

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА

НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ, ІНФОРМАЦІЙНОЇ  
ТА ТРАНСПОРТНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

КАФЕДРА ЕЛЕКТРИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

**АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ З ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ДЛЯ НАСОСНОГО  
ОБЛАДНАННЯ НАФТОПЕРЕКАЧУВАЛЬНИХ СТАНЦІЙ**

**Бакалаврська кваліфікаційна робота**

**Здобувач:**

Денис КОНСТАНТИНОВ

гр. АЕК 2022-1

**Керівник:**

Микола Хворост

проф. д.т.н.

Харків – 2026

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА  
імені О. М. Бекетова

Навчально-науковий інститут енергетичної, інформаційної та транспортної інфраструктури  
Кафедра електричного транспорту  
Освітньо-кваліфікаційний рівень бакалавр  
Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка  
Освітня програма Електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ЕТ

 Микола ХВОРОСТ  
2026 р.

**ЗАВДАННЯ**  
**до бакалаврської кваліфікаційної роботи**  
Константинов Денис Юрійович  
прізвище, ім'я, по батькові

1. Тема роботи: Автоматизовані системи з електроприводом для насосного обладнання нафтоперекачувальних станцій

керівник бакалаврської  
кваліфікаційної роботи .....Хворост Микола Васильович, проф..., д.т.н.

( прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затвержені наказом університету від 22.05.2026 №440-03

2. Строк подання студентом бакалаврської кваліфікаційної роботи 15.06.2026.

3. Вихідні дані до бакалаврської роботи Матеріали переддипломної практики, статистичні дані щодо надійності та відмов транспортних засобів, літературні джерела з експлуатації, обслуговування та ремонту обладнання.

**4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)**

**4.1. Стан питання (огляд, аналіз, оцінка)**

- Магістральний нафтопровід. Характеристики та призначення.  
- Аналіз існуючих типів відцентрових насосів та їх характеристик.  
- Способи та методи вирішення проблем енергозбереження на насосних станціях транспортування нафти

- Склад проміжної нафтотранспортуючої станції.

- Технологічна схема та обладнання проміжної нафтотранспортуючої станції.

- Основні суміщені характеристика нафтопроводу та насоса при різних методах регулювання.

- Метод дроселювання.

- Структура та принцип роботи перетворювачів частоти.

**4.2. Розробка технічного завдання (вибір параметрів, розробка конструкції, структурної та електричної принципової схем, створення алгоритмів роботи тощо, розрахунок вузлів, метод розрахунку, алгоритм управління, програмне забезпечення)**

- Технологічні вимоги до електроприводу насосів НПС.

- Вибір системи електроприводу нафтоперекачувальної станції.

- Вибір та опис перетворювача частоти.

**4.3 Розрахункова частина (розрахунок вузлів, метод розрахунку, алгоритм управління, програмне забезпечення)**

- Структурна схема системи ПЧ-АД-ЦБН 63.

- Розрахунок та побудова кривих перехідних процесів у розімкнутій системі електроприводу.

**4.4. Охорона праці.**

- Загальні питання.

- Заходи щодо забезпечення безпечних умов праці.

- Заходи з техніки безпеки.

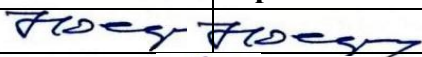





- Заходи з промислової санітарії.

- Пожежна безпека у залі електродвигунів НПС.
- Розрахунок освітленості у залі електродвигунів.

## 5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових слайдів)

1. Титульний.
2. Перелік графічного матеріалу.
3. Мета, задачі, актуальність роботи.
4. Процес перекачування нафти.
5. Насос перекачки нафти.
6. Засоби управління потоком нафти.
7. Електродвигун.
8. Високовольтний перетворювач частоти.
9. Функціональна схема силового осередку ПЧ.
10. Схема підключення електродвигунів НПС.
11. Моделювання.
12. Висновки.

## 6. Консультанти розділів бакалаврської кваліфікаційної роботи


Розділ	Ім'я Прізвище та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання бачив	завдання прийнявши
Основна частина	Микола ХВОРОСТ		
Антиплагіат	Вікторія ЛЕВЧЕНКО, інж.		
Нормоконтроль	В'ячеслав ШАВКУН, доц.		

7. Дата видачі завдання 16.05.2026 нар.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

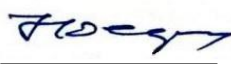
/п	Назва етапів бакалаврської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Стан питання	23.05 – 29.05.2026	
2	Розробка технічного завдання	30.05 – 05.06.2026	
3	Розрахункова частина	06.06 – 12.06.2026	
4	Охорона праці	06.06 – 12.06.2026	
5	Оформлення паперового та електронного варіантів роботи	06.06 – 12.06.2026	
6	Підготовка доповіді та презентації	12.06 – 20.06.2026	

Здобувач

  
 \_\_\_\_\_  
 (підпис)

**Денис КОНСТАНТИНОВ**  
 (прізвище та ініціалі)

Керівник бакалаврської кваліфікаційної роботи

  
 \_\_\_\_\_  
 (підпис)

**Микола ХВОРОСТ**  
 (прізвище та ініціалі)

## Анотація

Випускна кваліфікаційна робота 83 аркуші, 32 малюнки, 9 джерел.

Ключові слова: насос перекачки нафти, частотно-регульований, електропривод, асинхронний двигун, перетворювач частоти.

В рамках бакалаврської роботи було розроблено систему автоматизованого електроприводу насосних агрегатів, призначену для перекачування нафти. Виходячи з особливостей технологічного процесу, був зроблений підбір основного технологічного та силового електрообладнання, необхідного для нафтоперекачувальної станції. Проведено розрахунки електричних навантажень та струмів короткого замикання, а також виконано вибір асинхронного електродвигуна моделі 4АЗМП-8000/10000, перетворювача частоти та комутаційної апаратури. Додатково розроблено комплекс заходів щодо охорони праці та техніки безпеки, який передбачає безпечне обслуговування встановленого обладнання.

## Зміст

<b>ВСТУП</b> .....	7
<b>1 ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС</b> .....	9
1.1 Магістральний нафтопровід. Характеристики та призначення .....	9
1.2 Загальна технологічна схема процесу транспортування нафти магістральним нафтопроводом .....	12
1.3 Існуючі типи відцентрових насосів та їх основні характеристики .....	17
1.3.1 Аналіз існуючих типів відцентрових насосів та їх характеристик. ....	19
1.4 Способи та методи вирішення проблем енергозбереження на насосних станціях транспортування нафти.....	24
1.4.1 Аналіз можливих засобів управління потоком нафти на НПС. ....	24
1.4.2 Управління подачею насоса методом зміни швидкості.....	27
1.5 Склад проміжної нафтотранспортуючої станції.....	28
1.6 Технологічна схема та обладнання проміжної нафтотранспортуючої станції...	30
1.7 Основні суміщені характеристика нафтопроводу та насоса при різних методах регулювання.....	34
1.7.1 Метод дроселювання .....	34
1.8 Структура та принцип роботи перетворювачів частоти .....	37
1.9 Висновки по розділу: .....	44
<b>2 РОЗРОБКА СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ НАСОСНИХ АГРЕГАТІВ І ВИБІР ЧАСТОТНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА</b> .....	45
2.1 Технологічні вимоги до електроприводу насосів НПС .....	45
2.2 Вибір системи електроприводу нафтоперекачувальної станції .....	45
2.3 Вибір та опис перетворювача частоти .....	55
<b>3 РОЗРАХУНОК ТА АНАЛІЗ ДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ РОЗІМКНУТОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ</b> .....	63

3.1 Структурна схема системи ПЧ-АД-ЦБН .....	63
3.2 Розрахунок та побудова кривих перехідних процесів у розімкнутій системі електроприводу.....	66
<b>4 ОХОРОНА ПРАЦІ .....</b>	<b>69</b>
4.1 Загальні питання.....	69
4.2 Заходи щодо забезпечення безпечних умов праці.....	73
4.2.2 Заходи з техніки безпеки.....	73
4.2.3 Заходи з промислової санітарії.....	75
4.2.4 Пожежна безпека у залі електродвигунів НПС .....	77
4.3 Розрахунок освітленості у залі електродвигунів .....	79
<b>ВИСНОВКИ.....</b>	<b>81</b>
<b>ПЕРЕЛІК ЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ .....</b>	<b>83</b>

## ВСТУП

Від видобутку нафти з використанням дерев'яних ланцюгів, відкритих фонтанів, дерев'яних вишок та ударного буріння вітчизняна нафтова промисловість за післяреволюційні роки зробила колосальний ривок, досягнувши рівня сучасного видобутку понад півмільярда тонн нафти на рік. Індустрія активно впроваджує обчислювальну техніку на нафтовидобувних підприємствах, створює складні технічні споруди та удосконалює технологічні процеси.

З початку 1950-х років обсяги видобутку нафти нашій країні різко зросли. За останні роки широке застосування отримали потужні частотно-регульовані електроприводи (ЧРП), що довели свою ефективність як автоматизації, так і в енергозбереженні. Особливо результативне їх використання в електричних приводах відцентрових насосів, навантаження яких прямо пропорційне квадрату частоти обертання. При зниженні продуктивності нижче за номінальний рівень споживання енергії значно скорочується.

Першим успішним прикладом розробки та впровадження спеціалізованого ЧРП для насосів став проект акціонерного товариства, орієнтований на перекачування нафти. Якщо раніше основною перевагою впровадження таких систем вважалася економія енергії, то вони демонструють значний потенціал ресурсозбереження. Це проявляється у зменшенні витоків, зниженні навантаження на елементи обладнання, виключенні гідравлічних ударів та кавітації в системі. Всі ці покращення сприяють зниженню зношування насосів завдяки більш точному регулюванню технологічних процесів. Підвищення обсягів видобутку нафти та газу, успішне вирішення виробничих та економічних завдань безпосередньо залежить від рівня розвитку електроенергетики в галузі. Це включає вдосконалення технологічних комплексів, впровадження передових електричних приводів та обладнання, а також забезпечення безпечної роботи схем електричної мережі як усередині промислових об'єктів, так і на зовнішніх електропостачальних системах.

Електрифікація нафтової та газової галузі країни базується на використанні електроприводів змінного струму, серед яких асинхронні двигуни займають особливе місце. Вони характеризуються добрими енергетичними показниками: високою ефективністю, можливістю регулювання реактивної потужності, меншою залежністю максимального моменту двигуна від напруги мережі та постійною частотою обертання. Ці двигуни широко застосовуються для турбомеханізмів великої та середньої потужності.

Сьогодні у транспортуванні нафти трубопроводами пред'являються підвищені вимоги до надійності процесу, зниження екологічного впливу, зменшення енерговитрат та підвищення економічної ефективності. Актуальні завдання вимагають застосування сучасних технічних рішень, включаючи системи автоматики з урахуванням мікропроцесорної техніки. Інтеграція мікроконтролерів та передових технологій дозволяє значно покращити показники транспортування нафти магістральними трубопроводами, підвищуючи їх якість та обсяги.

У рамках кваліфікаційної роботи було вирішено такі завдання:

1. На основі аналізу процесу транспортування нафти було обрано основний технологічний та силовий, електрообладнання для роботи нафтотранспортних станцій.
2. Виконано розрахунок електричних навантажень та струмів короткого замикання, проведено вибір комутаційного обладнання.
3. Створено автоматизований електропривод для насосних агрегатів, що дозволить підвищити ефективність процесів перекачування нафти.

# 1 ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС

## 1.1 Магістральний нафтопровід. Характеристики та призначення

На ділянці, яка розглядається, процеси перекачування нафти виконували за застарілими традиційними технологіями, включаючи регулювання тиску на виході насосної станції за допомогою керуючих пристроїв та використання насосного обладнання з різними діаметрами робочих коліс. Однак підтримання стабільного робочого тиску на виході станції призводило до виникнення додаткових технічних проблем, включаючи необхідність забезпечення герметичності та справного стану торцевих ущільнень насосів. Це пов'язано з тим, що у внутрішній порожнині корпусу насоса та ділянці напірного трубопроводу між насосом та балансиром тиску постійно фіксувався максимальний робочий тиск на рівні 2,8 МПа.

Робота обладнання в подібних умовах супроводжувалася підвищеними рівнями шуму та вібрації, що негативно позначалося на загальну безпеку експлуатації. В результаті прискорювалося зношування ключових вузлів насосів та електричних приводів, що скорочувало терміни міжремонтного циклу. Це зумовило необхідність модернізації насосної станції на основі сучасних технічних досягнень, включаючи впровадження систем плавного регулювання частоти обертання електроприводів підвищення ефективності режимів перекачування і запуску.

Перекачують трубопроводи складні інженерні споруди, розраховані на тривалу експлуатацію. Основне їхнє призначення — транспортування нафтопродуктів від місць видобутку та забору (початкової точки) до кінцевого пункту споживання на значні відстані. Магістральні трубопроводи включають кілька ключових елементів: нафтоперекачувальні станції (НПС), резервуари для зберігання, лінійні ділянки трубопроводів з відводами і лупінгами, запірною арматурою, переходами через перешкоди і вузлами підключення станцій, а також лінії електропередач, електрохімічні захисні установки (ЕЗУ), протихімічні захисні установки (ПЗУ). Додатково вздовж трас трубопроводів

розміщуються дороги, вертолітні майданчики, під'їзди, сигнальні знаки та розпізнавальні маркери.

Нафтоперекачують станції магістральних трубопроводів класифікуються як головні та проміжні. Головні НПС розташовуються поблизу місць видобутку нафти чи нафтопереробних заводів і є прийому нафтопродуктів та його подальшої перекачування. Ці станції вважаються найважливішими елементами системи магістрального трубопроводу — від їхнього функціонування залежить ефективність роботи системи. Серед технологічних завдань головних станцій, що виконуються, — прийом нафти та облік обсягів, короточасне зберігання в резервуарах, запуск у трубопровід, а також передача обмежувальних, очисних або вимірювальних пристроїв. Крім того, на станціях здійснюється внутрішнє перекачування між резервуарами або при їх зачистці, а також можливе підкачування нафти з інших джерел.

Проміжні НПС призначені для збільшення тиску всередині трубопроводу та розміщуються у місцях, визначених гідравлічними розрахунками. Вони включають схожі об'єкти з головними станціями, проте обсяги їх резервуарів значно нижчі або зовсім відсутні — це залежить від схеми роботи системи. Перекачувальні станції магістральних трубопроводів - енергоємні об'єкти, на які припадає до 25-30% експлуатаційних витрат за рік. У разі відсутності регульованих систем керування частотою обертання насосів експлуатація таких об'єктів пов'язана з необхідністю постійного налаштування режимів роботи шляхом перемикавання варіантів функціонування насосів.

Ілюстрація нижче (Рисунок 1) представляє план-схему насосної станції. На схемі позначено:

- 1 – електричний двигун;
- 2 – насос;
- 3 – брандмауер;
- 4 – вал для з'єднання двигуна та насоса;
- 5 – двері приміщення.

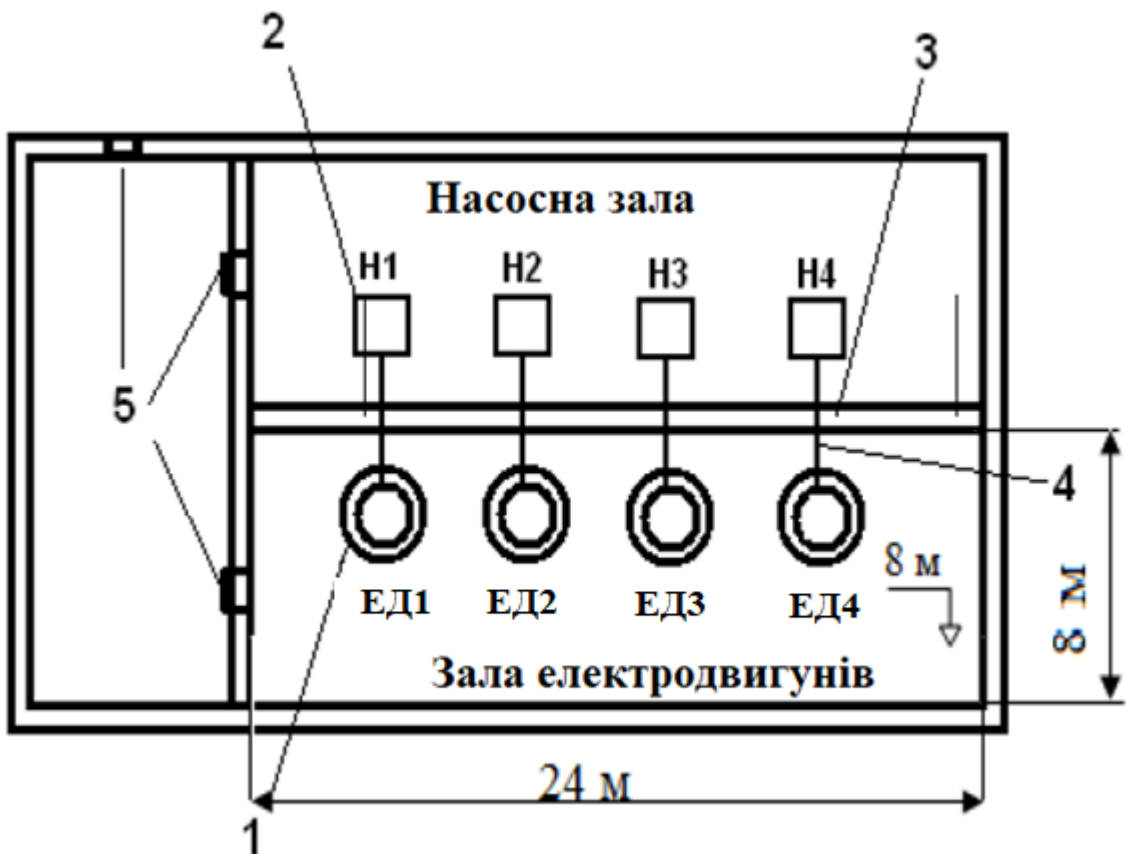


Рисунок 1 - План-схема насосної станції

Режим роботи нафтопроводу визначається подачею і тиском насосів на станціях, що перекачують, в заданий момент часу. Ці параметри залежать від матеріального та енергетичного балансу, що забезпечується передавальними станціями та трубопроводом. Порушення балансу призводить до зміни режиму роботи, що потребує додаткових коригувань.

Трубопроводи по конструкції їхньої лінійної частини можна поділити на такі типи:

- Магістральні;
- Однониткові прості: мають однаковий діаметр труб по всій трасі від початкової станції до кінцевої газорозподільної станції (ГРС);
- Телескопічні : відрізняються змінним діаметром труб на різних ділянках траси;
- Багатониткові: включають кілька паралельних ниток – основну та додаткові;

- Кільцеві: прокладаються навколо великих міст для підвищення надійності постачання газом або нафтопродуктами, а також для рівномірного розподілу подачі.

Магістральні трубопроводи служать для транспортування нафти, нафтопродуктів, природного чи штучного газу (у газоподібному чи зрідженому стані), води від місць видобутку, переробки чи забору (початкової точки) до місць споживання (кінцевої точки). Залежно від типу продукту, що транспортується, трубопроводи отримують відповідну назву: газопровід, нафтопровід, нафтопродуктопровід, водопровід і так далі. Початкова і кінцева точки зазвичай розташовуються поруч із основними джерелами видобутку чи переробки продукту, і навіть споживачами.

Нафтопровід – це трубопровід, призначений для транспортування як сирої нафти, і різних нафтопродуктів. Залежно від типу продукту передача може здійснюватися через бензиновий, гасопровід, мазутопровід та інші спеціалізовані лінії.

За призначенням нафтопроводи поділяються на три групи:

1. Внутрішні: з'єднують об'єкти всередині нафтових родовищ, переробних заводів або нафтобаз;

2. Місцеві: мають більшу довжину (до кількох десятків кілометрів) і пов'язують родовища або переробні підприємства з магістральними станціями або пунктами наливу нафти – наприклад, на залізниці або танкери.

3. Магістральні: характеризуються великою довжиною (до 1000 кілометрів та більше). Перекачування продукту здійснюється за допомогою однієї або кількох насосних станцій, встановлених вздовж траси. Працюють вони безперервно, а можливі зупинки відбуваються лише за ремонту чи форс-мажорних обставин.

## 1.2 Загальна технологічна схема процесу транспортування нафти магістральним нафтопроводом

Магістральний нафтопровід (МН) є складною гідравлічною системою, що включає трубопровід великого діаметра і розташовані по його трасі

нафтоперекачувальні (насосні) станції. Роботу нафтопроводу побудовано на принципі "від насоса до насоса". Технологічний процес перекачування нафти через магістральний нафтопровід полягає у послідовному транспортуванні сировини з використанням обладнання резервуарних парків (РП), нафтотранспортних станцій (НТС), лінійних ділянок (ЛД), а також систем, що перетворюють електричну енергію на механічний рух нафти. Кінцевим результатом цього процесу є доставка нафти із заданими якісними показниками до кінцевого пункту призначення за певний часовий проміжок.

Повний технологічний цикл транспортування нафти поділяється на кілька етапів: прийом та тимчасове зберігання партії нафти в РП, формування нової порції та її подання в нафтопровід, транспортування нафти та контроль меж поділу партій сировини з різними характеристиками.

Магістральний нафтопровід оснащений системою автоматизації, яка поєднує всі елементи технологічного процесу та забезпечує централізований контроль за їх роботою. Серед ключових об'єктів системи автоматизації можна виділити: головну нафтоперекачуючу станцію (ГНПС), проміжні нафтотранспортні станції (НПС), магістральні насосні станції (МНС), магістральні насосні апарати (МНА), підпірні насосні станції (ПНС) та відповідні насосні апарати (ВНА) нафти (УУН), пристрої запуску та прийому очисних скребків (УППС), системи регулювання тиску (СРТ) та енергопостачання (ЕП), системи катодного захисту (СКЗ), а також контрольовані пункти лінійних ділянок (КП).

Загальна схема роботи магістрального нафтопроводу включає множини ключових етапів. На вході нафта спочатку проходить через фільтри (Ф), які затримують механічні домішки, після чого потік перенаправляється через розподільники (Р) резервуарні парки або підпірні станції за допомогою заслінок. Резервуарні парки можуть працювати у кількох режимах:

1. Транзитний режим – нафта надходить безпосередньо без використання резервуарів;

2. Режим із підключенням ємності – резервуар або їхня група підключається паралельно основному потоку нафти;

3. Режим через ємність – нафта закачується в резервуар і потім звідти перекачується в трубопровід:

4. Комбінований режим – одночасно здійснюється закачування в один резервуар та відкачування з іншого.

На виході з РП тиск зазвичай недостатній для ефективної роботи магістральних насосних апаратів (МНА), оскільки при вхідному тиску нижче 5 атм існує ризик кавітації, яка може пошкодити насоси протягом 10–30 секунд. Тому перед подачею на МНА нафту проходить через підпірні насосні станції (ПНС).

Продуктивність одного МНА може досягати 10000 м<sup>3</sup>/год, а тиск, що створюється, – до 20 атм. Однак, використання кількох насосних апаратів одночасно на одній НПС може призвести до надмірного зростання тиску, що загрожує руйнуванням трубопроводу. Щоб уникнути цього, передбачено пристрій для зниження надлишкового тиску – дроселююча заслінка (ДЗ), що є диском, встановленим усередині труби.

Для роботи всіх систем магістральних нафтопроводів використовується електрична енергія. На схемі (Рисунок 2) основні компоненти процесу позначені наступним чином: Ф – фільтри, Р – розподільники, РП – резервуарні парки, НПС – нафтотранспортні перекачувальні станції, ГНПС – головні нафтотранспортні перекачувальні станції, ПНС – підпірні насосні станції, МНА – магістральні насосні апарати, ДЗ ділянки. Основний напрямок потоків нафти показано подвійними стрілками, що відбиває їх безперервність та послідовність у транспортуванні.

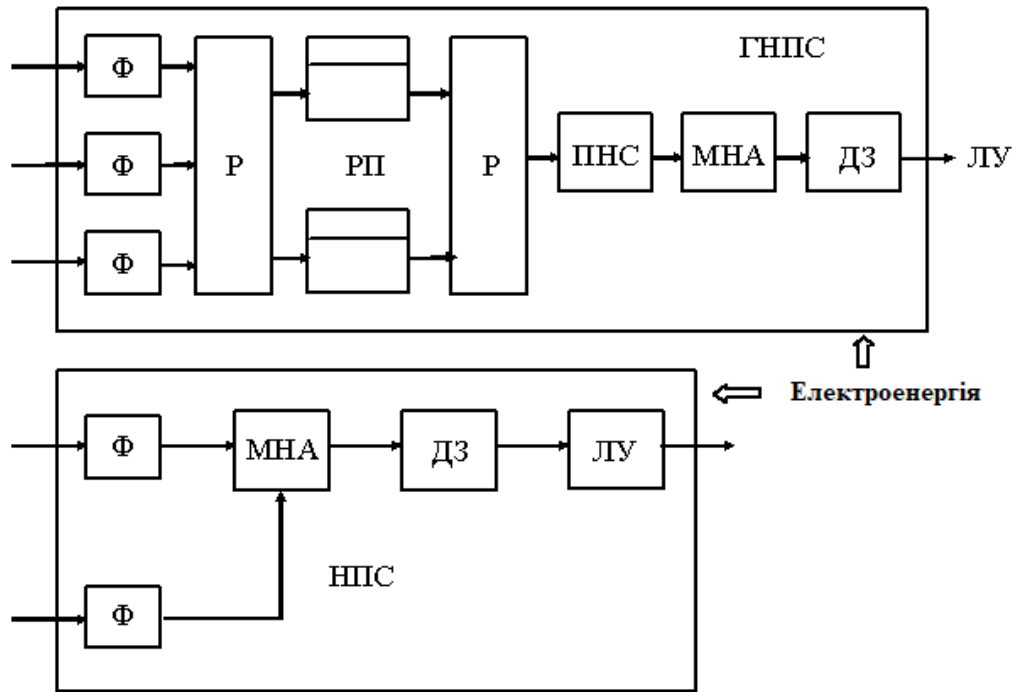


Рисунок 2 - Загальна схема процесу перекачування нафти

Після дроселюючого затвора потік нафти прямує на лінійну частину ділянки (ЛП), яка складається з довгої труби, довжиною до 200 км і діаметром від 150 до 1200 мм. На цій ділянці розміщені січучі засувки, а також передбачені лупінги - додаткові труби, прокладені паралельно основній для підвищення надійності в зонах з підвищеним ризиком аварій. За допомогою цих засувок можна змінювати конфігурацію ЛП, а також перекривати та ізолювати окремі ділянки, наприклад, для запуску чи пропуску очисного скребка.

На Рисунок 3 наведено одну з можливих схем послідовного перекачування нафти магістральним нафтопроводом (МН) із завершеним технологічним циклом.

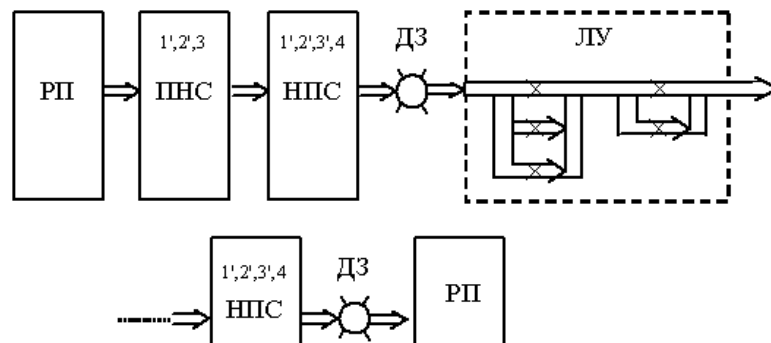


Рисунок 3 - Схема послідовного перекачування нафти МН

У цьому тексті представлено структуру та особливості функціонування системи управління магістральними нафтопроводами (МН). Описано, що склад підпірної насосної станції (ПНС) включає три насосні агрегати, а склад магістральної насосної станції (НПС) — чотири магістральні насосні агрегати.

Система автоматизації транспортування нафти будується з урахуванням технологічного процесу охоплює елементи загальностанційної автоматики, автоматики насосного устаткування, допоміжних систем та інших компонентів. Модель технологічного процесу транспортування нафти поділяється на кілька взаємозалежних, але незалежних моделей, узгоджених із завершеним технологічним циклом МН. Ці моделі об'єднуються завдяки обсягам поставки та перекачування партій нафти та включають три автономні складові: РП (резервуарний парк), НПС (магістральна насосна станція) та ЛП (лінійна ділянка). Зв'язок між ними забезпечується через рівняння балансу тиску.

МН як об'єкт управління є складною системою із змінною структурою і параметрами. Для її експлуатації зазвичай використовувалася багаторівнева система управління, що включає такі рівні:

1. Керування агрегатами та пристроями. Цей рівень охоплює системи контролю насосних агрегатів, заслінок, допоміжних систем, вузлів змішування нафти, вузлів обліку та інші елементи керування. Контролюючими змінними технологічного процесу транспортування є команди перемикання технологічного обладнання, налаштування регуляторів, показники якості нафти на виході з РП, витрата нафти, тиск у контрольних точках МН, натиск, створюваний НПС та ПНР.

2. Місцевий операторський пункт (МОП). На цьому рівні здійснюється контроль за процесами, що відбуваються в магістральній насосній станції (МНС), включаючи підпірну насосну станцію (ПНС), лінійну ділянку (ЛД), проміжні резервуари (Р), вузол контролю якості нафти (КС) та резерву.

3. Районний операторський пункт (РОП). Основні завдання цього рівня включають управління режимами перекачування нафти магістральним нафтопроводом із завершеним циклом технологій. Це включає підтримку

встановленого режиму роботи, перехід між режимами, запуск та зупинку трубопроводу, контроль руху партій нафти, запуск скребків, розрахунок обсягів нафти в резервуарному парку (РП), забезпечення балансу обсягів системи МН і координацію роботи всієї магістральної системи.

Для перших двох рівнів управління передбачено комплекс засобів та систем автоматизації, представлений у вигляді схеми на Рисунок 4. У цій схемі описані ключові елементи управління: 1 - автоматизація головної нафтоперекачувальної станції (ГНПС); 2 - системи автоматичного управління; 3 - загальностанційна автоматика; 4 - автоматика насосного обладнання (ПНА та МНА); 5 - автоматика допоміжних систем для забезпечення роботи обладнання; 6 - система лінійної телемеханіки та контрольованих пунктів (ЛУ, СКЗ); 7 - система автоматизації резервуарного парку, вузли обліку якості нафти та інші компоненти.

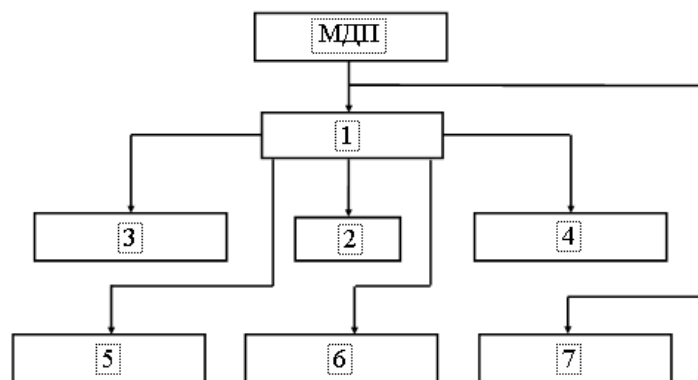


Рисунок 4 - Схема управління магістрального нафтопроводу

### 1.3 Існуючі типи відцентрових насосів та їх основні характеристики

Показники, що визначають роботу нафтоперекачувальних насосних станцій, включають: кількість встановлених насосних агрегатів, потужність, пропускну здатність і ступінь автоматизації. Ефективне керування основним обладнанням насосних дозволяє оперативно регулювати функціонування всього нафтопроводу, тому вибір, розподіл та експлуатація агрегатів транспортних станцій мають першорядне значення.

Тип основного насосного обладнання визначається в залежності від ряду критеріїв: максимально допустимого робочого тиску, який трубопровід може

надійно витримати, заданої пропускної спроможності та характеристик нафти, що транспортується. При виборі устаткування виходячи з техніко-економічних чинників враховуються такі аспекти:

– Подача одного насосного агрегату визначає кількість агрегатів на станції. Чим нижча продуктивність одного насоса, тим більше їх потрібно. Це збільшує коефіцієнт використання обладнання, знижує наслідки аварійних зупинок для загальної добової продуктивності станції, що особливо важливо для магістральних систем із послідовною роботою насосів. Однак збільшення кількості агрегатів вимагає більшої кількості обслуговуючого персоналу, ускладнює контроль та керування всією системою трубопроводу.

- Потужність одного насосного агрегату повинна відповідати показникам силових установок, що серійно випускаються.

- встановлення однотипних насосів на одній ділянці трубопроводу або, якщо можливо, на всій системі магістральних трубопроводів спрощує процес ремонту, обслуговування, взаємозамінності та управління. У більшості сучасних магістральних нафтопроводів використовуються відцентрові насоси як основне обладнання. Поршневі насоси найчастіше зустрічаються на застарілих об'єктах; їх іноді використовують для перекачування в'язких нафтопродуктів або допоміжних системах.

Для транспортування 65 млн тонн нафти при максимальному тиску 46 кгс/см<sup>2</sup> як основні агрегати застосовуються відцентрові насоси моделі НМ-7000-210. Їх технічні характеристики: продуктивність  $Q = 7000$  м / год, натиск  $H = 210$  м, кількість обертів  $n = 3000$  об / хв.

Кількість необхідних насосних агрегатів для забезпечення заданого обсягу перекачування розраховується відповідною формулою:

$$n = \frac{V_Q}{24 \cdot Q} \quad (1.1)$$

де  $V_Q = 650000000 : 365 = 179082$  т.

$$n = \frac{179082}{24 \cdot 7000} =$$

Для забезпечення безперебійного функціонування системи запропоновано використовувати два робочі насосні апарати. Крім того, з метою створення технологічного резерву рекомендується передбачити встановлення двох додаткових резервних насосних апаратів: один з них повинен перебувати в режимі автоматичного введення резерву (АВР), а інший проходити технічне обслуговування або ремонт.

З урахуванням критерію відповідності технологічним вимогам до конструкцій магістральних трубопроводів, поршневі насоси мають ряд істотних недоліків, які обмежують їх застосування. До основних недоліків ставляться:

- низька продуктивність, що зазвичай не перевищує 50-60 л/с;
- висока складність та значна вартість насосних установок;
- неможливість здійснення плавного регулювання подачі;
- Суттєві пульсації тиску в нагнітальному трубопроводі, що виникають внаслідок нерівномірності подачі;
- підвищені вимоги до ступеня очищення нафтопродуктів, що перекачуються, від механічних домішок;
- складності в автоматизації та телемеханізації насосних установок, що, у свою чергу, призводить до труднощів у централізованому управлінні трубопроводами, обладнаними даною технікою.

Таким чином, незважаючи на певні переваги, поршневі насоси виявляються менш придатними для застосування в магістральних трубопроводах через перераховані вище обмеження.

### 1.3.1 Аналіз існуючих типів відцентрових насосів та їх характеристик.

Незважаючи на певні недоліки, такі як низький коефіцієнт корисної дії при перекачуванні високов'язких нафтопродуктів, необхідність забезпечення постійного підпору рідини, обмежена ефективність у вузькому діапазоні подачі та інших факторів, відцентрові насоси практично повністю витіснили поршневі аналоги. Це переважне положення обумовлено суттєвими перевагами відцентрових насосів у порівнянні з поршневими, особливо в умовах

збільшення вантажопотоків через магістральні трубопроводи. Серед ключових переваг можна виділити такі:

- висока продуктивність при забезпеченні достатнього напору з використанням простої конструкції, компактної та порівняно недорогої насосної установки;
- Значний коефіцієнт корисної дії, який збільшується зі зростанням продуктивності насоса;
- можливість плавного регулювання подачі відповідно до змін гідравлічних характеристик трубопровідної системи;
- пряме з'єднання валу насоса з валом двигуна без необхідності застосування знижувальних редукторів;
- щодо низькі вимоги до чистоти перекачуваних нафтопродуктів щодо механічних домішок;
- Спрощена реалізація автоматизації та телемеханізації магістральних трубопровідних систем, що використовують відцентрові насоси.

Конструкція відцентрового насоса включає робоче колесо з криволінійними лопатками, яке жорстко закріплене на валу, що зазвичай безпосередньо з'єднане з валом електродвигуна. Схема пристрою насоса представлена на Рисунок 5 і складається з наступних елементів: 1 — робоче колесо, 2 — вал, 3 — корпус, 4 — напірний патрубок, 5 — приймальний патрубок, 6 — напрямний апарат.

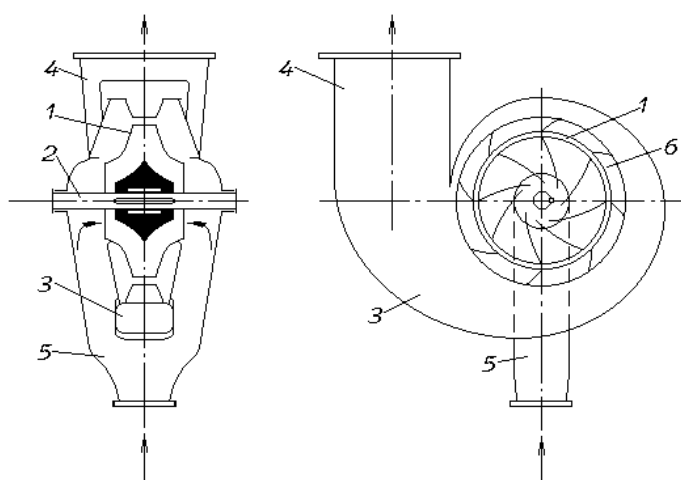


Рисунок 5 - Схема відцентрового насоса із двостороннім входом

Робоче колесо розташоване в корпусі центробіжного насоса. Корпус має форму кільцевої камери змінного перерізу, яка плавно розширюється по спіралі й переходить у напірний патрубок. Приймальний патрубок призначений для з'єднання центральної частини робочого колеса з приймальним трубопроводом.

Перед запуском центробіжний насос заповнюють рідиною. Після увімкнення приводного електродвигуна робоче колесо починає швидко обертатися. Рідина, що заповнює канали колеса, захоплюється його лопатками і під дією відцентрової сили спрямовується до периферії. Через направляючий апарат і спіралеподібну канавку рідина потрапляє в патрубок.

Таке переміщення викликає утворення вакууму в центральній частині робочого колеса. Під впливом зовнішнього тиску цей вакуум безперервно заповнюється новою порцією рідини.

Направляючий апарат виконує функцію перетворення кінетичної енергії рідини на її енергію тиску, забезпечуючи плавну й безударну роботу насоса, а також сприяє підвищенню його коефіцієнта корисної дії.

Для приблизного визначення напору  $H$  (у метрах), який створює центробіжний насос, можна скористатися такою формулою:

$$H = k \cdot n^2 \cdot D_k, \quad (1.2)$$

де  $k = 0,36 \div 0,54$ ;  $n$  - число оборотів робочого колеса насоса в секунду;

$D_k$  - діаметр робочого колеса на виході, мм.

Продуктивність відцентрового насоса зазвичай визначається шириною і діаметром робочого колеса на виході, а також формою, розмірами та кількістю лопатей. На практиці для розрахунку продуктивності відцентрового насоса можна скористатися наближеною формулою;

$$D = k \cdot d_n^2, \quad (1.3)$$

де  $d_n$  - діаметр нагнітального патрубку, м;  $k$  - коефіцієнт, який приймається рівним  $1,3 \div 1,8$  при  $d \leq 100$  мм та  $k = 2,0 \div 2,5$  при  $d > 100$  мм.

У залежності від кількості робочих коліс, встановлених у спільному корпусі, відрізняють одноступеневі та багатоступеневі насоси. Напір, створюваний багатоступеневим насосом, дорівнює напору одного робочого

колеса, помноженому на кількість таких коліс. Відповідно до конструкції робочого колеса центробіжні насоси поділяють на пристрої з одностороннім та двостороннім входом рідини. Окрім цього, центробіжні насоси класифікуються за іншими ознаками, які в даному тексті не розглядаються.

Характеристики центробіжних насосів, що застосовуються на магістральних нафтових трубопроводах, визначаються стандартами ДСТУ 12124-84. Згідно з ними максимальна температура транспортуваного продукту може становити до  $+80^{\circ}\text{C}$ , кінематична в'язкість повинна бути не більше  $3 \text{ см}^2/\text{с}$ , а вміст механічних домішок не має перевищувати  $0,05\%$  за об'ємом. Всі насоси маркуються відповідно до цього державного стандарту. Наприклад, магістральний нафтовий насос, що застосовується на нафтонасосній станції, має позначення НМ-7000-210 ДСТУ 12124-74, яке вказує на подачу  $7000 \text{ м}^3/\text{год}$  і напір  $210 \text{ м}$  водяного стовпа.

Основною технічною характеристикою центробіжного насоса є залежність подачі рідини від створюваного напору – так звана Q-N характеристика. Додатково аналізу підлягають характеристики Q-N (споживана потужність) та Q- $\eta$  (коефіцієнт корисної дії). Ці параметри є типовими для всіх центробіжних насосів і додаються до кожного пристрою разом із його паспортом.

Як видно з ілюстрації (Рисунок 6), у положенні  $Q=0$ , тобто при повністю закритій напірній засувці трубопроводу, створюється напір, який з незначним збільшенням досягає свого максимуму на початку відкриття засувки. Проте зі збільшенням подачі напір поступово зменшується. Характеристика Q-N демонструє, що навіть за закритої засувки спостерігається витрата потужності, яка спрямовується на нагрівання рідини всередині насоса. Це може спричинити значне підвищення температури рідини за короткий проміжок часу. З цієї причини довготривала експлуатація центробіжного насоса в умовах закритої засувки є недопустимою.

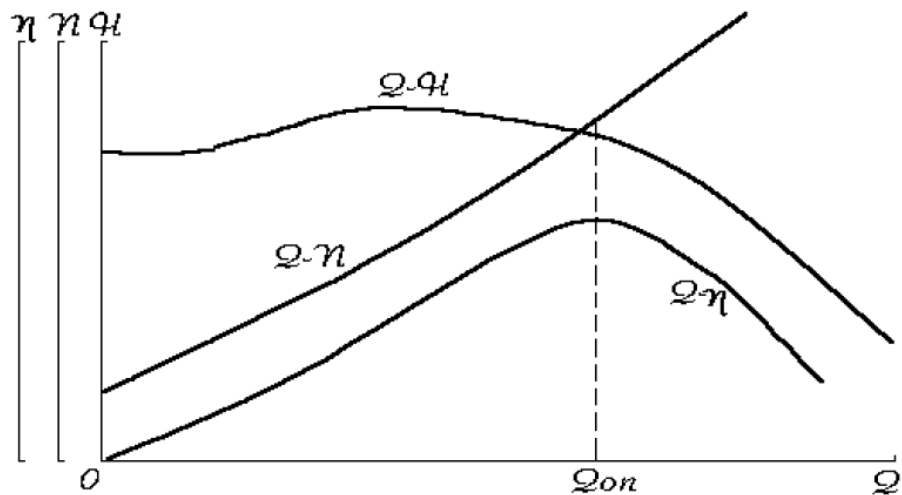


Рисунок 6 - Характеристики центробіжного насосу

При поступовому відкритті напірної засувки споживана потужність зростає. Крива залежності коефіцієнта корисної дії насоса від подачі ( $Q$ ) спочатку має точку  $\eta=0$  при  $Q=0$ , після чого зі збільшенням подачі показник ефективності підвищується, досягаючи максимуму при певному значенні  $Q_{on}$ . У подальшому збільшення подачі призводить до зниження коефіцієнта корисної дії.

Значення  $Q_{on}$ , що відповідає найвищому рівню коефіцієнта корисної дії  $\eta$ , визначає оптимальну продуктивність і напір насоса в умовах найвигіднішого режиму роботи. Під час експлуатації магістральних нафтових трубопроводів слід прагнути того, щоб зменшення коефіцієнта корисної дії порівняно з його максимальним значенням не перевищувало межі 5–7%.

Перелічені характеристики, що є складовою частиною паспорта насоса, визначаються для певного числа обертів  $n_0$  і надаються виробником. Для інших значень числа обертів  $n_x$ , якщо останнє відрізняється від  $n_0$  не більше ніж на 20%, такі параметри, як продуктивність  $Q_x$ , напір  $H_x$  та потужність  $N_x$ , що відповідають новому числу обертів  $n_x$ , можуть бути орієнтовно визначені за допомогою наступних виразів.

$$Q_x = Q_0 \cdot \frac{n_x}{n_0}, \quad (1.4)$$

$$H_x = H_0 \cdot \left(\frac{n_x}{n_e}\right)^2, \quad (1.5)$$

$$N_x = N_0 \cdot \left(\frac{n_x}{n_e}\right)^3, \quad (1.6)$$

де  $Q_0$ ,  $H_0$  і  $N_0$  - відповідно подача, напір і потужність при числі оборотів  $n_0$ .

Найпоширенішою схемою технічного облаштування насосів на транспортних станціях є послідовне встановлення двох-трьох робочих агрегатів і одного резервного. На нафтонасосній станції, розглянутій у цьому проекті, послідовно встановлено чотири насосні агрегати: два робочі, один у режимі автоматичного введення в роботу (АВР) і один у ремонті.

Корпус насоса в зоні виходу вала оснащують торцевими ущільненнями. Для зниження тиску на ці ущільнення камера перед торцевими ущільненнями за допомогою системи розвантажувальних трубопроводів з'єднується з підвідним трубопроводом.

Окрім основного обладнання, транспортні станції обладнані допоміжними насосними системами: нафтовими насосами для відкачування витоків із збірних резервуарів, насосами систем масляного змащування тощо. У цих системах застосовуються такі типи насосів: відцентрові, поршневі, ротаційні, заглибні тощо. Ротаційні насоси, серед яких виділяють гвинтові, шестеренні, кулачкові та лопатеві, використовуються для перекачування в'язких нафтопродуктів без домішок.

Погружні відцентрові насоси застосовуються для відкачування нафтопродуктів із віддалених резервуарів. Використовують два основні типи насосів: НА (нафтові артезіанські) та ПНР (погружні нафторезервуарні).

1.4 Способи та методи вирішення проблем енергозбереження на насосних станціях транспортування нафти

1.4.1 Аналіз можливих засобів управління потоком нафти на НПС.

Дроселювання насоса є поширеним явищем у нафтовій промисловості [1,2]. Для цього регулювальний клапан зазвичай розташовують на виході насоса, як показано на Рисунок 7.

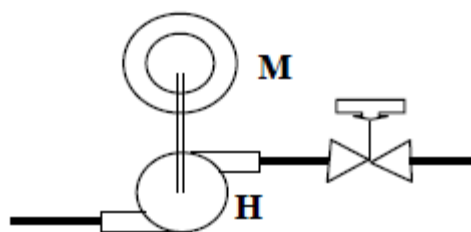


Рисунок 7 – Керування насосом за допомогою дроселювання на виході

При цьому способі регулювання керуюча заслінка змінює перепад тиску на заслінці, а отже, і подачу рідини. Це призводить до збільшення крутизни характеристики та, відповідно, зміщення робочої точки вздовж характеристики насоса, як показано на рисунку 1.9. Втрати при встановленні повністю відкритої заслінки в трубопровід зазвичай становлять близько 10% від інших динамічних втрат. Це обумовлює необхідність забезпечення напірної характеристики насоса, що перевищує розрахункову точку, для компенсації цих втрат.

Основні інструкції для керуючих заслінок встановлюють, що вони повинні відкриватися не більше ніж на 70–80% від максимально можливого значення за конструкцією. Виробники насосів, як правило, гарантують точність напору при заданій подачі в межах  $\pm 3\%$ , тому цей фактор потрібно враховувати (див. Рисунок 8). Крім того, використання клинопасових чи зубчастих передач у таких випадках зазвичай є небажаним. Це пояснюється тим, що робоче колесо має бути спеціально спроектоване для конкретних умов експлуатації або ж використаний менш ефективний конструктивний варіант.

Збільшене падіння тиску, викликане закриттям засувки, що управляє, є втратою енергії (Рисунок 9).

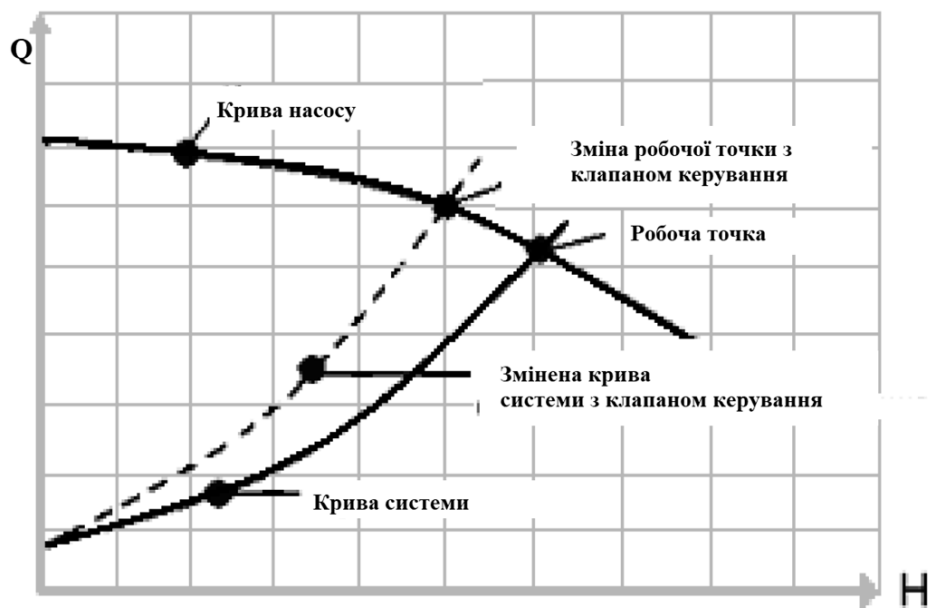


Рисунок 8 - Вплив дроселювання на характеристику мережі

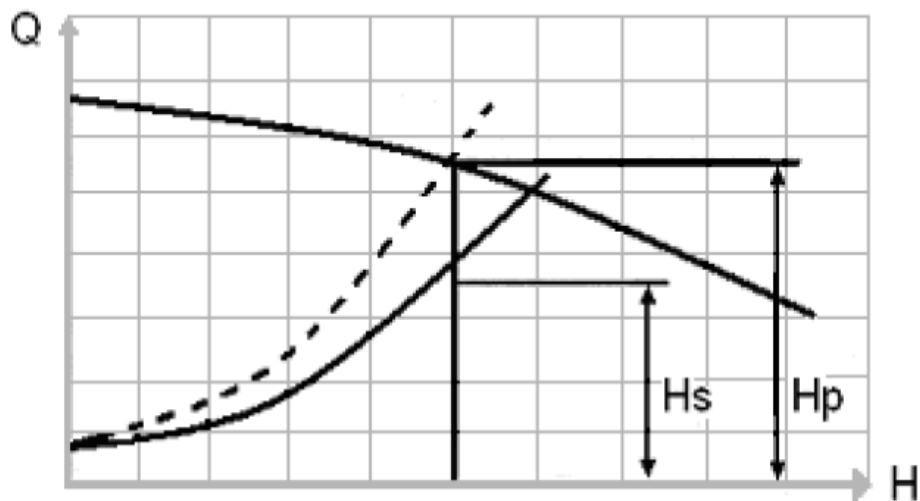


Рисунок 9 - Втрати енергії при дроселюванні

Корисний напір насоса позначається як  $H_s$ , проте фактичний напір насоса дорівнює  $H_p$ . Таким чином, різниця  $(H_p - H_s)$  вказує на енергію, що втрачається через дроселювання. Це лише частина загальних втрат коефіцієнта корисної дії. Переміщення робочої точки також впливає на зниження к.к.д. насоса (Рисунок 10). У такому випадку ефективність насоса знижується із 83% до 73%.

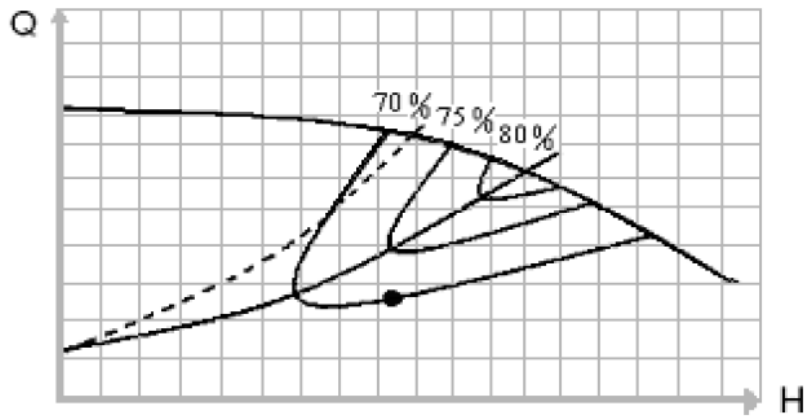


Рисунок 10- Втрати та к.к.д. насоса під час використання дроселювання

Трубопровідна система, зображена на рисунку 1.8, є надто спрощеною. Для забезпечення належної роботи необхідно додати труби та клапани, які дозволять ізолювати і ремонтувати керуючу засувку. Крім того, потрібно взяти заходів для підтримання мінімального потоку через насос, щоб уникнути утворення пари рідини та пошкодження насоса.

З огляду на це конфігурація системи управління може стати більш складною. Зазвичай повноцінна система включає дві регульовані засувки, а також пов'язані труби та агрегати. Умови для байпасних систем з великим обсягом подачі часто обумовлені вибором економічних насосів із "горбатими" характеристиками, що провокує подібні проблеми незалежно від використання частотного управління.

#### 1.4.2 Управління подачею насоса методом зміни швидкості.

При застосуванні цього методу характеристична крива насоса зміщується вгору або вниз по кривій мережі, як показано на рисунку 1.9. Цей підхід забезпечує достатню кількість енергії для досягнення необхідного рівня подачі. У порівнянні з дроселюванням на виході, зміна швидкості є значно енергоефективнішим методом управління.

Втім, і тут існують певні аспекти, які слід врахувати при виборі цього способу. Ефективність такого типу управління залежить від характеристик насоса і мережі. Діаграма на рисунку демонструє оптимізовану робочу точку для умов, що наближені до ідеальних. Потрібно врахувати вплив характеристик

із різними формами кривих і знати, як найкраще застосовувати частотне регулювання в подібних випадках.

Особливості конструкції насосів (осевих або змішаного типу), які не піддаються апроксимації через параболічні рівняння, можуть ускладнити використання дроселювання. Для таких насосів байпас є обов'язковим елементом. Подібні конструкції зазвичай зустрічаються в турбінних насосах для глибоких свердловин. Управління швидкістю таких насосів часто характеризується низькою ефективністю та можливими втратами коефіцієнта корисної дії, хоча ці втрати суттєво менші, ніж при дроселюванні насоса.

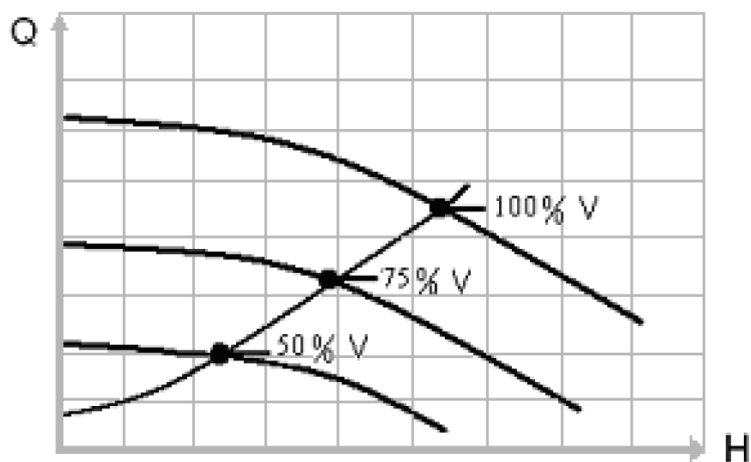


Рисунок 11 - Вплив керування швидкістю на характеристику насоса

Управління режимами роботи насосних апаратів шляхом зміни частоти обертання приводних двигунів сьогодні можливо завдяки використанню такого обладнання, як:

- гідравлічні та електромагнітні муфти, які дозволяють змінювати частоту обертання валу насоса при стабільній частоті обертання валу електроприводу;
- електронні інвертори, що регулюють частоту обертання валу електроприводу, а відповідно і частоту обертання валу насоса.

### 1.5 Склад проміжної нафтоtransportуючої станції

До складу проміжної нафтоtransportної станції зазвичай входять:

- основна нафтоtransportна насосна установка із спорудою для розміщення нафтонасосних агрегатів та додаткового обладнання (основна будівля);

- загальностанційний колектор із апаратними засувками і реверсивними клапанами;
- камера управління з регулюючими пристроями (клапанами, затворами та іншими робочими механізмами);
- майданчик із фільтрами для очищення від забруднень;
- вузол пропуску очисного скребка із засувками пропуску та загальностанційними відсічними засувками;
- резервуари для збору витоків із камерою засувок і фільтрів;
- насоси системи відкачування витоків;
- трубопроводні комунікації для технологічного зв'язку обладнання;
- підстанція для зниження напруги в системі енергозабезпечення (лінії електропередач, які прокладаються для живлення нафтонасосної станції, до її складу не входять);
- система аварійного енергозабезпечення нафтонасосної станції;
- система пінного пожежогасіння;
- приміщення та споруди для обладнання захисту, централізованого контролю й управління основним і допоміжним обладнанням;
- вузол зв'язку;
- водозабезпечувальна система з насосною станцією, артезіанськими свердловинами та резервуарами для аварійних і робочих запасів води;
- система тепlopостачання для обігріву виробничих і побутових приміщень;
- майданчики та споруди для стоянки аварійної техніки і автотранспорту;
- адміністративно-службовий корпус, суміщений із цехами для дрібного й поточного ремонту обладнання, складом для зберігання запасних частин, інструментів та іншого обладнання;
- житловий комплекс для обслуговуючого персоналу нафтотранспортних станцій із об'єктами побутового та культурно-масового призначення.



Для виключення потрапляння механічних домішок або бруду до насосів у всмоктувальній частині станції встановлюються фільтри-грязьовловлювачі ФГУ№1-№4, які регулярно очищаються. Один із очищених фільтрів традиційно залишається в резерві, хоча в окремих випадках фільтри вимикаються тільки на час очищення або заміни.

Після проходження через фільтри потік нафти спрямовується до загального станційного колектора, оснащеного зворотними клапанами 2к-6к відповідно до кількості встановлених агрегатів й агрегатними засувками. Потік минає систему гасіння ударної хвилі «Arcron», яка в разі раптового підвищення тиску скидає частину нафти до резервуарів РВС№1-№2, тим самим знижуючи тиск у трубопроводі.

Апаратура затворок дає змогу відключати або підключати насосні агрегати до загального колектора. Зворотні клапани забезпечують захист обладнання від роботи у зворотному напрямку. Зокрема, рух нафти через агрегати №1-№4 здійснюється таким чином: засувка 1 → агрегат №1 → затворка 2 → затворка 1 → агрегат №2 → затворка 2 → затворка 1 → агрегат №3 → затворка 2 → зворотні клапани 5к,6к → камера управління тиском. У камері управління тиском встановлено два регулювальні органи (один резервний), які забезпечують функціонування системи в заданих параметрах. Кількість регулюючих органів залежить від пропускної здатності нафтопроводу та доступних промислових регуляторів і може бути більше двох. З камери управління тиск потік рідини через засувку 2 надходить далі магістральним нафтопроводом до наступної станції.

Для збору утечек нафти під землею встановлено резервуар ЕП-25, куди нафта надходить самопливом. Біля резервуара розташована камера засувок із фільтрами та зворотним клапаном, який запобігає поверненню продукту з магістралі назад до резервуара. Насос для відкачування утечек включається автоматично на підставі контролю рівня рідини в резервуарі. Коли ємність резервуарів РВС№1-№2 наповнена системою «Arcron», відкачування здійснюється за допомогою насосів типу ЦНС 38-220 системи збору утечек: у

цьому разі нафту перекачують до загального станційного колектора. Для уникнення попадання нафти з колектора до системи відкачування овгороджуються реверсні клапани.

Таблиця 1.1 – Перелік технологічного обладнання

Найменування,	Характеристика, тип, марка
Основна насосна	
Насос магістральний	НМ-7000-210, Q=7000м3/годину Н=210 м, n=3ТОВ про/хв
Зворотний клапан	Ду-700 Ру = 64 кг/см2
Агрегатні засувки	Ду-800 Ру = 64/см2
Система збору та розгойдування витоків	
Насос відкачування РВС-400	ЦНС38-220 Q = 34м3 / год Н=230м, n=2950 об/хв
Місткість витоків ЕП-25,	V = 25м3
Насос занурювальний	12НА 9×4 Q=80м3/година Н=52м N=1470 об/хв
Засувки	Ду-80 Ру=16 кг/см2
Резервуари	
Резервуари РВС-400,	V=400 м3
Засувки	Ду-80 Ру=16 кг/см2
Система брудоловлювання	
Фільтри брудоловлювачі	КМ
Засувки	Ду-500 Ру = 64 кг/см2
Система регулювання тиску	
Регулятори тиску	«BIFFI» Ду-500 Ру = 64 кг/см2
Засувки	Ду-500 Ру = 64 кг/см2
Система гасіння ударної хвилі	
Блок гасіння ударної хвилі	«Аркрон-1000» Q=9100-9300 м3/годину, P=40кг/см2
Засувки	Ду-300 РУ=64 кг/см2
Камера пропуску скребка	
Засувки	Ду-1000 Ру=75 кг/см2
Зворотний клапан	Ду-700 Ру=75 кг/см2

Останніми виконуються підключення або відключення підшипників того чи іншого нафтонасосного агрегата до системи мастила.

Експлуатація нафтотранспортуючих установок за умови несправності системи змащення та охолодження заборонена, оскільки це швидко призводить до виходу з ладу підшипників і валів основних насосних агрегатів для перекачування нафти.

Нафтотранспортуючі установки разом із приводами та системами примусової циркуляції змащення, а також припливно-витяжною вентиляцією розміщують у спеціалізованій будівлі (загальному укритті). Загальне укриття розподіляється на два окремі зали: зал електрообладнання та насосний зал. Це розділення зумовлене дотриманням вимог пожежо- та вибухобезпеки. У залі електрообладнання встановлюються синхронні електродвигуни (приводи основних насосних агрегатів), тиристорні збуджувачі цих двигунів, система примусової циркуляції змащення та припливно-витяжна вентиляція. У насосному залі розташовані магістральні нафтові насоси і підпірні насоси системи відкачування витоків нафти.

Система охолодження запобігає перегріву основних електродвигунів у разі використання повітря як охолоджувальної речовини. Контрольоване підвищення тиску повітря в залі електрообладнання виключає проникнення парів нафти з насосного залу, запобігаючи утворенню вибухонебезпечних сумішей і мінімізуючи ризик вибуху.

Робота допоміжного обладнання та різних систем автоматизована. Дистанційний контроль і автоматичне керування здійснюються з операторської кімнати, яка розташована в тій самій будівлі, що й нафтовий насосний комплекс. У цій кімнаті також встановлено апаратуру для дистанційного контролю та управління основними нафтовими насосними агрегатами та часткові комплекти телемеханічних засобів. Технічні характеристики та кількість допоміжного обладнання визначаються залежно від типу встановлених основних агрегатів.

## 1.7 Основні суміщені характеристика нафтопроводу та насоса при різних методах регулювання

### 1.7.1 Метод дроселювання

Метод дроселювання досить часто використовується на практиці, хоча і не є економічно вигідним. Він базується на частковому обмеженні потоку нафти на виході з насосної станції, тобто на створенні додаткового гідравлічного опору. При цьому робоча точка зміщується з положення  $A_1$  у напрямку зменшення витрати до точки  $A_2$  (Рисунок 13). Доцільність застосування цього методу можна оцінити за величиною коефіцієнта корисної дії дроселювання  $\eta_{др}$ .

$$\eta_{др} = \frac{H_2}{H_1} = \frac{H_2}{H_2 + h_{др}} = \frac{1}{1 + \frac{h_{др}}{H_2}}, \quad (1.7)$$

де  $h_{др}$  - напор, що дроселюється. Зі збільшенням напору, що дроселюється значення  $\eta_{др}$  зменшується. Повний к. п. д. насоса (ПС) визначається виразом:

$$\eta = \eta_2 \cdot \eta_{др}, \quad (1.8)$$

де  $\eta_2$  - к.п.д. насоса після дроселювання.

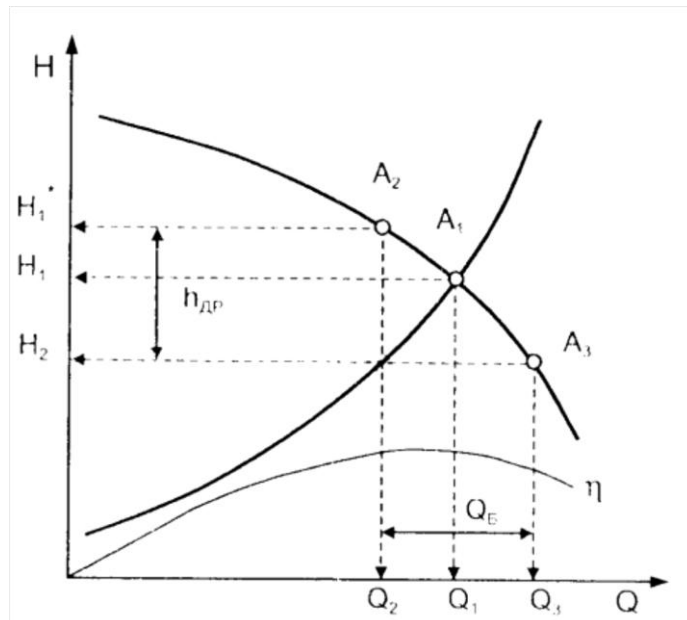


Рисунок 13- Поєднана характеристика ПС та трубопроводу при регулюванні дроселюванням

Метод дроселювання доцільніше застосовувати для насосів із пологою напірною характеристикою. При цьому втрати енергії на дроселювання не повинні перевищувати 2% загальних енергозатрат на перекачування.

Альтернативою є метод зміни частоти обертання валу насоса, який вважається сучасним і економічно вигідним способом регулювання. Використання плавного регулювання частоти обертання роторів насосів на перекачувальних станціях магістральних нафтопроводів сприяє покращенню синхронізації роботи станцій, дозволяє уникнути обточування робочих коліс і заміни роторів, а також запобігає гідравлічним ударам у системі трубопроводу. Крім того, цей підхід забезпечує скорочення часу запуску та зупинки насосних агрегатів.

Однак, через низку технічних обмежень цей метод управління поки що не отримав широкого розповсюдження. Основу методу регулювання частоти обертання становить теорія подібності.

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2}; \quad \frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2; \quad \frac{N_1}{N_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3, \quad (1.9)$$

де  $Q_1$ ,  $H_1$  і  $N_1$  – подача, напір та споживана потужність при частоті обертання робочого колеса  $n_1$ ;

$Q_2$ ,  $H_2$  і  $N_2$  – відповідно ті самі показники при частоті обертання робочого колеса  $n_2$ . При зменшенні частоти обертання характеристика насоса змінюється, і робоча точка зміщується з положення  $A_1$  в  $A_2$  (див. рисунок 1.15). Використовуючи співвідношення (1.1) для перерахунку характеристик насоса з однієї частоти обертання на іншу, отримаємо такі співвідношення:

Змінити частоту обертання вала насоса можливо в таких випадках: застосування двигунів із регульованою частотою обертання; встановлення на вал насоса муфт із змінним коефіцієнтом пробуксовування (гідравлічних або електромагнітних); використання перетворювачів частоти струму з одночасною зміною напруги живлення електродвигунів.

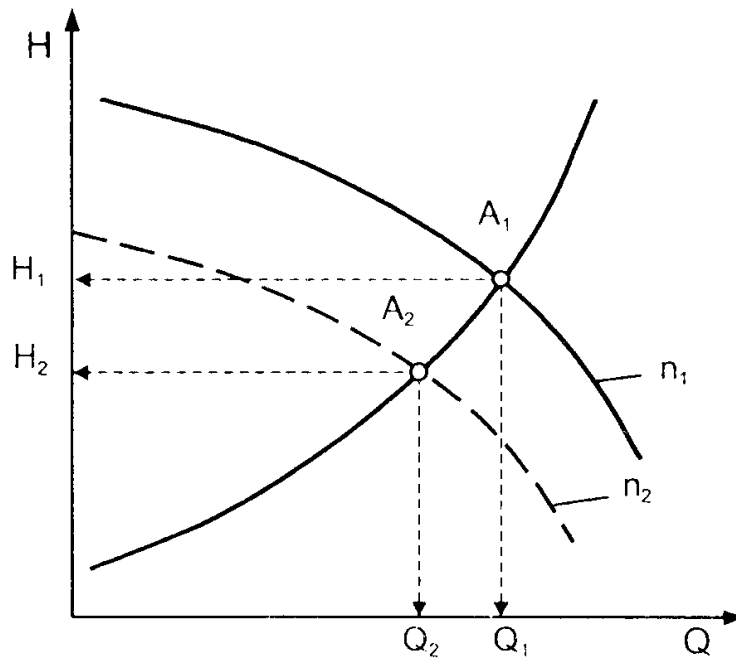


Рисунок 14- Поєднана характеристика нафтопроводу та насоса при зміні частоти обертання валу

Слід зазначити, що зміна частоти обертів насоса у широких межах є небажаною, оскільки це призводить до суттєвого зниження коефіцієнта корисної дії насосного обладнання.

Дроселювання напірних ліній для регулювання роботи насосів доцільне у випадках, коли напір насоса перевищує необхідний рівень. Цей метод управління дозволяє забезпечити достатньо плавне регулювання витрати. Реалізація системи дроселювання може бути здійснена за двома основними схемами. У першій схемі використовують засувки з механічним приводом. Цей варіант має суттєві обмеження щодо створення автоматизованої системи управління насосами. У другому варіанті застосовують засувки з електроприводом, що відкриває можливість досягнення певного рівня автоматизації управління насосами. Однак даний метод обмежений низькою швидкістю через значну інерцію приводів засувок. Крім того, у процесі експлуатації можуть виникати ударні явища у трубопроводах.

Дроселювання як метод регулювання роботи насосів слід застосовувати переважно в умовах, коли не вимагається високий рівень автоматизації, а характеристики гідравлічної системи залишаються відносно стабільними у часі.

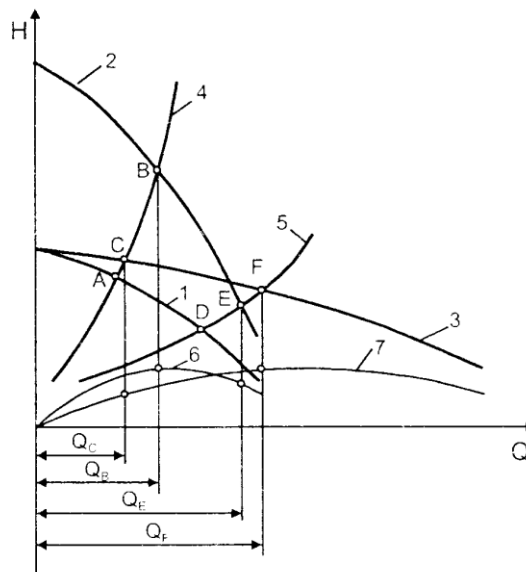


Рисунок 15- Поєднана характеристика трубопроводу та ПС при регулюванні зміною числа та схеми включення насосів

Розглянемо як приклад паралельне та послідовне з'єднання двох однакових відцентрових насосів для їхньої роботи в системі трубопроводів із різним гідравлічним опором.

З результатів графічного аналізу (Рисунок 15) видно, що послідовне з'єднання насосів є більш ефективним у випадку застосування на трубопроводі зі стрімкою характеристикою. При такому способі з'єднання забезпечується вищий обсяг подачі ( $Q_B > Q_C$ ), а також досягаються вищий сумарний тиск та кращий коефіцієнт корисної дії порівняно з паралельним з'єднанням. Водночас паралельне з'єднання насосів демонструє переваги у ситуації з роботою на трубопроводі з пологою характеристикою ( $Q_F > Q_E$ ,  $H_F > H_E$ ,  $\eta_F > \eta_E$ ) [1].

### 1.8 Структура та принцип роботи перетворювачів частоти

Перетворювач частоти — це пристрій, призначений для зміни змінного струму (напруги) однієї частоти на змінний струм (напругу) іншої частоти. Частота вихідного струму в сучасних перетворювачах може змінюватися в широких межах, бути як вищою, так і нижчою від частоти живильної мережі.

Конструкція будь-якого перетворювача частоти складається із силової та керуючої частин. Силова частина зазвичай побудована на основі тиристорів або транзисторів, які функціонують у режимі електронних ключів. Управляюча частина базується на цифрових мікропроцесорах і забезпечує регулювання роботи силових електронних ключів, а також вирішує широкий спектр додаткових задач, таких як контроль, діагностика та захист системи.

Перетворювачі частоти активно застосовуються у регульованих електроприводах. Залежно від структури та принципу функціонування силової частини вони поділяються на два класи:

- Перетворювачі частоти з вираженим проміжним ланцюгом постійного струму.
- Перетворювачі частоти з безпосереднім з'єднанням (без проміжного ланцюга постійного струму).

Кожен із зазначених класів має свої особливості, що визначають галузь доцільного використання кожного з них. Найпершими з'явилися перетворювачі частоти з безпосереднім з'єднанням, у яких силова частина представлена у вигляді керованого випрямляча, виконаного на незапірних тиристорах. У процесі роботи система управління по черзі активує групи тиристорів і підключає статорні обмотки електродвигуна до живильної мережі.

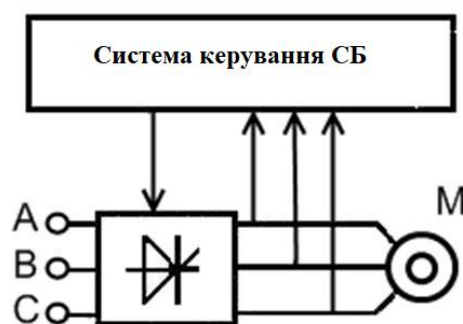


Рисунок 16 - Структурна схема перетворювача з безпосереднім зв'язком

У результаті вихідна напруга перетворювача утворюється з «вирізаних» ділянок синусоїд вхідної напруги. На Рисунок 17 є приклад формування вихідної напруги однієї з фаз навантаження.

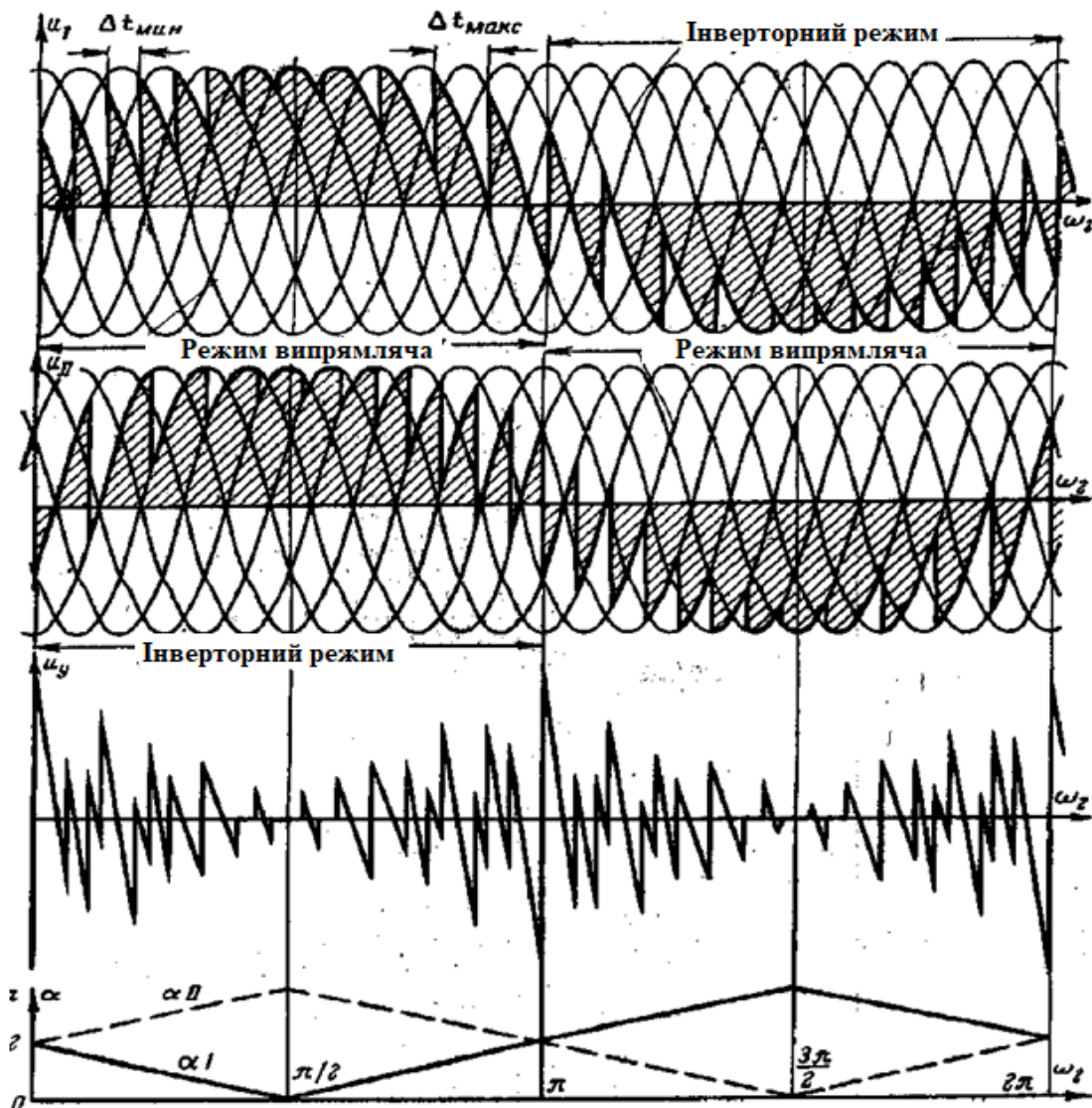


Рисунок 17- Приклад формування вихідної напруги

На вході перетворювача функціонує трифазна синусоїдна напруга  $\setminus ( U_A, U_B, U_C )$ . Вихідна напруга  $U_{\text{вих}}$  має несинусоїдальну «пилоподібну» форму, яку умовно можна апроксимувати синусоїдою (потовщена лінія). З аналізу представленого графічного матеріалу видно, що частота вихідної напруги принципово не може дорівнювати або перевищувати частоту живильної мережі. Перетворювач забезпечує роботу у діапазоні частот від 0 до 30 Гц. У підсумку досягається порівняно вузький діапазон регулювання частоти обертання двигуна (не більше 1:10). Такий обмежений масштаб регулювання істотно обмежує можливості використання подібних перетворювачів у сучасних системах частотно-регульованих приводів, які вимагають значного діапазону керування технологічними параметрами.

Використання незапірних тиристорів передбачає застосування відносно складних систем регулювання, що значно збільшує вартість пристрою. Крім того, несинусоїдна форма вихідної напруги перетворювача є джерелом вищих гармонік, що спричиняє додаткові втрати в електродвигуні, його перегрів, зниження крутного моменту, а також створення значного електромагнітного фону у живильній мережі. Для усунення цих негативних явищ зазвичай застосовуються компенсуючі техніки, які призводять до зростання вартості, збільшення маси й габаритів системи, а також до зниження загальної ефективності.

Зважаючи на зазначені недоліки перетворювачів із прямим зв'язком, слід наголосити на їхніх вагомих перевагах. До них належать:

- найвищий коефіцієнт корисної дії серед аналогічних видів перетворювачів (98,5% і більше);
- здатність працювати в умовах високих напруг і великих струмів, що робить їх придатними для використання в потужних високовольтних приводах;
- відносно низька вартість у порівнянні з іншими типами перетворювачів, незважаючи на збільшення абсолютної ціни через застосування схем регулювання та компенсуючих методів.

Такого типу схеми перетворювачів переважно використовуються у старих моделях приводів і стають дедалі менш поширеними у нових конструкціях.

У порівнянні з перетворювачами з безпосереднім зв'язком, для формування синусоїдальної змінної напруги використовуються автономні інвертори напруги та струму.

У конструкції електронних ключів в інверторах застосовуються тиристири запирання GTO, а також їх вдосконалені модифікації GCT, IGCT, SGCT, і біполярні транзистори з ізольованим затвором IGBT. Основною перевагою тиристорних перетворювачів частоти, як і схем з безпосереднім зв'язком, є здатність працювати з великими струмами та напругами, витримуючи тривалу навантаження та імпульсні дії. Вони характеризуються

високими показниками ККД (до 98%) у порівнянні з перетворювачами на транзисторах IGBT з ККД у межах 95-98%.

Перетворювачі частоти, побудовані на тиристорах, досі займають провідне місце у високовольтних приводах потужністю від сотень кіловат до десятків мегаватів із вихідною напругою в діапазоні 3-10 кВ і більше. Однак вони є найдорожчими у класі високовольтних перетворювачів за показником вартості одиниці вихідної потужності. Ще донедавна моделі на тиристорах GTO домінували також у низьковольтних приводах із регулюванням частоти, але з появою транзисторів IGBT галузь зазнала значного прориву, і сучасні перетворювачі на їх основі стали загальноновизнаними лідерами у цій сфері.

Тиристри відрізняються тим, що є напівкерованими приладами: для їх ввімкнення достатньо подати короткий імпульс на керуючий електрод, але для вимкнення необхідно забезпечити прикладання оберненої напруги або зниження комутуючого струму до нуля. Через це тиристорні перетворювачі частоти потребують складної і важкої системи управління.

Транзистори IGBT відрізняються від тиристорів повною керованістю, простою та економічною системою керування, а також найвищою робочою частотою серед доступних аналогів. Завдяки цим характеристикам перетворювачі частоти на базі IGBT розширюють діапазон регулювання швидкості обертання електродвигуна та забезпечують підвищену миттєву реакцію приводу в цілому.

У випадку асинхронних електроприводів із векторним управлінням перетворювачі на IGBT дозволяють працювати на малих швидкостях без датчика зворотного зв'язку. Використання IGBT із вищою частотою комутації в поєднанні з мікропроцесорною системою управління сприяє зниженню рівня високих гармонік, притаманних тиристорним перетворювачам. Це приводить до мінімізації додаткових втрат в обмотках і магнітопроводі двигуна, зменшення його нагрівання, усунення пульсацій моменту та явища так званого «крокування» ротора на малих частотах. Також знижуються втрати в трансформаторах і конденсаторних батареях, збільшується термін служби

їхньої ізоляції, зменшується кількість хибних спрацьовувань захисних пристроїв та похибок індукційних вимірювальних приладів.

Перетворювачі на транзисторах IGBT мають значну перевагу перед тиристорними аналогами завдяки компактним розмірам, невеликій вазі та високій надійності через модульне виконання електронних ключів, якісне відведення тепла від поверхні модуля та меншу кількість конструкційних елементів.

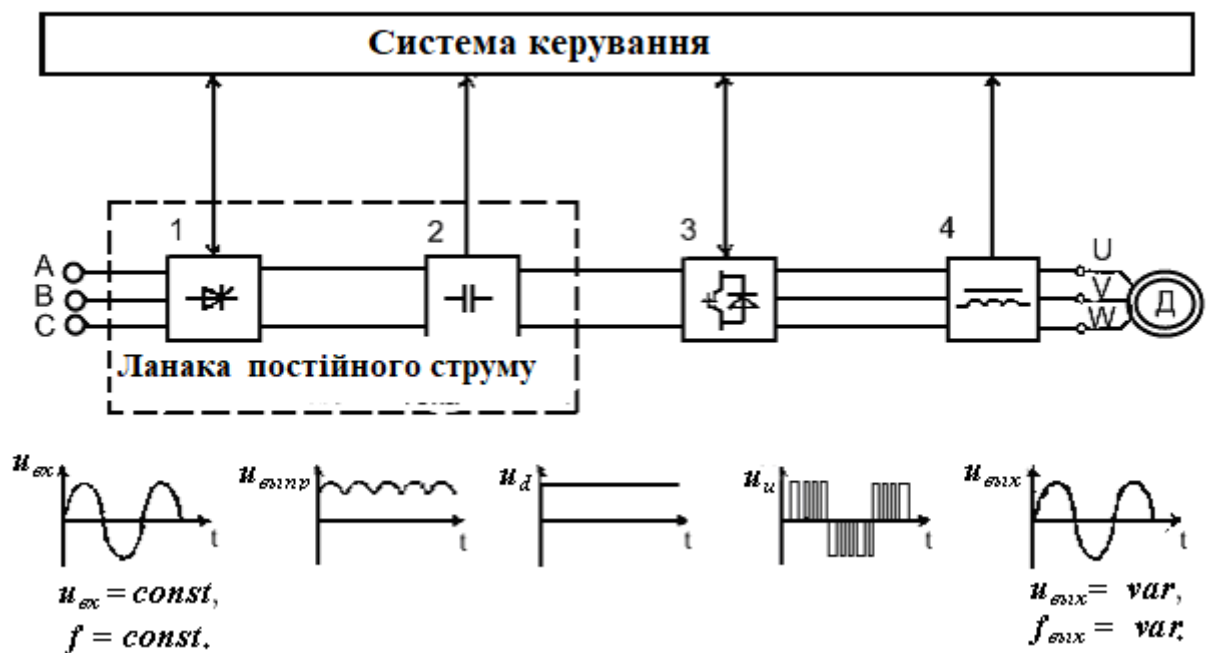


Рисунок 18 - Типова схема перетворювача частоти

В інверторі здійснюється перетворення постійної напруги  $U_d$  у трифазну (або однофазну) імпульсну напругу  $U_i$  зі змінною амплітудою та частотою. Відповідно до сигналів системи регулювання, кожна обмотка електричного двигуна підключається через певні силові транзистори інвертора до позитивного і негативного полюсів ланки постійного струму.

Період підключення кожної обмотки в межах періоду слідування імпульсів модулюється за синусоїдальним законом. Найбільша ширина імпульсів припадає на середину напівперіоду, а до початку і кінця напівперіоду вона зменшується.

Отже, система управління забезпечує широтно-імпульсну модуляцію (ШІМ) напруги, яка подається на обмотки двигуна. Амплітуда та частота цієї напруги визначаються параметрами модулюючої синусоїдальної функції.

За високої несучої частоти ШІМ (2–15 кГц) обмотки двигуна завдяки своїй великій індуктивності працюють як фільтр. У результаті через них протікають майже синусоїдальні струми.

У схемах перетворювачів із регульованим випрямлячем зміна амплітуди напруги  $U_i$  може досягатися регулюванням величини постійної напруги  $U_d$ , а зміна частоти — керуванням режимом роботи інвертора.

За необхідності на виході автономного інвертора встановлюється фільтр для згладжування пульсацій струму. Однак у схемах перетворювачів із використанням IGBT-транзисторів, завдяки низькому рівню вищих гармонік у вихідній напрузі, потреба у фільтрі практично відсутня. Тож на виході перетворювача частоти формується трифазна (або однофазна) змінна напруга регульованої частоти та амплітуди ( $U_{\text{вих}} = \text{var}, f_{\text{вих}} = \text{var}$ ).

Останнім часом більшість компаній активно займаються розробкою та впровадженням високовольтних частотних перетворювачів, що продиктовано потребами ринку. Необхідна величина вихідної напруги для високовольтних електроприводів сягає 10 кВ і вище при потужності до кількох десятків мегаватів.

Для забезпечення таких характеристик застосовуються дороговартісні тиристорні силові електронні ключі зі складними системами управління. Підключення перетворювача до мережі здійснюється або через вхідний струмообмежувальний реактор, або через узгоджувальний трансформатор.

Максимальна напруга і струм одиничного електронного ключа мають певні обмеження, через що використовуються спеціальні схемотехнічні рішення для підвищення вихідної напруги перетворювача. Крім того, це дозволяє знизити загальну вартість високовольтних частотних перетворювачів завдяки використанню низьковольтних електронних ключів.

## 1.9 Висновки по розділу:

1. Покращення техніко-економічних показників при використанні перетворювачів частоти для керування електродвигунами магістральних насосних агрегатів можливе за рахунок оптимізації якості технологічних режимів роботи насоса, а також вдосконалення технічних характеристик частотно-регульованого електропривода та самого перетворювача частоти.

2. При роботі двигуна від перетворювача частоти тиск на виході станції визначається частотою обертання двигуна. Оскільки регулятор тиску не задіяний, втрати тиску в ньому відсутні, що знижує максимальний тиск у системі станції.

## 2 РОЗРОБКА СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ НАСОСНИХ АГРЕГАТІВ І ВИБІР ЧАСТОТНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА

### 2.1 Технологічні вимоги до електроприводу насосів НПС

Виходя з описаної технології роботи нафтоперекачувальної станції (НПС), можна визначити такі вимоги до електроприводу силового насоса:

- забезпечення стабільності подачі;
- можливість регулювання швидкості обертання;
- гарантування пожежо- та вибухобезпеки;
- обмеження рівня тиску на виході насосного агрегата;
- встановлення підпірних насосів для запобігання кавітації;
- забезпечення працездатності у тривалому режимі;
- обмеження пускових струмів електродвигунів великої потужності задля уникнення значного зниження напруги під час їх запуску;
- використання нереверсивного приводу.

### 2.2 Вибір системи електроприводу нафтоперекачувальної станції

Дотепер основним способом регулювання тиску в нафтовому трубопроводі було дроселювання за допомогою засувки. Для такого регулювання використовували асинхронні електродвигуни порівняно невеликої потужності. Однак доведено, що більш економічним методом управління тиском у трубопроводах є регулювання швидкості обертання приводного двигуна насосного агрегату.

Практика використання електричних двигунів змінного струму з частотним регулюванням для приводу насосів, компресорів та інших агрегатів свідчить не тільки про можливість економії електроенергії, але й про важливість врахування ряду додаткових факторів:

- вибір оптимальної продуктивності обладнання залежно від різних етапів його роботи;
- усунення важких режимів пуску;

- уникнення неконтрольованості механізму в разі його аварійного відключення;
- забезпечення частот обертання, які неможливо досягти при безпосередньому підключенні двигуна до мережі;
- оптимізація режимів роботи суміжних і допоміжних механізмів, трубопроводів та арматури, що зменшує їх зношування та збільшує довговічність і надійність;
- зниження витрат на забезпечення резервних систем, ремонт та обслуговування;
- впровадження повної автоматизації насосних агрегатів.

Сучасний рівень розвитку перетворювальної техніки та досвід створення й використання частотно-регульованих електроприводів змінного струму дозволяють у повному обсязі реалізувати перелічені можливості та переваги.

У проєкті розглядається підхід, за яким у насосній станції встановлюється одне пуско-регулювальне обладнання, яке базується на тиристорному перетворювачі частоти (ТПЧ). Це обладнання забезпечує поетапне прискорення насосних агрегатів до номінальної частоти обертання, після чого відбувається їх "м'яке" підключення безпосередньо до мережі живлення. На всю НПС передбачається єдиний тиристорний перетворювач частоти, до якого двигуни підключаються по черзі під час запуску.

Використовуючи ТПЧ, можна також регулювати швидкість одного із електродвигунів під час його роботи, а значить – і тиск рідини в трубопроводі. Таким чином, цей пристрій гарантує загальне керування тиском у трубопроводі відповідно до заданих параметрів.

Запуск насосних агрегатів із використанням ТПЧ виключає протікання перевантажувальних струмів у обмотках двигунів, що дозволяє зняти обмеження на кількість можливих запусків двигунів у певний часовий інтервал. У разі тимчасової несправності ТПЧ забезпечується можливість прямого запуску приводних двигунів із подальшою роботою їх у нерегульованому режимі.

Частотний метод управління електроприводами має низку переваг у порівнянні з іншими методами.

### 2.3 Електропривод насосних агрегатів

2.3.1 Найпоширенішими є магнітоелектричні двигуни, які за типом споживаної енергії поділяються на:

- двигуни постійного струму;
- синхронні електродвигуни;
- асинхронні електродвигуни.

*Двигун постійного струму* — це електродвигун, який живиться постійним струмом. Цей тип двигунів оснащений щітково-колекторним вузлом, що забезпечує електричний зв'язок між обертальною та нерухомою частинами машини. Однак такий вузол є менш надійним і складнішим в обслуговуванні конструктивним елементом. Крім цього, двигуни із щітково-колекторним вузлом мають нижчу вибухобезпечність через можливість іскроутворення.

*Синхронний електродвигун* — це електродвигун змінного струму, у якому ротор обертається синхронно з магнітним полем прикладеної напруги. Такі двигуни зазвичай застосовуються для роботи на високих потужностях (від сотень кіловат і більше). Водночас їхня конструкція є складнішою порівняно з асинхронними машинами з точки зору забезпечення безперебійної передачі енергії. Крім того, синхронний двигун може втратити синхронність, якщо навантаження перевищить допустиме значення, що може призвести до його зупинки. Також запуск синхронних двигунів у асинхронному режимі є складнішим порівняно із запуском асинхронних двигунів із короткозамкненим ротором. У зв'язку з цим даний тип двигунів для нашого випадку вважається недоцільним.

*Асинхронний електродвигун* — це електродвигун змінного струму, у якому частота обертання ротора відрізняється від частоти обертання магнітного поля, яке створюється прикладеною напругою. На сьогодні ці двигуни є найбільш поширеними. Основними перевагами асинхронних електродвигунів із короткозамкненим ротором є: майже постійна швидкість обертання незалежно

від змін навантаження; здатність витримувати короточасні механічні перевантаження; простота конструкції; легкість запуску та простота автоматизації процесу роботи.

З огляду на все зазначене вище для приводу насосних агрегатів ми обираємо асинхронний електродвигун.

При виборі електродвигунів для приводу основних насосів потужність на валу відцентрового насоса визначається за наступною формулою

$$P = k_3 \cdot \frac{Q \cdot H \cdot \rho \cdot g}{\eta} \cdot 10^{-3} \text{ кВт.} \quad (2.1)$$

де - щільність нафтопродукту;

$\eta$  – повний к.п.д. насоса, трансмісії та двигуна.

При виборі потужності приводу необхідно врахувати, що допускається робота відцентрового насоса з подачею вище за номінальну на 15-20%.

Зробимо вибір електродвигуна магістральних насосів НМ-7000-210 застосовуваних на нафтоперекачувальній станції.

Дані для розрахунку:

Продуктивність  $Q=1,9 \text{ м}^3/\text{с}$

Напір насоса  $H = 210 \text{ м}$

К.К.Д. насоса  $\eta=0,6-0,75$

Щільність нафти, що перекачується (середня)  $\rho=900 \text{ кг/м}^3$

Номінальна частота обертання  $n=3000 \text{ об/хв.}$

Потужність (на нафті)  $P=3870 \text{ кВт.}$

Потужність електродвигуна для насоса, кВт:

$$P = 1,3 \cdot \frac{1,9 \cdot 900 \cdot 210 \cdot 9,81}{0,75} \cdot 10^{-3} = 6100 \text{ кВт.}$$

За заданої потужності механізму вибір електродвигуна здійснюється відповідно до каталогу з урахуванням коефіцієнта корисної дії проміжної передачі. Номінальна потужність електродвигуна, обрана за каталогом, повинна бути рівною або дещо більшою за розрахункову. Обраний електродвигун не

потребує додаткової перевірки на нагрів, оскільки його робочий режим є тривалим і передбачає постійне навантаження.

Потужність (кВт) електродвигуна для насоса визначається за наступною формулою:

$$P = k_3 \cdot \frac{Q \cdot H \cdot \rho \cdot g}{\eta \cdot \eta_{\text{п}}} \cdot 10^{-3} \text{ кВт.} \quad (2.1)$$

де  $Q$  [м<sup>3</sup>/с] – продуктивність насоса,  $H$  [Па] – тиск на виході насоса,  $\eta$ ,  $\eta_{\text{пер}}$  – ККД насоса та передавального механізму відповідно,  $k_3$  – коефіцієнт запасу.

Потужність визначитися як:

$$P = 1,3 \cdot \frac{1,9 \cdot 900 \cdot 210 \cdot 9,81}{0,75 \cdot 0,93} \cdot 10^{-3} = 6559 \text{ кВт.}$$

За умов зниженої швидкості обертання створюваний насосом напір може бути недостатнім, що унеможлиблює ефективне перекачування робочої рідини. Номінальна потужність електродвигуна, вибраного за каталогом, повинна відповідати розрахунковій або бути дещо вищою за неї.

Вибраний електродвигун не потребує додаткової перевірки на перегрів чи перевантаження, оскільки завод-виробник виконав усі необхідні розрахунки й випробування. Ці розрахунки базувалися на принципі максимального використання властивостей використовуваних матеріалів при роботі двигуна з номінальною потужністю.

Найбільш наближеним за потужністю є асинхронний трифазний вибухозахищений двигун (Рисунок 19) серії 4АЗМП-8000/10000 Х1 УХЛ4 із номінальною потужністю 8000 кВт, технічні характеристики якого наведено в таблиці 2.1. Використання електродвигунів для приводу насосної техніки потребує належної організації системи електропостачання нафтиперекачувальних станцій.

Незалежно від типу електродвигунів на насосних станціях зазвичай споруджуються трансформаторні підстанції з двома трансформаторами типу 110/6 кВ, що забезпечені механізмами керування напругою під навантаженням.

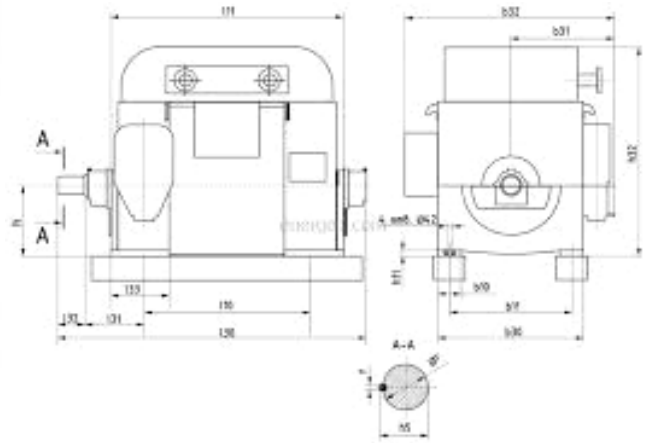


Рисунок 19 - асинхронний трифазний вибухозахищений двигун

Кожен електродвигун підключається окремим фідером до розподільного пристрою підстанції з напругою 6 кВ. Сучасні підстанції проектуються і будуються як автоматизовані об'єкти, що функціонують без постійного присутності обслуговчого персоналу. У подібних випадках широко впроваджується система дистанційного моніторингу та захисту обладнання.

У певних ситуаціях для приводу центробіжних насосів можуть використовуватися газотурбінні двигуни. Цей тип двигунів вирізняється компактними габаритами, високою питомою потужністю, швидкістю запуску та зручністю автоматизації і дистанційного керування [3].

Таблиця 2.1 - Номінальні дані вибраного двигуна

Найменування параметра, одиниця виміру	Чисельне значення
Номінальна потужність, кВт	8000
Номінальна лінійна напруга на обмотці статора АД, В	10000
Частота обертання, об/хв	2985
ККД, %	97,5
Маса, кг	14650
Коефіцієнт потужності асинхронного двигуна	0,89
Коефіцієнт кратності пускового струму АД, Кі	5,8
Ковзання, %	0,5
Струм статора, А	532
Кратність максимального крутного моменту, в.о.	2,2
Кратність пускового обертового моменту, в.о.	0,8

Характеристики двигуна 4АЗМП-8000/10000 Х1 УХЛ4. Асинхронний трифазний вибухозахищений двигун серії 4АЗМП розроблено для приводу стаціонарних центробіжних насосів, компресорів, нагнітачів та інших високошвидкісних механізмів у вибухонебезпечних зонах приміщень усіх класів (за винятком вибухонебезпечних зон зовнішніх установок класу В-ІІ).

Двигун функціонує у тривалому номінальному режимі S1 відповідно до ГОСТ 183-74, працюючи від мережі змінного струму з напругою 10 кВ і частотою 50 Гц. Встановлена синхронна частота обертання становить 3000 обертів на хвилину.

Механічні характеристики асинхронного двигуна при частотному регулюванні швидкості для різних завдань управління наведено на Рисунок 20. За вибухозахищеністю двигуни мають виконання IP54, а кліматичне виконання відповідає стандарту УХЛ4.

При управлінні об'єктами з постійним моментом статичного навантаження  $M_c = \text{const}$  напруга живлення повинна змінюватись пропорційно частоті  $U/f = \text{const}$ . У випадках, коли необхідно регулювання швидкості при постійній потужності  $P_c = \text{const}$ , застосовується закон  $U/\sqrt{f} = \text{const}$ . Якщо ж навантаження є обертовим, діятиме закон  $U/f^2 = \text{const}$ .

Загалом найбільше застосування отримує метод регулювання для механізмів із постійним моментом  $M_c = \text{const}$ . Водночас робота сучасних перетворювачів дозволяє використовувати будь-який із наведених законів регулювання залежно від конкретної задачі.

Зазначимо, що при зниженні частоти  $f$  збільшується критичне ковзання  $S_k$  через зменшення величини індуктивного опору  $x_k$ .

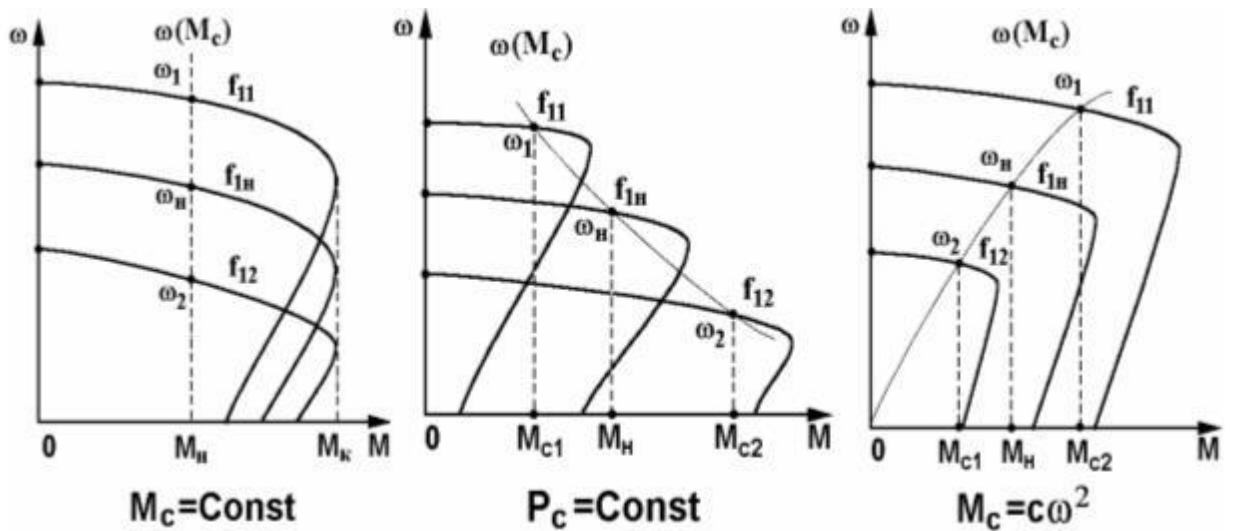


Рисунок 20 - Механічні характеристики асинхронного двигуна при частотному регулюванні швидкості для різних об'єктів керування

З виразу (2.3) критичне ковзання дорівнює

$$s_k = \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 \pm x_k^2}}$$

Критичний момент (максимальний)  $M_{к.д}$  двигуна у робочому режимі зменшується при зниженні частоти  $f$ , оскільки виникає необхідність знижувати напругу  $U$  на статорі. У генераторному режимі критичний момент  $M_{к.г}$ , навпаки, зростає, тоді як пусковий момент при зменшенні частоти спершу підвищується, досягаючи максимуму, а потім починає знижуватися. Зменшення моменту особливо помітне при низьких частотах і зумовлюється підвищенням відносного активного опору, а також ослабленням магнітного потоку через падіння напруги на статорі. Водночас збільшення напруги  $U$  на низьких частотах частково компенсує ці втрати.

На основі зазначеного, при застосуванні скалярного методу регулювання залежність між напругою живлення та частотою визначається характером навантаження на валу електродвигуна. У разі постійного моменту навантаження забезпечується стабільне співвідношення  $U/f = \text{const}$ , що дозволяє підтримувати максимальний момент двигуна незмінним. Однак на малих частотах, починаючи з певного рівня, максимальний момент двигуна починає

зменшуватися. Для компенсування цього ефекту та збільшення пускового моменту використовують підвищення рівня напруги живлення.

Якщо ж навантаження на вал є обертальним, підтримується інша залежність:  $U/f^2 = const$ . У цій ситуації максимальний момент також знижується при низьких частотах, але для обертального типу навантаження це не є критичним фактором.

З урахуванням описаних залежностей максимального моменту від напруги та частоти можна побудувати графік функціональної залежності  $U$  від  $f$  для кожного типу навантаження.

Однією з основних переваг скалярного методу регулювання є можливість одночасного керування групою електродвигунів. Цей метод достатньо ефективний для більшості практичних завдань в частотно-керованих електроприводах із діапазоном регулювання швидкості обертання до 1:40.

Області застосування скалярного методу включають енергетику, нафтовидобувну та нафтопереробну промисловості, гірничодобувну галузь, металургію й інші сектори економіки та побуту. Умови експлуатації пристроїв передбачають відповідність температурним умовам і вологості повітря за стандартом ГОСТ 15150-69. Використання у вибухонебезпечному середовищі, що може містити вибухонебезпечні суміші парів і газів з повітрям відповідно до ГОСТ 12.1.001-78, дозволено для усіх категорій і груп (Т1, Т2, Т3, Т4, Т5) у двигунах кліматичного виконання УХЛ4.

Рівень захисту двигунів відповідає ГОСТ 17494-72:

- оболонки двигунів – IP44;
- ввідного пристрою – IP55.

Охолодження двигунів проводиться повітрям із замкнутою системою вентиляції типу ICW37A71 згідно ГОСТ 20459-87. Для обдуву використовується вбудований охолоджувач повітря. Двигуни із замкнутою системою вентиляції застосовуються на висоті до 1000 м над рівнем моря і забезпечують номінальні робочі параметри при температурі охолоджувальної води від +30 °С до +33 °С.

Конструктивні особливості двигунів включають наявність статора, ротора, щитів підшипників, високовольтного вводного пристрою та водяного охолоджувача повітря. Підшипники щитові з ковзними посадковими елементами. Система змащування підшипників — автономна кільцева.

Виходячи з довідкових даних

$$s_H = \frac{n_1 - n_H}{n_1}, \quad (2.2)$$

$$n_1 = \frac{60 \cdot f_1}{p} = \frac{60 \cdot 50}{1} = 3000 \text{ об/хв}, \quad (2.3)$$

$$n_H = n_1 \cdot (1 - s_H) = 3000 \cdot (1 - 0,005) = 2985 \text{ об/хв}, \quad (2.4)$$

$$\omega_H = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_H}{60} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 2985}{60} = 312 \text{ 1/с}, \quad (2.5)$$

Номинальний момент дорівнює

$$M_H = \frac{P_H}{\omega_H} = \frac{8000 \cdot 10^{-3}}{312} = 25640 \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (2.6)$$

Момент статичний є вентиляторним,

$$M_C = M_H \cdot \left(\frac{\omega_C}{\omega_H}\right)^2, \quad (2.7)$$

$$P_C = M_H \cdot \omega_C, \quad (2.8)$$

$$M_C = M_H \cdot \left(\frac{\omega_C}{\omega_H}\right) \cdot \omega_C, \quad (2.9)$$

$$M_C = \frac{P_C}{\omega_C}, \quad (2.10)$$

$$\frac{P_C}{\omega_C} = M_H \cdot \left(\frac{\omega_C}{\omega_H}\right)^2. \quad (2.11)$$

Виведемо швидкість, що встановилася, при статичному моменті  $\omega_C$

$$\omega_C = \sqrt[3]{\frac{P_C \cdot \omega_H^2}{M_H}} = \sqrt[3]{\frac{6100 \cdot 10^3 \cdot 312^2}{25.6 \cdot 10^3}} = 285.2 \text{ с}^{-1}. \quad (2.12)$$

Тоді статичний момент дорівнює

$$M_C = M_H \cdot \left(\frac{\omega_C}{\omega_H}\right)^2 = 25.6 \cdot 10^3 \cdot \left(\frac{285.2}{312}\right)^2 = 21390 \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (2.13)$$

$$\lambda = \frac{M_{\text{доп}}}{M_{\text{н}}} , \quad (2.14)$$

$$M_{\text{доп}} = \lambda \cdot M_{\text{н}} = 2,2 \cdot 25640 = 56408 \text{ Н} \cdot \text{м} ,$$

$$M_{\text{макс}} = M_{\text{н}} + M_{\text{дин}} . \quad (2.15)$$

Так як режим роботи тривалий з постійним навантаженням, то  $M_{\text{дин}} = 0$

$$M_{\text{макс}} = M_{\text{с}} = 21390 \text{ Н} \cdot \text{м} .$$

Умова перевантажувальної здатності

$$M_{\text{макс}} < M_{\text{доп}} .$$

умова виконується, двигун пройшов перевірку з перевантаження.

### 2.3 Вибір та опис перетворювача частоти

Статичні перетворювачі частоти складаються з випрямляча В, інвертора І та блоку управління (Рисунок 21). Випрямляч виконує функцію перетворення змінного струму на постійний, який може бути або керованим, або некерованим. На виході випрямляча формується постійна напруга, що подається на інвертор, який складається з високошвидкісних ключів, що працюють у режимі тригера.

Якщо випрямляч є керованим, то величина вихідної напруги перетворювача визначається напругою на його виході, а частота – частотою комутуючої напруги. У разі використання некерованого випрямляча як рівень напруги, так і її частота визначаються параметрами інвертора.

На даний момент застосовуються три типи частотних перетворювачів:

- із прямим зв'язком (НПЧ);
- із проміжною ланкою постійного струму та автономним інвертором напруги (ПЧІН);
- із проміжною ланкою незмінного струму та автономним інвертором струму (ПЧІТ).

Особливістю навантаження ПЧІН є активно-індуктивний характер, тоді як для ПЧІТ характерне активно-ємнісне навантаження. У випадку активно-ємнісної природи навантаження з'являється реактивний опір  $X_c$ , що сприяє

зменшенню загального опору  $X$ , забезпечуючи більшу механічну інерцію системи.

Окрім цього, ПЧІН має вищу стійкість до змін навантаження порівняно із ПЧІТ. Система, яку розглядаємо, є розімкненою – відсутній зворотний зв'язок, що унеможливує контроль помилки в роботі.

Однак у ПЧІТ спостерігаються значні стрибки струму, що скорочує термін служби пристрою.

Зробивши висновки з цієї інформації, можна стверджувати, що за заданими параметрами найбільш відповідним вибором є ПЧІН. Принципова схема силових ланцюгів перетворювача частоти наведена на Рисунок 21.

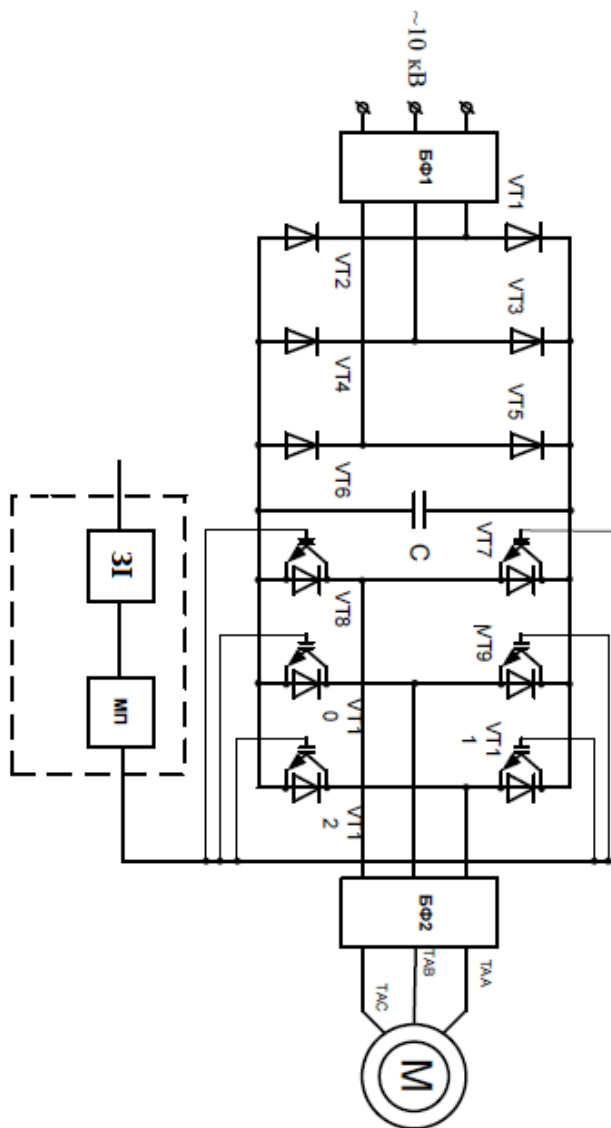


Рисунок 21- Принципова схема силових ланцюгів ПЧ

Високовольтні частотні перетворювачі СТА-В9.HVI призначені для керування асинхронними електричними двигунами потужністю 315 кВт – 10000 кВт (див. Рисунок 22).



Рисунок 22- Частотний перетворювач

Силова частина високовольтних частотних перетворювачів СТА-В9.HVI побудована на сучасних високовольтних силових напівпровідникових приладах IGBT. Функціональна схема перетворювачів СТА-В9.HVI представлена на Рисунок 23.

Використання високовольтних IGBT спрощує конструкцію електродвигуна, що дозволяє зменшити кількість силових напівпровідникових елементів в інверторі. Скорочення кількості компонентів безпосередньо сприяє підвищенню надійності роботи всього електропривода. Підключення високовольтних частотних перетворювачів здійснюється без необхідності використання зовнішніх трансформаторів для зниження чи підвищення напруги, а також додаткових фільтрів. Завдяки цьому високовольтні частотні перетворювачі СТА є більш компактними та енергоефективними, що зменшує втрати енергії.

Вхідні кола R, S, T підключаються к низкій трифазної напруги вторичної обмотки трансформатора, Рисунок 24.

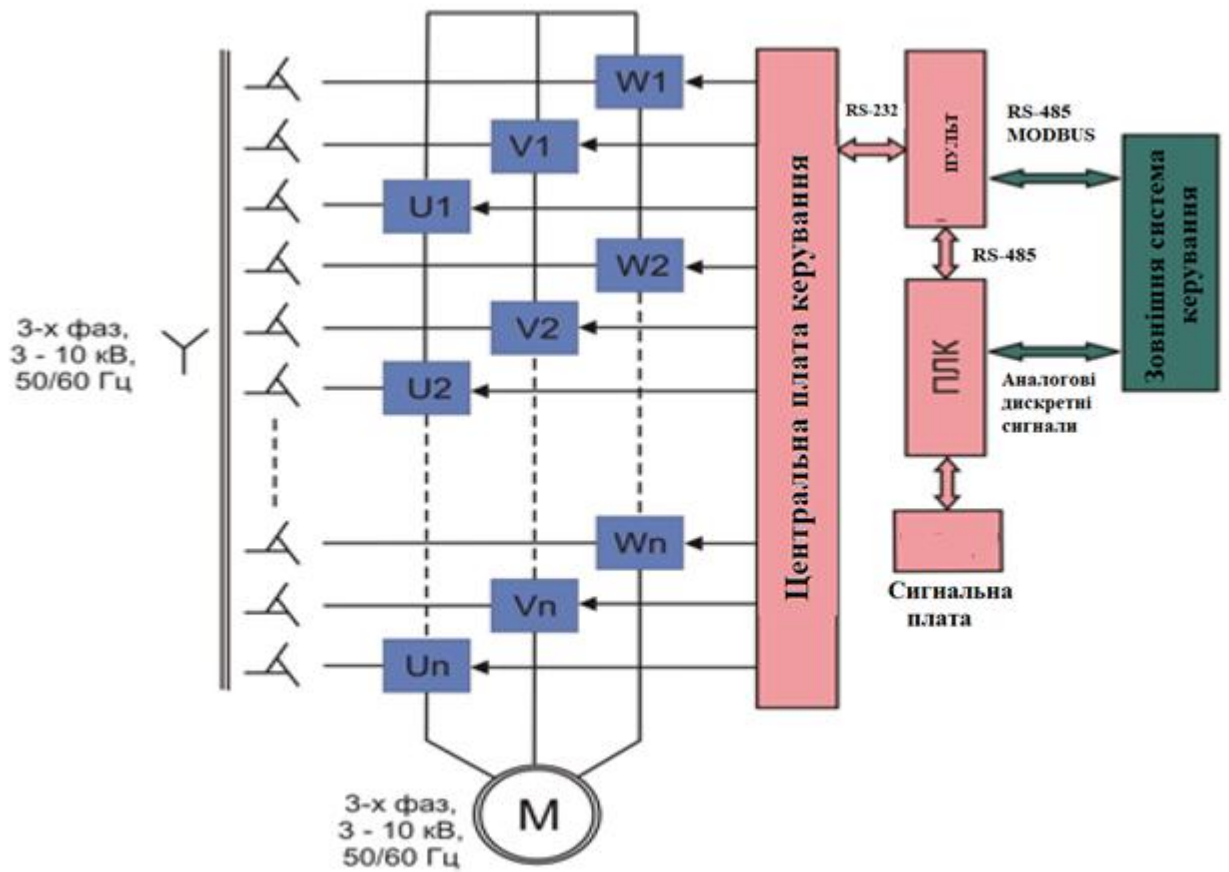
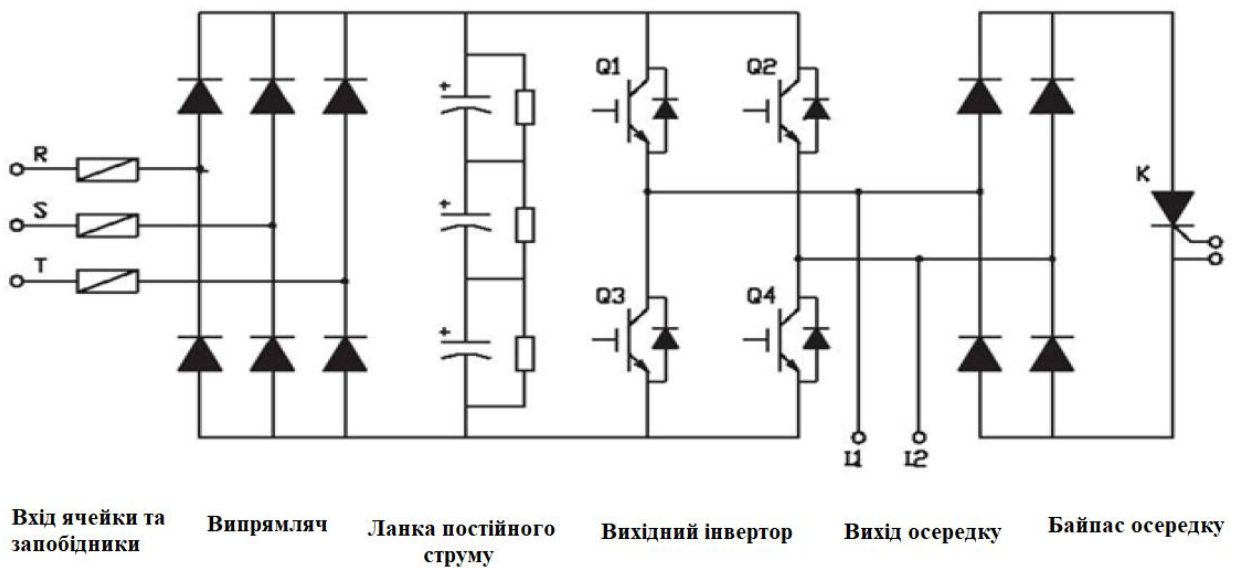


Рисунок 23- Загальна функціональна схема високовольтного перетворювача частоти СТА-В9.HVI



Вхід ячейки та запобідники    Випрямляч    Ланка постійного струму    Вихідний інвертор    Вихід осередку    Байпас осередку

Рисунок 24- Функціональна схема силового осередку

Напруга від трансформатора проходить через трьохфазний діодний випрямляч, заряджаючи конденсатори. Накопичена електрична енергія конденсаторів використовується однофазним мостом, утвореним IGBT-транзисторами Q1–Q4, для створення ШІМ напруги на виходах L1 і L2.

Силовий блок, отримавши через оптоволоконний кабель команду на відкриття чи закриття транзисторів Q1–Q4, регулює ширину імпульсу вихідної напруги однієї фази, використовуючи метод векторного керування (PWM). Кожна фаза може мати лише три можливі рівні вихідної напруги: якщо відкриті Q1 та Q4, то вихідна напруга L1 і L2 дорівнює 1; якщо відкриті Q2 та Q3 — вона дорівнює -1; якщо відкриті Q1 і Q2 або Q3 і Q4 — напруга L1 і L2 дорівнює 0.

Крім того, силові блоки оснащені функцією "байпасу". У разі виникнення несправностей, таких як ушкодження запобіжника, поломка або перегрів IGBT-транзисторів, через які подальше функціонування неможливе, в проблемному силовому блоці, а також у двох інших блоках тієї ж групи (що працюють з ним у двох інших фазах), автоматично активується "байпас". При цьому транзистори Q1–Q2 блокують вихід, тиристор К відкривається, і передається сигнал про включення байпасу. Ідеальна форма вихідної напруги забезпечує точність синусоїди в межах 4% (див. рисунок 2.6).

Високовольтний частотний перетворювач СТА-В9.HVI відповідає стандарту IEEE 519-1992 щодо допустимих гармонічних спотворень напруги та струмів, що гарантує високу ступінь захисту стороннього обладнання від негативного впливу гармонік й усуває потребу встановлення дорогих гармонічних фільтрів.

Оптимізована топологія високовольтних частотних перетворювачів СТА-В9.HVI забезпечує синусоїдальність вихідної напруги з такими перевагами:

- повна сумісність з асинхронними електродвигунами з короткозамкненим ротором без втрат потужності;
- режим низького шуму під час роботи електродвигуна;
- відсутність додаткового навантаження на ізоляцію електродвигуна;

- практично необмежену довжину сполучних кабелів.



Рисунок 25- Криві характеристик роботи приводу

12-дюймовий кольоровий сенсорний ЖК-монітор, встановлений на високовольтних частотних перетворювачах СТА-В9.HVI, забезпечує текстову та графічну індикацію, а також відображає стан роботи приводу. Додатково передбачена функція збереження та перегляду історії помилок (понад 100 записів) і можливість блокування сенсорного екрану. У разі використання перетворювача в системі замкнутого регулювання, параметри ПД-регулятора можуть коригуватися в реальному часі. Інтуїтивно зрозумілий інтерфейс нагадує той, що звикли бачити користувачі ОС Windows.

Основні переваги високовольтних частотних перетворювачів СТА-В9.HVI включають:

- ПД-регулятор;
- вбудований інтерфейс RS-485 ModBus;
- високий коефіцієнт корисної дії— понад 96%;
- низький рівень гармонік у мережі;
- оптоволоконний зв'язок між силовою та логічною частинами;
- контроль несправностей і аварійних ситуацій у системі;
- відповідність міжнародним стандартам і специфікаціям EN (IEC), ANSI, CSA, VDE, BS, CE, NEMA, UL, IEEE.

Метод керування: АС-DC-АС&DC ШІМ.

Перевантажувальна здатність: 120% (1 хв), 150% (2 с), 160% (миттєвий захист). Моделі з розширеною перевантажувальною здатністю: 150% (1 хв), 180% (2 с), 200% (миттєвий захист).

За захисними функціями передбачено: захист від перевантаження струмом, надмірного навантаження, короткого замикання, фазового дисбалансу, короткочасного зникнення напруги живлення, втрати вхідної або вихідної фази, перенапруги, низького рівня напруги, перегріву, зупинку через зовнішню помилку, а також автоматичний байпас силової ячейки (див. таблицю 2.2).

Таблиця 2.2 - Технічні дані для ПЧ типу СТА-В9.НVI-10кВ

Параметр	Одиниця вимірювання	Значення
Повна потужність	кВА	12ТОВ
Номінальна потужність	кВт	10000
Вихідний струм	А	580
Вага	кг	<22300
Вхідний коефіцієнт потужності	-	>0.97
ККД	%	>96

Нижче наведено схеми підключення електродвигунів нафтоперекачувальної станції та схема підключення високовольтних частотних перетворювачів СТА-В9.НVI, малюнки 2.8 та 2.9 відповідно.

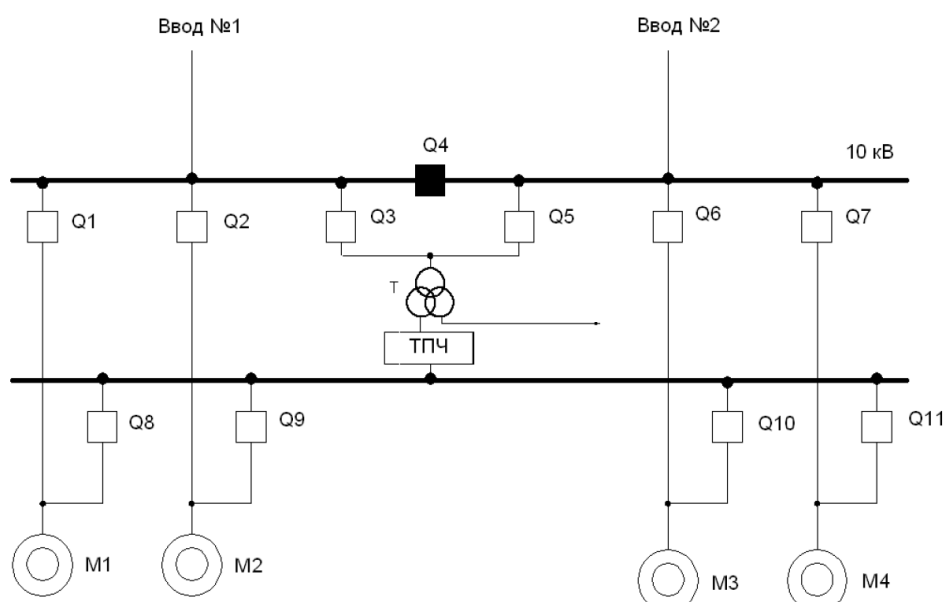


Рисунок 26 - Схема підключення електродвигунів НПС

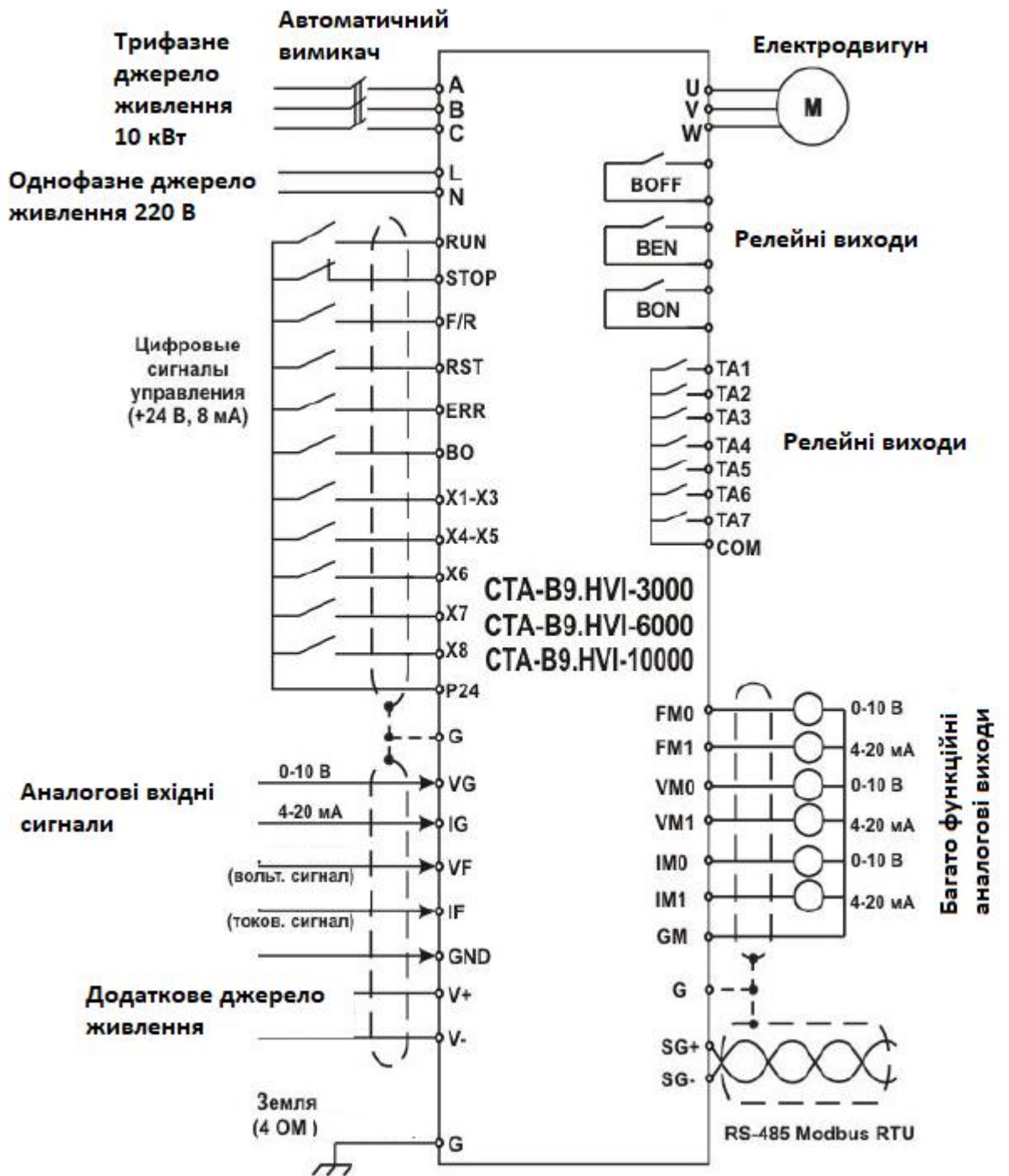


Рисунок 27 - Схема підключення високовольтних частотних перетворювачів STA-B9.HVI

## 3 РОЗРАХУНОК ТА АНАЛІЗ ДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ РОЗІМКНУТОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

### 3.1 Структурна схема системи ПЧ-АД-ЦБН

Перехідним процесом є режим роботи електродвигуна при переході з одного номіналу в інший, з наступним зміною його струму, моменту, частоти.

При цьому рівняння рівноваги має вигляд

$$M_{\text{двиг}} = M_c + J \cdot \frac{d\omega}{dt} . \quad (3.1)$$

У математичному визначенні ми маємо право враховувати список електромагнітної сталої часу та аналізувати перехідні процеси як електричні та механічні. Це виправдано, оскільки асинхронний електродвигун, що працює від перетворювача частоти, функціонує виключно на лінійних ділянках механічних характеристик.

$$\omega = \omega_{0.н} \cdot \alpha + \Delta\omega , \quad (3.2)$$

де  $\omega_{0.н}$  – швидкість ідеального холостого ходу при частоті  $f$ , що дорівнює номінальної частоти  $f_n$ ;  $\alpha = f / f_n$  – відносна частота напруги живлення;  $\Delta\omega$  – статичне падіння швидкості.

Оскільки в системі "перетворювач частоти – асинхронний двигун" електродвигуни працюють лише при ковзанні, яке не перевищує критичного значення, доцільно застосовувати математичний опис лінійної ділянки характеристики. Це описання можна подати у наступному вигляді

Оскільки на робочій ділянці характеристики двигуна в системі ПЧ-АД мають паралельний характер, статичне зниження швидкості при заданому моменті навантаження ( $M_c$ ) є сталим. Таким чином, рівняння (3.2) набуває вигляду

$$\omega = \omega_{0.н} \cdot \alpha + K \cdot M , \quad (3.3)$$

де  $K$  – коефіцієнт пропорційності між  $M$  та  $\Delta\omega$ .

Цей коефіцієнт можна задати, виходячи з таких міркувань: він є постійним для будь-якої точки характеристики, у тому числі і для точки

номінального режиму на природній характеристиці, тобто (3.3) можна висловити

$$\omega = \omega_{0.H} \cdot \alpha + K \cdot M_H , \quad (3.4)$$

З (3.4) після алгебраїчних перетворень отримуємо

$$K = \omega_{0.H} \cdot \frac{S_H}{M_H} . \quad (3.5)$$

Вставляємо в (3.3) замість  $\omega$  його значення з (3.5) і після змін алгебри отримуємо математичний опис моменту двигуна на лінійних ділянках механічних характеристик

$$M = (\omega_{0.H} \cdot \alpha - \omega) M_H / s_H \cdot \omega_{0.H} . \quad (3.6)$$

Далі математичний опис доцільно вести у відносних одиницях (тут відносні величини позначаються значком \*); як базові використовуються:  $M_H$ ,  $\omega_{0.H}$ ,  $f_H$ .

Тоді (3.6) набуває вигляду

$$M^* = (\alpha - \omega^*) / s_H . \quad (3.7)$$

З рівняння руху електроприводу отримуємо

$$M = M_c + T_M (M_{кн} / \omega_{0.H}) (d\omega / dt) , \quad (3.8)$$

де  $T_M = J \cdot \omega_{0.H} / M_{кн}$  - електромеханічна постійна часу;  $M_{кн}$  - критичний момент на характеристиці при  $f = f_H$ .

Уявимо (3.8) у відносних одиницях

$$M^* = M_c^* + T_M (M_{кн} / M_H) (d\omega^* / dt) . \quad (3.9)$$

Тут  $M_{кн} / M_H = \lambda$  - перевантажувальна здатність двигуна. Причому закон спільного переходу частоти і напруги змінника береться саме з умови взяття постійної перевантажувальної особливості при різній формі залежно від швидкості статичного моменту, тобто для всіх дійсно можливих режимів ця величина залишається постійною. Тобто (3.9) можна записати

$$M^* = M_c^* + T_M \lambda (d\omega^* / dt) . \quad (3.10)$$

Посчитаєм из (3.10)  $d\omega^* / dt$  и представим полученное уравнение и (3.7) в операторной форме

$$\omega^*(p) = (M^*(p) - M_c^*(p)) / \lambda \cdot T_m \cdot p. \quad (3.11)$$

$$M^*(p) = (\alpha(p) - \omega^*(p)) / s_n. \quad (3.12)$$

На базі (3.11), (3.12) побудовано структурну схему асинхронної машини при її роботі на прямолінійних ділянках механічних характеристик, наведену на рисунку 3.1

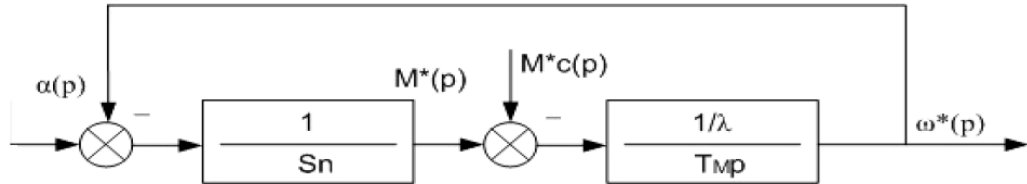


Рисунок 28 - Структурна схема асинхронної машини

Як зазначалося раніше, перетворювач частоти складається з випрямляча та інвертора, послідовно з'єднаних між собою. Якщо, згідно з [6], уявити їх як аперіодичні ланки з постійними часу  $T_b$  та  $T_i$  відповідно, то передаточна функція  $W_{\Pi}(p)$  перетворювача матиме такий вигляд

$$W_{\Pi}(p) = K_{\Pi} / [(T_b + 1)(T_i p + 1)], \quad (3.13)$$

де  $K_{\Pi}$  - коефіцієнт посилення ПЧ.

Після перетворення алгебри (3.13) можна записати

$$W_{\Pi}(p) = K_{\Pi} / (T_b \cdot T_i p^2 + T_b p + T_i p + 1). \quad (3.14)$$

Як перераховувалося вище, стала часу випрямляча  $T_b = 0,01$  с, а величина постійної часу інвертора визначається його конструкцією.

Якщо інвертор побудований з урахуванням тиристорних ключів, його постійна часу  $T_i = 0,01$ , якщо - з урахуванням транзисторів, його можна вважати безінерційним ланкою з постійної часу рівної нулю. Якщо  $T_i = 0,01$ , то  $T_b \cdot T_i = 0,0001$  с. Цією величиною можна знехтувати і тоді

$$W_{\Pi}(p) = K_{\Pi} / [(T_b + T_i) \cdot p + 1]. \quad (3.15)$$

Отже,

$$W_{\Pi}(p) = f(p) / U_3 = K_{\Pi} / [(T_b + T_i) \cdot p + 1]. \quad (3.16)$$

Покажемо у відносних одиницях, де основним значенням  $U_3 \in U_{3н}$ , при якому на виході перетворювача існує напруга з частотою  $f_{н}$ , що дорівнює номінальній. Знаючи, що в режимі  $U_{3н} \cdot K_{\Pi} = f_{н}$ , що отримується, отримуємо

$$\alpha(p) = U^*(p) / [(T_B + T_I) \cdot p + 1]. \quad (3.17)$$

На підставі (3.17) з урахуванням схеми малюнок 3.2 будується структурна схема розімкнутої системи ПЧ-АТ, наведена малюнку 3.2

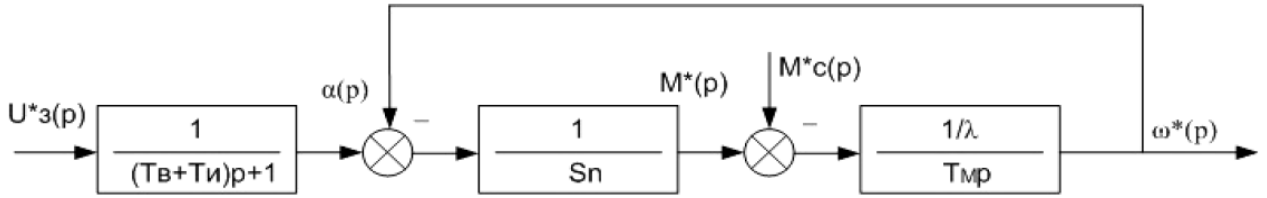


Рисунок 29- Структурна схема системи ПЧ-АД-ЦБН

Ця система описується такими диференціальними рівняннями:

$$\frac{d\omega^*}{dt} = \frac{M^* - M_c^*}{\lambda \cdot T_M}, \quad (3.18)$$

$$M^* = \frac{\alpha - \omega^*}{s_H}, \quad (3.19)$$

$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{U_c^* - \alpha}{T_A + T_E}, \quad (3.20)$$

де  $\omega^* = \omega / \omega_{0,н}$  – відносна швидкість;

$\omega_{0,н}$  – швидкість ідеального холостого ходу за частоти  $f = f_H$ ;

$M^* = M / M_H$  – відносний момент;

$\alpha^* = f / f_H$  – відносна частота;

$U_{3}^* = K_3 \cdot t$ , де  $K_3 = 1/t_n$  – коефіцієнт швидкості зміни частоти вихідної

напруги перетворювача;

$s_H$  – номінальне ковзання асинхронної машини.

### 3.2 Розрахунок та побудова кривих перехідних процесів у розімкнутої системи електроприводу

Порахуємо основні елементи структурної схеми, зображеної на **Ошибка!**

**Источник ссылки не найден.**

$T_B$  - постійна часу випрямляча,  $T_B = 0,01$  с.

$T_I$  - постійна часу інвертора, що визначається його конструкцією.

Так як у використовуваному ПЧ інвертор побудований на тиристорах, то

$T_I = 0,01$  с.

$T_M$  - електромеханічна постійна часу дорівнює

$$T_M = J_{\text{ДВ}} \cdot \frac{\omega_0}{M_{\text{кз}}} \quad (3.21)$$

$$M_{\text{кз}} = 0,9 \cdot M_{\text{н}}, \text{ де } M_{\text{н}} = P_{\text{н}} / \omega_{\text{н}},$$

$$M_{\text{н}} = 8000 / 312 = 25,6 \text{ кН} \cdot \text{м},$$

$$M_{\text{кз}} = 0,9 \cdot 25,6 = 23,04 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

$$T_M = 14 \cdot \frac{312}{4630} = 0,94 \text{ с}.$$

Далі виконується побудова функціональної схеми у програмному середовищі MATLAB Simulink, підставляючи отримані числові значення. Блок-схема програми, що забезпечує плавний пуск з режимами скидання та додавання навантаження, зображена на **Ошибка! Источник ссылки не найден..**

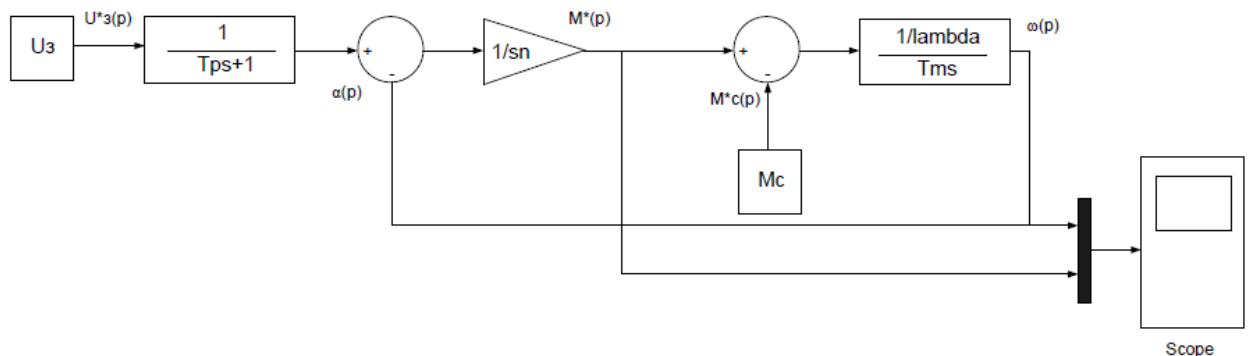


Рисунок 30 - Віртуальна схема моделі системи ПЧ-АД-ЦНБ для здійснення плавного пуску в середовищі MATLAB Simulink

У блоці  $U_3$  генерується напруга завдання, а блок  $M_c$  реалізує квадратичну залежність статичного моменту від частоти. Передаточні функції  $1/Tr_s+1$  і  $(1/\lambda)/T_{ms}$  виступають проміжними елементами, які на виході формують відповідно частоту й швидкість (у відносних одиницях). Аналоговий підсилювач представлений як  $1/sn$ . Швидкість та сумарний момент електричних двигунів виводяться на осцилограф Scope для аналізу.

У розробленій системі будуємо криві перехідних процесів, які відображають плавний пуск електричних двигунів, з врахуванням режимів

набросу та скидання навантаження. Графічні дані наведені на Рисунок 31 та Рисунок 32.

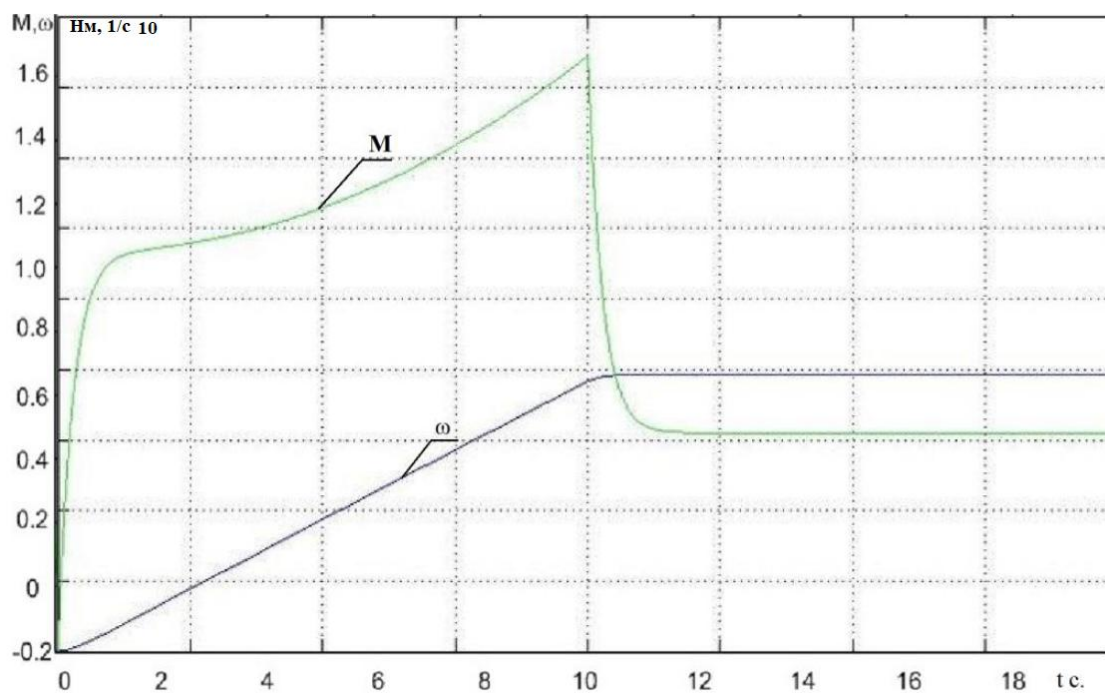


Рисунок 31 - Криві перехідного процесу плавного пуску двигуна

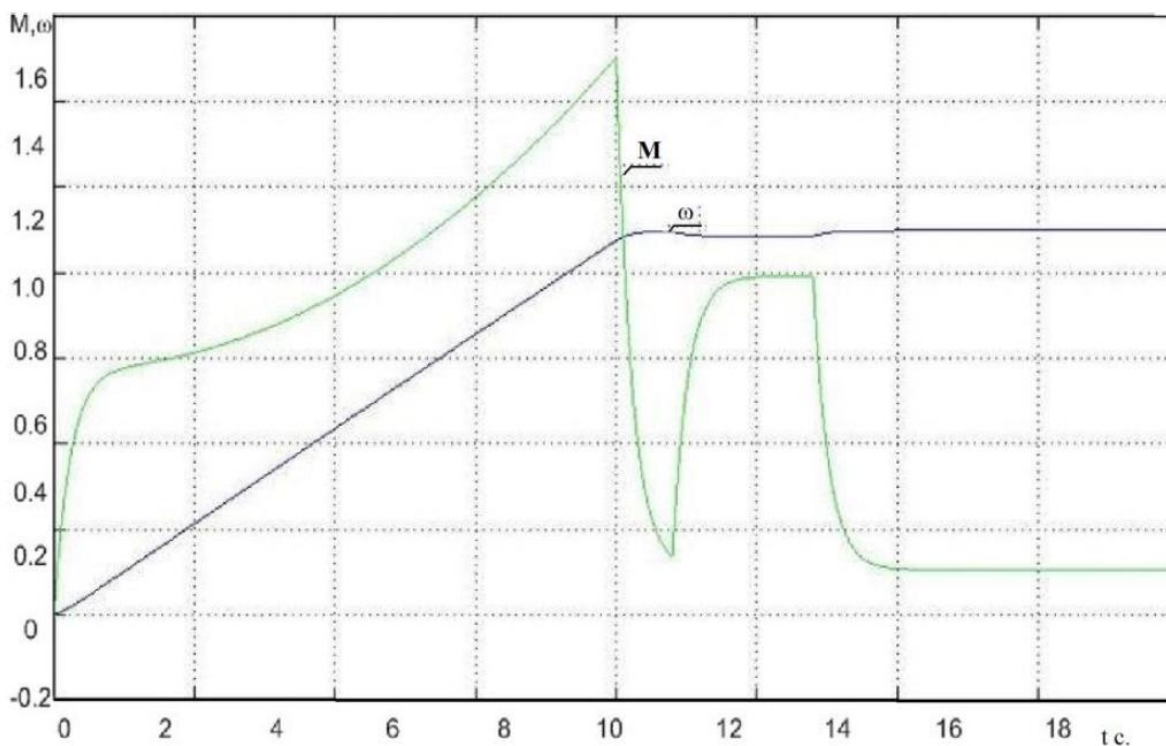


Рисунок 32 - Криві перехідного процесу накидання та скидання навантаження

## 4 ОХОРОНА ПРАЦІ

### 4.1 Загальні питання

Об'єкти НПС, як джерела небезпеки, належать до категорії надзвичайної небезпеки. Під час монтажу, експлуатації та ремонту перетворювача частоти на НПС можуть виникнути численні небезпечні чинники, такі як ураження електричним струмом, вибухи, пожежі чи забруднення довкілля.

З метою створення безпечних умов праці при використанні електропривода необхідно описати шкідливі речовини, які присутні на НПС відповідно до ГОСТ 12.1.007-99 ССБТ «Шкідливі речовини. Класифікація та загальні вимоги безпеки».

Таблиця 4.1 – Шкідливі та пожежовибухонебезпечні властивості сировини та використовуваних продуктів

Найменування Речовини	Клас небезпеки ГОСТ 12.1.007-99	Температура самозаймиста я, °С	Межі займання, % обсяг		ГДК у повітрі робочої зони, мг/м <sup>3</sup>
			нижній	верхній	
Бензин «Регуляр-92»	4	+255...+370	1	6	100
дизельнепаливо ДТ-Л	4	+210(+300)	0,52	2-3	300
дизельнепаливо ДТ-З	4	+225(+310)	0,61	2-3	300

Приміщення електрзалу НПС відокремлене від насосного залу негорючою перегородкою (брандмауером). Схема приміщення наведена на **Ошибка! Источник ссылки не найден.**, де: 1 – перший електродвигун; 2 –

перший насос; 3 – брандмауер; 4 – вал, що з'єднує електродвигун із насосом; 5 – двері.

У розподільній стіні в місцях стику електродвигунів і насосів встановлюється спеціальне обладнання для забезпечення герметичності (діафрагми з камерами безвального з'єднання).

У приміщенні електрозалу підтримується надлишковий тиск повітря в діапазоні 0,4–0,67 кПа. Завдяки цьому потік повітря з електрозалу переходить у машинний зал через технологічні отвори в місцях з'єднання електродвигуна з насосом. Наявність надлишкового тиску перешкоджає проникненню газів із насосного залу в приміщення електрозалу, тому електродвигуни встановлюються у нормальному виконанні.

Насосний зал займається перекачуванням нафтових продуктів, що створює ризик впливу на людину парів цих речовин. Потрапляння парів нафтових продуктів у повітря робочої зони може призвести до травмування.

Присутність у виробничому середовищі вибухопожежонебезпечних газів, парів, рідин та речовин також становить потенційну небезпеку. Відповідно до ГОСТ 12.1.011-91, вибухонебезпечні суміші в насосному залі відносяться до категорії ПА і групи ТЗ.

У таблиці 4.2 наведено характеристику приміщень НПС за їх пожежовибухонебезпечністю.

Таблиця 4.2 – Класифікація приміщень за вибухопожежною небезпекою

Найменування	Категорія виробництва	Клас
виробництв та споруд	(НВБ 105-03)	вибухопожежонебезпеки (ПУЕ)
Насосні для перекачування нафти	А	В-1а
Зал Електродвигунів	Д	-

Відповідно до ГОСТ 12.1.019-96, зал електродвигунів належить до приміщень із підвищеним рівнем небезпеки ураження людей електричним

струмом. Виділимо небезпечні та шкідливі фактори, які можуть несприятливо впливати на здоров'я працівників, що виникають під час монтажу, експлуатації та ремонту електродвигунів та іншого електрообладнання в окремому приміщенні — електрозалі. Наслідки впливу таких факторів можуть призвести до травм, зниження працездатності та професійних захворювань. Розглянемо потенційні небезпечні та шкідливі фактори:

- Ураження електричним струмом при попаданні під напругу понад 1000 В — це можливо під час обслуговування основних електродвигунів та інших електроустановок через порушення ізоляції високовольтних кабелів або неправильну подачу напруги при проведенні ремонтних робіт на електродвигуні, а також у разі пробою ізоляції кабелю.

- Ураження електричним струмом при попаданні під напругу до 1000 В — можливо при обслуговуванні електрообладнання напругою до 1000 В (наприклад, тиристорного збуджувального пристрою) без відключення напруги через випадковий дотик до струмопровідних частин або порушення ізоляції кабелів і проводів.

- Пожежна небезпека системи мастила підшипників ковзання двигунів.

- Ризик отримання механічних травм працівниками, наприклад, унаслідок дотику до рухомих частин двигунів.

- Пожежонебезпечні ситуації, що виникають через коротке замикання в електродвигунах та іншому електрообладнанні.

- Великі фізичні зусилля та нервові перенапруження при ліквідації аварійних ситуацій чи переміщенні тяжких предметів в електрозалі.

- Вплив шуму та вібрації від роботи основних електродвигунів. Шум негативно діє на центральну нервову систему, призводить до втомлюваності та притуплення слуху. Тривалий вплив вібрацій може викликати вібраційну хворобу та втрату працездатності.

- Незадовільне освітлення електрозалу у темний період доби (відповідно до СНіП 23-05-95), що спричиняє підвищену втому, уповільнення реакції та

збільшення ризику травм. Невірною експлуатацією освітлювальних установок може стати причиною пожежі або нещасних випадків.

- Метеорологічні умови на робочому місці визначаються температурою повітря, відносною вологістю, швидкістю руху повітря, барометричним тиском та інтенсивністю теплового випромінювання від нагрітих поверхонь.

Зважаючи на наведене, існує необхідність розробки комплексу заходів з метою забезпечення безпечних та нешкідливих умов праці.

Крім того, персонал, який обслуговує електроустановки, стикається з певними труднощами, небезпеками та шкідливими факторами, що негативно впливають на здоров'я людей, сприяючи зниженню їхньої працездатності та виникненню професійних захворювань:

- Наявність масляних насосів і баків мастила в електрозалі може стати причиною пожежі (характеристика мастила наведена у таблиці 4.3).

- Можливість проникнення в електрозал газоподібних продуктів нафтопереробки у разі аварійної ситуації, які здатні справляти отрую.

Таблиця 4.3 - Характеристики вибухонебезпечних сумішей

Характеристика	Найменування речовин		
	Метан CH <sub>4</sub>	Сира нафта	мін. Олія
ГДК у робочій зоні, мг/м <sup>3</sup>	(Взуття) 30,0	50	(Взуття) 0,05
Дія на організм	У великих кількостях має наркотичну дію	Має наркотичну дію	У великих кількостях має наркотичну дію
Температура спалаху, °C	-	35-45	200
Температура самозаймання, °C	537	270-320	380
Концентраційна межа вибуховості, %	5-15	1,26-6,5	1-4

Клас небезпеки	4	4	4
----------------	---	---	---

## 4.2 Заходи щодо забезпечення безпечних умов праці

### 4.2.2 Заходи з техніки безпеки.

З усіма працівниками, які приймаються на роботу, незалежно від їхньої освіти та кваліфікації за відповідною професією чи посадою, проводиться вступний інструктаж та інструктаж на робочому місці. Після завершення інструктажу особи, які вступають на роботу, складають іспит з техніки безпеки згідно з вимогами ПУЕ, ПБ 08-62403, ПТЕЕС, МПОТ РМ-016-2001, ТОІ Р-45-011-94 «Типова інструкція з охорони праці електромонтера з обслуговування електроустановок» і отримують посвідчення з присвоєною кваліфікаційною групою, яке дає їм право працювати з обслуговування діючих електроустановок.

Для забезпечення безпеки робіт в електрозалі НПС при монтажі, обслуговуванні та ремонті електродвигунів здійснюються такі заходи:

- Роботи повинні виконуватися за нарядом-допуском, оформленим на спеціальному бланку встановленого зразка, який визначає зміст, місце проведення робіт, час початку та закінчення, умови безпечного виконання, склад бригади та осіб, відповідальних за безпечне виконання робіт, згідно з вимогами.

- Перед початком робіт персоналу організації, яка здійснює технічне обслуговування або налагодження електроустаткування, проводиться цільовий інструктаж. Цей інструктаж має включати вказівки щодо безпечного виконання робіт на електроустановці.

- На період проведення робіт спеціалізованою організацією з обслуговування електроустаткування НПС МН наказом по НПС призначається особа з числа адміністративно-технічного персоналу, відповідальна за організацію робіт на об'єкті.

- Під час технічних робіт, пов'язаних із дотиком до струмопровідних або обертових частин електродвигунів і механізмів, що ними приводяться в рух, необхідно зупинити електродвигун і на його пусковому пристрої або ключі управління повісити табличку «Не вмикати. Працюють люди».

- Під час визначення технічного стану трансформаторів струму або їх вторинних кіл слід враховувати наступні заходи безпеки:

а) не використовувати шини первинних кіл як допоміжні струмопроводи;

б) підключати кола вимірювань і захисту до затискачів трансформаторів струму після завершення повної збірки схем;

в) при перевірці полярності прилади мають бути надійно підключені до затискачів вторинної обмотки до подачі імпульсу струму в первинну обмотку.

- Перед допуском персоналу до роботи на комутаційних апаратах (вимикачах, вимикачах навантаження, відокремлювачах, короткозамикачах, роз'єднувачах) із дистанційним управлінням для запобігання їх вмиканню необхідно:

а) вимкнути силові кола приводу, оперативні кола струму й кола підігріву;

б) усунути можливість подачі повітря в бак вимикачів або на пневматичні приводи та випустити повітря в атмосферу; при цьому спускні пробки (клапани) залишаються у відкритому положенні;

в) привести у неробочий стан включальний вантаж або включальні пружини;

г) розмістити таблички «Не вмикати. Працюють люди» на ключах дистанційного управління.

- Електротехнічний персонал має бути забезпечений засобами електрозахисту. Типовий набір електрозахисних засобів для праці з напругою понад 1000 В та до 1000 В наведено у таблиці 5.4

Таблиця 4.4- Типовий набір електрозахисних засобів при роботі з напругою вище 1000 В і до 1000 В

Основні електрозахисні засоби для ЕУ вище 1000 В	Основні електрозахисні засоби для ЕУ до 1000 В
ізолюючі штанги всіх видів	ізолюючі штанги всіх видів
ізолюючі кліщі	ізолюючі кліщі
показчики напруги	показчики напруги
пристрої та пристрої для забезпечення безпеки робіт при вимірюваннях та випробуваннях в електроустановках (показчики напруги для перевірки збігу фаз, кліщі електровимірювальні, пристрої для проколу кабелю тощо);	електровимірювальні кліщі
	діелектричні рукавички
спеціальні засоби захисту, пристрої та пристрої ізолюючі для робіт під напругою в електроустановках напругою 110 кВ і вище (крім штанг для перенесення та вирівнювання потенціалу).	ручний ізолюючий інструмент

#### 4.2.3 Заходи з промислової санітарії.

З усіма кандидатами, які працевлаштовуються, незалежно від рівня їх освіти та кваліфікації за відповідною професією чи посадою, проводяться вступний інструктаж та інструктаж безпосередньо на робочому місці. По завершенні інструктажу працівники, що направляються до виконання завдань, проходять екзамен з техніки безпеки відповідно до нормативних документів, таких як ПУЕ, ПБ 08-62403, ПТЕЕП, МПОТ РМ-016-2001, ТОІ Р-45-011-94 (Типова інструкція з охорони праці для електромонтера з обслуговування електроустановок). У разі успішного складання іспиту видається посвідчення із зазначенням присвоєної кваліфікаційної групи, що надає право на виконання робіт з обслуговування діючих електроустановок.

Для забезпечення безпеки виконання робіт у електрозалі НПС при монтажі, обслуговуванні та ремонті електродвигунів здійснюються такі заходи:

- Роботи повинні виконуватися за нарядом-допуском, оформленим на спеціальному бланку встановленої форми. У наряді визначають зміст, місце

виконання робіт, час їх початку та закінчення, умови безпечного проведення, склад бригади та відповідальних працівників. Усе це повинно відповідати чинним вимогам.

- Перед початком робіт персонал організації, яка проводить технічне обслуговування або налагодження електрообладнання, проходить цільовий інструктаж. Інструктаж повинен охоплювати вказівки щодо безпеки виконання робіт на енергоустановках.

- У період проведення робіт спеціалізованою організацією з обслуговування електрообладнання НПС МН наказом по НПС призначається відповідальна особа із числа адміністративно-технічного персоналу для організації робіт на об'єкті.

- Під час виконання технічних робіт, пов'язаних із дотиком до струмопровідних або рухомих частин електродвигунів чи механізмів, які вони приводять у рух, необхідно зупинити електродвигун. На його пусковому пристрої чи ключі управління слід розташувати плакат із написом "Не вмикати. Працюють люди".

- При оцінюванні технічного стану трансформаторів струму чи їх вторинних кіл слід застосовувати такі заходи безпеки:

а) не використовувати шини первинних кіл як допоміжні струмопроводи;

б) підключати кола вимірювання та захисту до затискачів трансформаторів струму після завершення зборки схем;

в) під час перевірки полярності прилади повинні бути надійно приєднані до зажимів вторинної обмотки до подачі імпульсу струму у первинну обмотку.

- Перед допуском до роботи з комутаційною апаратурою (вимикачами, вимикачами навантаження, від'єднувачами, короткозамикачами, роз'єднувачами) з дистанційним управлінням слід запобігти їх увімкненню:

а) виключити силові кола приводу, кола оперативного струму та кола підігріву;

б) припинити подачу повітря до баку вимикачів або на пневматичні приводи та випустити залишкове повітря в атмосферу, залишивши випускні клапани відкритими;

в) привести в неробочий стан включальний вантаж або пружини;

г) розмістити плакати "Не вмикати. Працюють люди" на ключах дистанційного керування.

Електротехнічний персонал повинен бути забезпечений електрозахисними засобами згідно з типовими наборами для роботи під напругою 1000 В.

#### 4.2.4 Пожежна безпека у залі електродвигунів НПС

У залі електродвигунів насосної станції (НПС) забезпечується виконання вимог, передбачених Правилами пожежної безпеки в Республіці Казахстан (ППБ-01-03). Для цього реалізуються наступні основні протипожежні заходи: будівлі та споруди розташовуються з урахуванням пожежних розривів, а зал електродвигунів ізольований від насосного залу газонепроникною (брандмауерною) стіною. До будівлі насосної станції передбачений пожежний проїзд на всій її довжині, мінімальна кількість евакуаційних виходів становить два. У системі зовнішнього пожежогасіння розроблено кільцевий водогін, обладнаний пожежними гідрантами із розташуванням кожного на відстані 150 метрів один від одного. Для внутрішнього пожежогасіння встановлено пожежні крани, на головному щиті та поруч із кожним краном розташовані кнопки ввімкнення і вимкнення пожежних насосів. Аварійна вентиляція активується автоматично за показниками відповідних газоаналізаторів.

Для захисту від атмосферного електричного розряду застосовуються блискавковідводи, відповідно до вимог стандарту СО 153-34.21.122-2003 «Інструкція з улаштування блискавковідводів для будівель, споруд та промислових комунікацій». Зал електродвигунів оснащений системою автоматичного пожежогасіння та пожежною сигналізацією. У випадку виникнення пожежі в двигунних відсіках інформація від пожежних датчиків активує систему пожежогасіння. Електричний імпульс надходить до

піропатронів клапанів відповідних розподільних пристроїв і одночасно до піропатронів балонних головок з огнегасними речовинами, відкриваючи їх. Углекислий газ через систему трубопроводів потрапляє до приміщення і розподіляється насадками, встановленими над обладнанням.

Експлуатація електроустановок забороняється у випадках порушення заземлення, несправності систем комутації та захисту або функціонування в режимах, що не відповідають технічним характеристикам обладнання. Для постійного моніторингу функціонування електродвигунів система вимірювань і автоматизації забезпечує контроль температури та стану системи змащування підшипників.

Зал електродвигунів укомплектований основними засобами пожежогасіння і пожежним інвентарем відповідно до чинних нормативних документів. Для оперативної реакції на пожежу використовуються вогнегасники марок ОПУ-5, ОПУ-10, асбестові полотна, жорсткововняний матеріал (войлок, кошма), а також пісок. Крім цього, присутній спеціальний пожежний щит із комплектом первинного обладнання та інструментів для гасіння: ящики для піску, цебра, бочки, ручки для лопат і сокир, футляри для кошми — все повинно бути забарвлено згідно з державним стандартом.

Екологічність проекту передбачає мінімізацію негативного впливу на оточуюче середовище під час експлуатації електрообладнання у залі електродвигунів НПС. У приміщенні встановлено великі двигуни, підшипники яких охолоджуються і змащуються маслом. Передусім необхідно уникати аварійних витоків мастильного матеріалу в екосистему. У зв'язку з необхідністю регулярної заміни масла актуально постає питання утилізації використаного продукту, адже його складування та захоронення на території підприємства недопустимі. Замість цього масло має транспортуватися до спеціалізованих приймальних пунктів для повторної переробки.

Для очищення електрообладнання від мастила, пилу та бруду під час обслуговування використовується ганчір'я.

Щоб уникнути забруднення навколишнього середовища, необхідно встановлювати спеціальні контейнери для збору відпрацьованого ганчір'я, після чого передавати його на утилізацію або переробку у спеціалізовані пункти.

Під час монтажу електрообладнання можуть залишатися обрізки проводів та кабелів. Їх також слід збирати та утилізувати належним чином.

Для освітлення приміщення зали електродвигунів використовуються лампи розжарювання та люмінесцентні лампи. Майже кожна люмінесцентна лампа містить пари ртуті.

Ртуть є основою для люмінофора, яким покриті лампи денного світла. Утилізувати відпрацьовані люмінесцентні лампи потрібно окремо від інших видів відходів, щоб не завдавати шкоди екології. Їх необхідно переробляти у спеціалізованих установах.

Загалом заходи, спрямовані на зменшення негативного впливу роботи електричного залу на екологію, зводяться до нормативної утилізації зазначених вище відходів.

#### 4.3 Розрахунок освітленості у залі електродвигунів

Оскільки обслуговуючому персоналу необхідно виконувати роботи з технічного обслуговування або налагодження електричного обладнання, важливо оцінити рівень освітленості на робочому місці.

Основним методом розрахунку загального рівномірного освітлення в електрозалі з горизонтальною робочою поверхнею є метод коефіцієнта використання світлового потоку.

Схема електрозалу подана на Рисунок 1. Суть методу полягає у визначенні світлового потоку однієї лампи, виходячи з умови досягнення нормативної освітленості. Далі, за розрахованим світловим потоком, визначають стандартну потужність ламп за довідковими даними.

Розрахунок світлового потоку проводиться за формулою:

$$\Phi = (E S k Z) / (n \eta), \quad (4.1)$$

де  $\Phi$  – світловий потік, лм;

$E$  – нормативна освітленість, лк;

$S$  – площа приміщення, м<sup>2</sup>;

$k$  – коефіцієнт запасу;

$Z$  – коефіцієнт мінімальної освітленості;

$n$  – кількість ламп;

$\eta$  – коефіцієнт використання світлового потоку.

На основі розрахованого світлового потоку  $\Phi$  вибирається найближча стандартна лампа. Якщо вибір ламп за світловим потоком ускладнений, коригується кількість ламп.

Розрахунок освітлення виконується для залу електродвигунів, який має такі розміри: довжина  $A = 24$  м; ширина  $B = 8$  м; висота  $H = 8$  м.

$$E = 400 \text{ лк}; k = 1,3; Z = 1,15; \eta = 0,52 . \quad (4.2)$$

Площа приміщення визначається за формулою:

$$S = A \cdot B = 24 \cdot 8 = 192 \text{ м}^2. \quad (4.3)$$

Розрахункова висота підвісу над рівнем робочої поверхні  $h$  обчислюється за формулою:

$$h = H - h_c - h_p = 8 - 0,8 - 0,8 = 6,4 \text{ м}, \quad (4.4)$$

де  $h_p$  – висота робочої поверхні;

$h_c$  – висота підвісу світильника.

Індекс приміщення визначається за формулою:

$$I = S / ((B + A) \cdot h) = 192 / ((24 + 8) \cdot 6,4) = 0,93 \quad (4.5)$$

Світловий потік розраховується за формулою (5.1).

$$\Phi = (400 \cdot 192 \cdot 1,3 \cdot 1,15) / 0,52 = 220800 \text{ лм}.$$

Для освітлення використовується тип світильників ЛХБ 65-4 зі світловим потоком  $\Phi_{\text{св}} = 3760$  лм. Кількість світильників обчислюють за формулою:

$$n = \Phi / \Phi_{\text{св}} = 220800 / 3760 = 58 \text{ шт.}$$

Таким чином, для забезпечення нормативних умов роботи передбачено штучне освітлення лампами розжарювання потужністю 65 Вт у кількості 58 штук. Крім цього, бажано передбачити наявність природного освітлення через його позитивний вплив на сприйняття і загальне самопочуття працюючих.

## ВИСНОВКИ

У бакалаврській роботі здійснено порівняльний аналіз існуючих автономних інверторів струму (АІС), що використовуються в потужних перетворювачах частоти (ПЧ), вироблених провідними світовими компаніями. Ці пристрої можуть застосовуватися в частотно-регульованих електричних приводах для транспортування нафти.

- У рамках роботи запропоновано використання перетворювача «типу СТА-В9.НVI-10кВ потужністю 1000 кВт. Представлено основні параметри та характеристики частотно-регульованого електропривода під час його експлуатації в умовах насосно-перекачувальної станції (НПС).

- Здійснено перевірочний розрахунок відповідності потужності двигуна, що підтверджує доцільність використання асинхронного двигуна моделі 4АЗМП-8000/10000 Х1 УХЛ4 потужністю 8000 кВт. Проведено розрахунки електромагнітної сумісності ПЧ із живильною мережею, а також аналіз відповідності продуктивності насосного агрегату вимогам магістрального нафтопроводу НПС.

- На основі моделювання в середовищі Simulink програмного комплексу MatLab виконано дослідження осцилограм, результати якого продемонстрували, що швидкість обертання колеса насоса та створюваний ним тиск відповідають показникам реальної системи ПЧ–АД–ЦБН з врахуванням зворотного зв'язку за швидкістю. Таким чином, розроблена віртуальна модель системи ПЧ–АД–ЦБН, до складу якої входить трифазний мостовий АІС із широтно-імпульсною модуляцією, короткозамкнений асинхронний двигун та центробіжний насос, є адекватною реальним процесам, що відбуваються у частотно-регульованому електроприводі. Модель може бути використана для дослідження, розробки та проектування частотно-регульованих електричних приводів на основі АІС.

Зазначені аргументи підтверджують стратегічну важливість частотно-регульованого електроприводу насосів як ефективного інструмента

енергозбереження та раціонального використання ресурсів у різних галузях, де застосовується трубопровідний транспорт.

- У межах роботи розглянуто способи та методи вирішення проблем енергозбереження при експлуатації насосних станцій для транспортування нафти, проаналізовано інтегральні параметри нафтопроводу й насосного обладнання при різних методах регулювання. Також розроблено технічні вимоги до насосних станцій для транспортування нафти.

- Окрему увагу приділено питанням забезпечення охорони праці обслуговуючого персоналу НПС.

## ПЕРЕЛІК ЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1 Білецький, Володимир Стефанович. Історія та перспективи нафтогазовидобування: навч. Посібник/В.С. Білецький, Г.І. Гайко, В.М. Орловський; нту "хпї", нтуу "кпї", хнумг. - 2-ге вид., Віпр. Та дод. -Львів: новий світ - 2000, 2019. - 302 с. - ISBN 978-617-7519-33-0.

2 Орловський, віталій Миколайович. Технологія розробки нафтових родовищ: навч. Посібник/в. М. Орловський, ст. С. Білецький, ст. Г. Вітрик; хнумг, нту "хпї". – львів: новий світ – 2000, 2020. – 244 с. – (вища освіта в Україні). - isbn 978-617-7519-55-2

3 Посилання: <https://gidromash.ua/ua/nasosi-promislova-grupa/nasosi-dlya-nafti/nasosi-dlya-nafti.html>

4 Електропривод: підручник/Ю.М. Лавріненко, О.С. Марченка, п.і. Савченко, О.Ю. Синівський, Д.Г. Войтюк, В.П. Лисеня; за ред. Ю.М. Лавріненка. Видавництво «ЛІРА-К». – К., 2009. – 504 с.

5 Марущак Я.Ю .синтез електромеханічних систем із послідовним та паралельним корегуванням: навчальний посібник. – львів, видавництво ну „львівська політехніка”, 2004. – 312 с.

6 Моделювання електромеханічних систем: підручник/[Чорний О.П., Луговий О.В., Родькін д.й., Сісук Г.Ю., Садовий О.В]. – Кременчук, 2001. – 410 с.

7 Півняк Г.Г. сучасні частотно – регульовані асинхронні електроприводи з широтно – імпульсною модуляцією: монографія / м.р. півняк,о.в. вовків.- дніпропетровськ: національний гірничий університет, 2006. – 470 с.

8 Гандзюк м. П., Желібо є. П., Халімовський м. О. Г. Основи охорони праці: підруч для студ вищих навч закладів за ред. М. П. Гандзюка - до каравела, 2004 - 408 з

9 Серіков Я.О., Коженевські, Л.Ф., Хворост, М.В. Безпека життєдіяльності та охорона праці: підручник : Ч.1: Безпека життєдіяльності. Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, краків: ISBN 978-966-695-529-9