інших граничних умов.

При  $\eta_2 = 1$  максимум змінюється при підрізуванні колеса в тій же мірі, що і при зниженні частоти в те ж число раз, але зміщується до 0 повільніше. Так, при підрізуванні на 12,2% витрата для максимального ККД зміщується на 10%, сам же максимум опускається до 64,3%, тобто. на 5%.

Характерно, що при  $W_0 = 66,67 \text{ кВт}$ , що становить 2/3 від  $W_m$ , максимум ККД (у номінальному режимі) припадає на витрату 400  $\text{м}^3/\text{год}$  (точно на робочу точку) і становить 65,4%.

### 3.4. Спрощений підхід до оцінки очікуваного ефекту від впровадження частотного управління насосами

Кілька слів в плані прояснення оман практиків, що модернізують насосні станції і стверджують, що при частотному регулюванні споживана насосом потужність знижується пропорційно кубу зменшення частоти обертання його робочого колеса, що і веде до неймовірного економічного ефекту.

Відповідно до розглянутої моделі, яка передбачає дві різні складові потужності, при зміні частоти споживана потужність змінюється пропорційно квадрату частоти як при нульовій, так і при будь-якій іншій продуктивності насоса, тобто за умови, що витрата - величина фіксована, потужність падає лише пропорційно квадрату, а не кубу частоти. Якщо ще взяти до уваги той фактор, що при фіксованій витраті з пониженням частоти падає також і тиск, що створюється насосом (відповідно до його навантажувальної характеристикою), говорити про яку-небудь унікальною економії енергії буде вельми проблематично.

Близька до кубічної залежність потужності від частоти тільки для змінних витрат, зокрема, для граничних (коли тиск дорівнює 0) і пропорційних їм. Додаткова ступінь в цьому випадку з'являється саме тому, що зі зменшенням частоти точка граничної витрати на характеристиці зміщується до нуля, а пропорційно цьому зміщення зменшується і друга складова потужності, лінійно залежна згідно моделі від витрати. Якби виконувалося з великим запасом умова:

$$2W_n \approx W_{\max} \gg W_0, \quad (3.31)$$

першої складовою можна було б знехтувати і тільки тоді залежність споживаної потужності від частоти для граничної (або іншого, пропорційного йому) витрати стала б чистокубічною.

Простежимо сказане на конкретному прикладі:

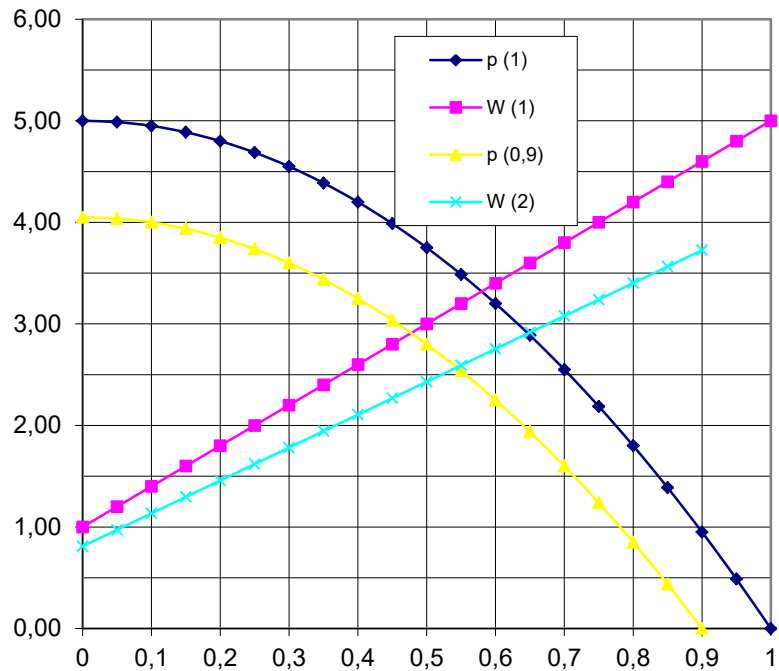


Рисунок 3.1 Криві залежності

Всі описані вище явища передбачаються математичними викладками, а кількісне відповідність експериментальних даних результатами обчислень підтверджують високу достовірність запропонованої моделі відцентрового насоса.

### висновок до розділу

Використання запропонованої моделі, яка відповідає паспортним даним насосів і узгоджена з результатами експериментальних досліджень агрегатів, дозволяє в кожному окремому випадку оптимізувати роботу насосних станцій водоканалів за критерієм мінімізації енергетичних витрат.

## РОЗДІЛ 4

### АНАЛІЗ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАСТОСУВАННЯ ЧАСТОТНО-РЕГУЛЮЮЧИХ ПРИВОДІВ

#### 4.1 Визначення вихідних даних

Як об'єкт модернізації розглядаються дві каналізаційні насосні станції КНС 1 і КНС 2.

В даний час на всіх агрегатах цих КНС застосовується нерегульований асинхронний електропривід з прямим пуском електродвигуна. Пуск насосів проводиться при досягненні певного верхнього рівня рідини в накопичувальній ємності. Після зниження рівня до нижнього заданого значення двигун відключається. Прямий пуск неминуче призводить до значних перевантажень як механічних елементів приводу, так і електричних з'єднань кабелів через великі пускових моментів і струмів. Неминучі також і гідроудари, що виникають при спрацьовуванні клапанів гідросистеми.

Основні параметри КНС 1 представлені в таблиці 4.1.:

Таблиця 4.1

##### Параметри гідронасосів

№	Параметри	Значення
1	Тип насоса	ФГ 450/22,5
2	Продуктивність насоса при тиску 22,5 м в/с	450 м <sup>3</sup> /год
3	Потужність двигуна	45 кВт
4	Частота обертання (синхронна)	1000 об./хв
5	Споживаний струм (В номінальному режимі)	70 А
6	Висота підйому від осі насоса	8 м
7	Довжина трубопроводу	300 м
8	Діаметр труби	400 мм

таблиця 4.2

##### Основні параметри КНС 2

№	Параметри	Значення	
1	Тип насоса	ФГ 450/22,5	ФГ 250/22,5

<b>2</b>	Продуктивність насоса при тиску 22,5 м в/с	450 м <sup>3</sup> /год	250 м <sup>3</sup> /год
<b>3</b>	Потужність двигуна	75 кВт	37 кВт
<b>4</b>	Частота обертання (синхронна)	1000 об./хв	1000 об./хв
<b>5</b>	Споживаний струм (В номінальному режимі)	90-100 А	50 А
<b>6</b>	Висота підйому від осі насоса	13 м	
<b>7</b>	Довжина трубопроводу	1300 м	
<b>8</b>	Діаметр труби	400-500 мм	

таблиця 4.3

Даний погодинний графік завантаження насосних станцій протягом доби для обох зазначених КНС:

Період доби	00:00	02:00	06:00	10:00	18:00
	02:00	06:00	10:00	18:00	24:00
<i>КНС 1</i>					
Погодинні втрати, м <sup>3</sup> /год	150	50-80	200	150	200
<i>КНС 2</i>					
Погодинні втрати, м <sup>3</sup> /год	200	90-100	300-350	200	325

Насоси є механізмами з режимом тривалого навантаження з великим числом годин роботи в році.

Аналіз існуючого режиму роботи КНС показує, що в даний час насоси використовуються неефективно, так як застосовуються в частині характеристик, що мають низький ККД з великим перевитратою потужності. Насосні агрегати, розраховані на роботу в екстремальних ситуаціях, в дійсності використовуються в середньому близько 8,5 годин на добу - на КНС 1 і 12,5 годин на добу - на КНС 2. Робота на повну потужність, тобто з максимальною продуктивністю насоса,



призводить до додаткових втрат енергії в трубопроводі через надмірну швидкості потоку в трубі. При зменшенні витрати за рахунок зниження швидкості електродвигуна можливо ефективно зниження споживаної потужності. Це означає, що для роботи агрегату з найбільшим ККД з приводом від наявного асинхронного електродвигуна, необхідно застосувати частотно-регульований привід.

При поліпшенні енергетичних характеристик також змінюються і експлуатаційні показники: збільшується міжремонтний цикл завдяки зниженню механічних навантажень і пом'якшення пускових режимів, легко вибирається необхідний технологічний режим і забезпечується паралельна робота насосів.

#### 4.2. Основні залежності, характеризують енергетику агрегатів

Потужність, споживана насосом:

$$P = (Q \cdot H) / \text{ККД}, \quad (4.1)$$

где Q – продуктивність, м<sup>3</sup>/час,

H – напор, створюваний насосом, м в/с,

ККД – коефіцієнт корисної дії установки.

Зміна основних параметрів роботи агрегату при зміні швидкості обертання робочого вала насоса («формули подібності»):

$$P_1 / P_2 = n_1^3 / n_2^3$$

$$H_1 / H_2 = n_1^2 / n_2^2$$

$$Q_1 / Q_2 = n_1 / n_2,$$

где n – число обертів валу робочого колеса в хв,

P – потужність, споживана приводом, кВт,

H – напор, створюваний насосом, м в/с,

Q – продуктивність, м<sup>3</sup>/час.

Індекси 1 і 2 відносяться до першого і другого режимів роботи відповідного обладнання.

Для визначення потужності, споживаної приводним двигуном ( $P_d$ , Вт), при відомому його струмі, застосовується наступна формула:

$$P_d = 1,73 \cdot I_d \cdot U \cdot \cos \Phi$$

где  $I_d$  - струм фази двигуна, А;

$U$  - напруга живлення двигуна, В;

$\cos \Phi$  - коефіцієнт потужності двигуна.

#### **4.3. Розрахунок енергетичних характеристик приводу і економічного ефекту**

Напірні характеристики насосів (залежність тиску від величини витрати рідини) показані на рис.1 і рис.2. Характеристики наведені для кількох значень частоти обертання валу двигуна, починаючи з номінальної для даного типу насоса.

На цьому ж графіку зображена крива, яка характеризує гідродинамічний опір трубопроводу, що є нелінійною функцією швидкості потоку рідини. Параметри навантаження кривої розраховані з урахуванням довжини трубопроводу, перетину труб і величини перепаду висот для кожної КНС. Сталий режим роботи насоса визначається точкою перетину кривих напірної і навантажувальної кривих.

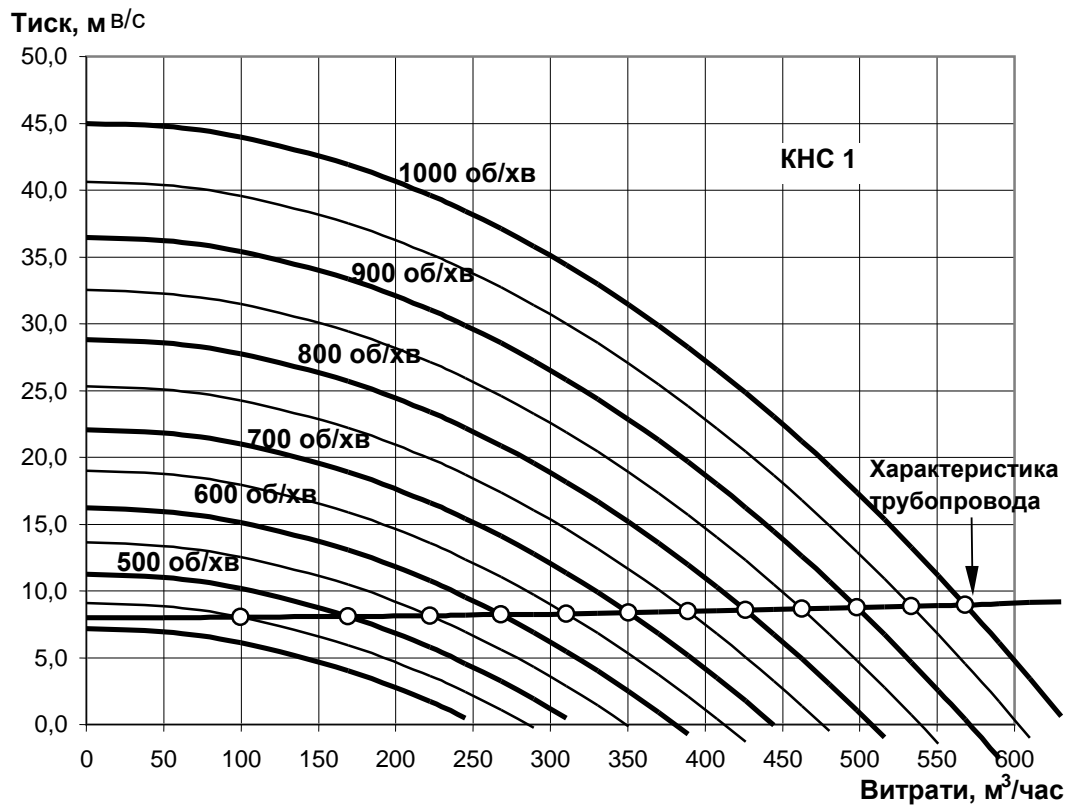


Рис.4.1. Напорні характеристики насоса при частотному регулюванні продуктивності (КНС 1)

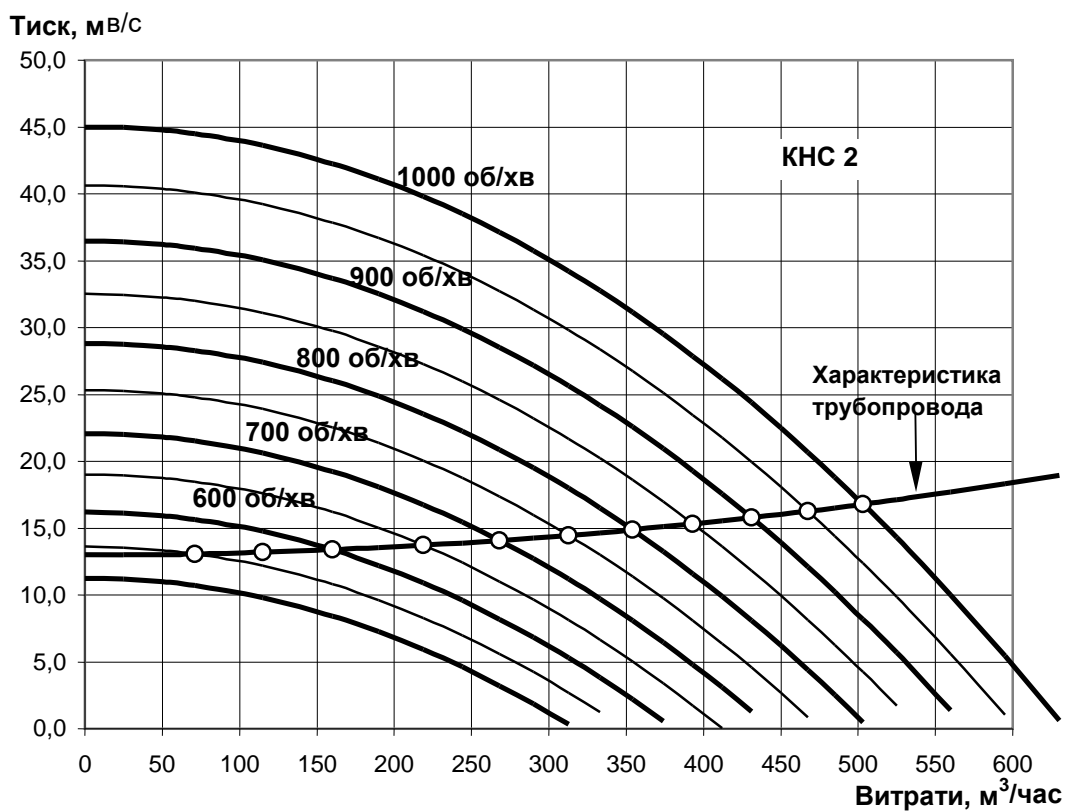


Рис.4.2. Напорні характеристики насоса при частотному регулюванні продуктивності

(КНС 2)

Теорія роботи насосів доводить, що зміна частоти обертання приводу змінює його напірні характеристики цілком певним чином, а саме: максимальна витрата рідини пропорційна частоті обертання агрегату, натиск, створюваний насосом, пропорційний квадрату цієї частоти, в результаті потужність, що віддається валом двигуна в навантаження, буде пропорційна третьому ступеню частоти обертання.

Сімейство кривих, що характеризують споживання електроенергії насосом при різній частоті обертання валу двигуна в залежності від обсягу рідини, показано на діаграмах рис.4.3. і рис.4.4.

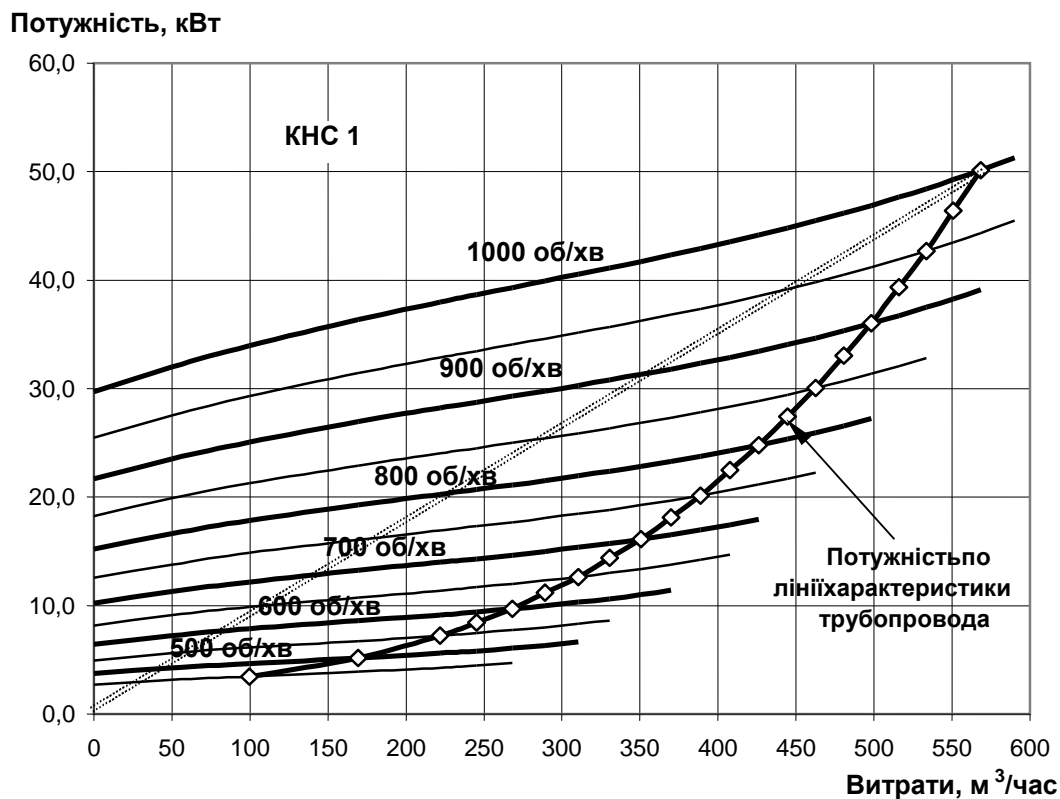


Рис.4.3. Залежність споживаної потужності від частоти обертання двигуна (КНС 1)

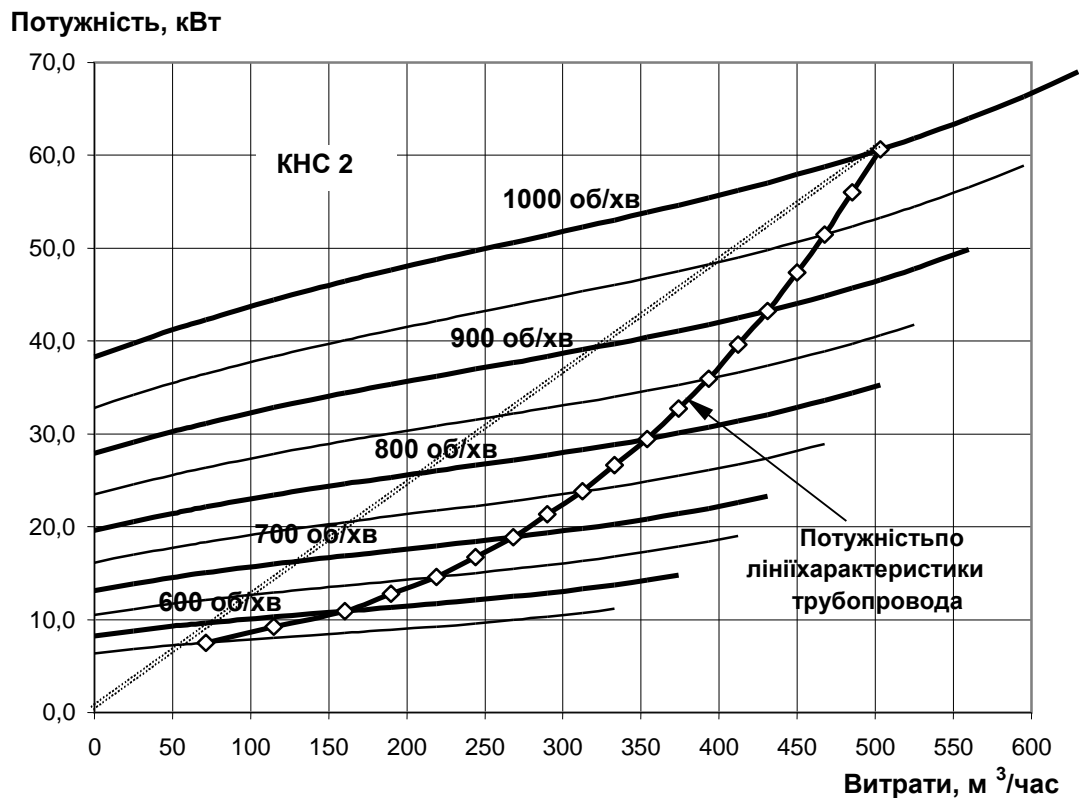


Рис.4.4. Залежність споживаної потужності від частоти обертання двигуна (КНС 2)

Точки, відмічені на сімействі кривих з різною частотою обертання, відповідні сталі витрати відповідно до навантажувальної характеристики трубопроводу, утворюють графік залежності споживаної потужності від продуктивності насоса при частотному регулюванні. Очевидно, що при зменшенні числа обертів зниження споживання електроенергії відбувається в більшій мірі, ніж зменшення витрати рідини. Пунктирна пряма, що характеризує прямо пропорційний зв'язок витрати і потужності, дозволяє оцінити ступінь економії електроенергії при знижених витратах ..

У таблицях 4.4 і 4.5 наведені результати обчислень основних параметрів насосів для різних частот обертання валу двигуна, і також дана здатність навантаження характеристика трубопроводу. Останній рядок у таблицях характеризує ступінь підвищення продуктивності насоса на одиницю витраченої

енергії при знижених швидкостях роботи, коли максимальна подача рідини не потрібна.

Таблиця 4.4.

КНС 1

Частота двигуна	об./хв	450	500	550	600	650	700	750	800	850	900	950	1000
Подача номінальна	м <sup>3</sup> /год	79	134	176	212	246	278	308	338	366	395	423	450
Подача при фактич. нагр.	м <sup>3</sup> /год	100	169	222	268	310	351	389	426	463	498	534	565
Макс. тиск насоса	м в/с	9,1	11,3	13,6	16,2	19,0	22,1	25,3	28,8	32,5	36,5	40,6	45
Тиск на вході в трубопровід	м в/с	8,0	8,1	8,1	8,2	8,3	8,4	8,5	8,5	8,6	8,7	8,9	9,0
споживана потужність	кВт	3,5	5,0	6,9	9,1	11,8	14,9	18,5	22,7	27,4	32,7	38,7	45,4
Продуктивність на одиницю потужності	м <sup>3</sup> /кВт*го д	22,5	26,6	25,5	23,3	20,9	18,7	16,6	14,9	13,4	12,1	10,9	9,9

## КНС 2

Частота двигуна	об./хв	450	500	550	600	650	700	750	800	850	900	950	1000
Подача номінальна	м <sup>3</sup> /год		-	64	143	196	240	280	317	352	385	418	450
Подача при фактич. нагр.	м <sup>3</sup> /год		-	71	160	219	268	313	354	393	431	468	502
Макс. тиск насоса	м в/с		11,3	13,6	16,2	19	22,1	25,3	28,8	32,5	36,5	40,6	45
Тиск на вході в трубопровід	м в/с		-	13,1	13,4	13,7	14,1	14,5	14,9	15,3	15,8	16,3	16,8
споживана потужність	кВт		-	7,5	10,9	14,6	18,9	23,8	29,5	35,9	43,3	51,5	61,0
Продуктивність на одиницю потужності	м <sup>3</sup> /кВт*год		0,0	8,5	13,1	13,4	12,7	11,7	10,7	9,8	8,9	8,1	7,4

Спосіб регулювання тиску шляхом зміни частоти обертання приводу насоса знижує енергоспоживання ще й з іншої причини. Власне, насос як пристрій перетворення енергії має свій коефіцієнт корисної дії - відношення механічної енергії, яка додається до валу, до гідродинамічної енергії, одержуваної на виході насоса.

Аналіз зміни частоти агрегату при зміні подачі рідини показує, що зі зменшенням подачі ККД вентилятора практично зберігається на максимальному рівні. Таким чином, зниження частоти обертання відповідно до технологічного навантаження дозволяє не тільки економити споживану енергію на виключення втрат, а й отримати економічний ефект за рахунок підвищення коефіцієнта корисної дії самого насоса.

Для оцінки економічного ефекту від впровадження частотного управління продуктивністю насоса використані дані по реальному завантаженні КНС протягом доби. При частотному регулюванні насосні агрегати переводяться в режим безперервної роботи зі зниженою швидкістю перекачування рідини, що

залежить від фактично необхідної в даний час доби продуктивності. Результати обчислень зведені в таблиці 4.6 і 4.7 для кожної КНС. Енергетичні характеристики розраховані на підставі результатів, отриманих в попередньому розділі.

Аналіз представлених результатів підтверджує доцільність застосування частотного регулювання приводів насосів на обох КНС. Модернізація дозволяє заощадити на добу 184,3 кВт \* год електроенергії на КНС 1 (61% від нинішнього споживання) і 265,5 кВт \* год на КНС 2 (38,8% від нинішнього споживання). Середня річна економія електроенергії складе 67`280 кВт \* год і 96`915 кВт \* год відповідно.

Більший відносний ефект на КНС 1 спостерігається внаслідок меншого завантаження даної станції (менше перепад висот, коротше трубопровід) при ідентичних насосних агрегатах, що цілком узгоджується з теоретичними викладками.

Конкретний період окупності впровадження даного обладнання може бути визначений на підставі зіставлення витрат на придбання і монтаж обладнання та вартості зекономленої електроенергії з урахуванням цін, встановлених на електроенергію в даний період. Як правило, цей період становить близько 1 року.

Для модернізації устаткування рекомендується застосування частотних перетворювачів одного з провідних підприємств-виробників компонентів для регульованих приводів - німецької фірми "Karl E. Brinkmann GmbH" (КЕВ), яка має багаторічний досвід в даній області і успішно використовує його при розробці і виготовленні продукції, що відрізняється високою надійністю і прийнятною ціною.



## **висновок до розділу**

Практика застосування частотних перетворювачів для управління насосами доводить доцільність не просто включення перетворювача для управління агрегатом, а створення спеціалізованих систем управління технологічним процесом. Саме такий підхід дозволяє отримати економічний ефект не тільки від зниження споживаної з мережі електричної потужності, а й домогтися істотного зменшення експлуатаційних витрат, поліпшення умов праці та збільшення терміну служби обладнання. Сучасні перетворювачі частоти дозволяють контролювати більше 20 параметрів стану електроприводу. Відповідна обробка цих даних дозволяє проводити глибоке діагностування як обладнання системи, так і протікають процесів. З'являється можливість не тільки реагувати на виникнення несправностей, але і попереджати їх, що для подібних об'єктів дуже важливо.

Система "перетворювач частоти - асинхронний двигун" створює додаткові можливості, забезпечуючи:

- Програмований захист агрегату від перевантажень в робочих та аварійних режимах;
- Зменшення витратних матеріалів на виконання основного технологічного процесу;
- Підвищення надійності обладнання;
- Збільшення терміну служби основного технологічного обладнання.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Практика застосування частотних перетворювачів для управління насосами доводить доцільність не просто включення перетворювача для управління агрегатом, а створення спеціалізованих систем управління технологічним процесом. Саме такий підхід дозволяє отримати економічний ефект не тільки від зниження споживаної з мережі електричної потужності як виходячи з розрахунків модернізація дозволяє заощадити на добу 184,3 кВт \* год електроенергії на КНС 1 (61% від нинішнього споживання) і 265,5 кВт \* год на КНС 2 (38,8% від нинішнього споживання) середня річна економія електроенергії складе 67`280 кВт \* год і 96`915 кВт \* год відповідно, а й домогтися істотного зменшення експлуатаційних витрат, поліпшення умов праці та збільшення терміну служби обладнання. Сучасні перетворювачі частоти дозволяють контролювати більше 20 параметрів стану електроприводу. Відповідна обробка цих даних дозволяє проводити глибоке діагностування як обладнання системи, так і протікають процесів. З'являється можливість не тільки реагувати на виникнення несправностей, але і попереджати їх, що для подібних об'єктів дуже важливо.

Система "перетворювач частоти - асинхронний двигун" створює додаткові можливості, забезпечуючи:

- Програмований захист агрегату від перевантажень в робочих та аварійних режимах;
- Зменшення витратних матеріалів на виконання основного технологічного процесу;
- Підвищення надійності обладнання;
- Збільшення терміну служби основного технологічного обладнання.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Основні відомості по частотно-регульованому електроприводі [Електронний ресурс]-Режим доступу до ресурсу:<https://www.technowell.ru/info/articles/osnovnye-svedeniya-o-chastotno-reguliruemom-elektroprivode/>
2. Частотний перетворювач – ефективний спосіб економії [Електронний ресурс ]- Режим доступу до ресурсу:<http://www.technowell.ru/economy-electricity/>
3. "Регульований асинхронний електропривод: варіатори або перетворювачі частоти"? [Електронний ресурс ]- Режим доступу до ресурсу:<http://www.intechnics.ru/article16.htm>
4. Частотно регульований привід [Електронний ресурс ]- Режим доступу до ресурсу:<http://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/1190537>
5. Базові відомості по частотно-регульованому електроприводі [Електронний ресурс ]- режим доступу до ресурсу:<http://www.intechnics.ru/article16.htm>
6. Економія електроенергії за рахунок застосування ЧРП ERMAN [Електронний ресурс ]- Режим доступу до ресурсу:[https://kipra.info/publication/variant/?pagen\\_1=2](https://kipra.info/publication/variant/?pagen_1=2)
7. Частотно-регульований електропривод (ЧРП) [Електронний ресурс ]- режим доступу до ресурсу:<https://www.danfoss.com/uk-ua/about-danfoss/our-businesses/drives/what-is-a-variable-frequency-drive/>
8. Частотно-регульований привід [Електронний ресурс ]- Режим доступу до ресурсу:[http://www.softstarter.ru/invertors/princip\\_dejstviya/](http://www.softstarter.ru/invertors/princip_dejstviya/)
9. Застосування частотно-регульованого приводу як засіб підвищення економічної ефективності [Електронний ресурс ]- Режим доступу до ресурсу:<http://www.studopedia.org/8-22559.html>
10. Відцентрові насоси [Електронний ресурс ]- Режим доступу до ресурсу:[https://www.ukrinform.ua/rubric-other\\_news/2466469-vidi-i-osoblivosti-vidcentrovih-nasosiv.html](https://www.ukrinform.ua/rubric-other_news/2466469-vidi-i-osoblivosti-vidcentrovih-nasosiv.html)
11. Відцентровий насос [Електронний ресурс ]- Режим доступу до ресурсу:<https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A6%D0%B5%D0%BD%D1%82%D1%80%>

D0%BE%D0%B1%D0%B5%D0%B6%D0%BD%D1%8B%D0%B9\_%D0%BD%D0%B0%D1%81%D0%BE%D1%81

12. Відцентрові насоси. Пристрій, принцип дії та класифікація [Електронний ресурс] - Режим доступу до ресурсу: [http://www.agrovodcom.ru/info\\_zentrob\\_nasos.php](http://www.agrovodcom.ru/info_zentrob_nasos.php)

13. Принцип дії відцентрового насоса [Електронний ресурс] - Режим доступу до ресурсу: <http://udobnovdome.ru/princip-dejstviya-centrobezhnogo-nasosa/>

14. Ржебаева, Н.К. Расчет и конструирование центробежных насосов: учеб. пос. / Н.К. Ржебаева, Э.Е. Ржебаев. – Сумы: СумГУ, 2009. – 220 с.

15. ДСТУ 4132-2002. Насоси відцентрові загальнопромислового застосування. Вимоги до проектування, виготовлення, постачання, монтажування та експлуатування. Звід правил. - К., Вид-во стандартів, 2002.

16. ИСО 2858-75. Насосы центробежные с осевым входом (номинальное давление 16 бар). Обозначение, номинальные параметры и размеры. - М., Изд-во стандартов, 1975.

17. Центробіжні насоси загального призначення типів К і КМ для води. - [Електронний ресурс] - Режим доступу до ресурсу: [http://www.shevchenkove.org.ua/person\\_syte/Lusak/ГІДРОПРИВОД/Dokument/Lekzia/Лекція%20№3.htm](http://www.shevchenkove.org.ua/person_syte/Lusak/ГІДРОПРИВОД/Dokument/Lekzia/Лекція%20№3.htm)