МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
Навчально науковий інститут автоматики та електротехніки

Кафедра комп'ютеризованих систем управління

«Допущений до захисту»
Завідувач кафедри
_____
20 грудня 2024 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеня вищої освіти «магістр»

на тему: Мікропроцесорна система керування електроприводом свердловинного насоса

Виконав: студент групи 6341м
_____ ***Чернов О.О.***
(підпис)

Керівник роботи:
зав. каф. КСУ, д.т.н., проф.
_____ ***Черно О.О.***
(підпис)

Миколаїв − 2024

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

ННІ автоматики та електротехніки
Кафедра комп'ютеризованих систем управління
Рівень вищої освіти **другий (магістерський)**
Спеціальність **174– «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»**
ОПП **«Комп'ютеризовані системи управління і автоматика»**

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри КСУ
_____ **Черно О.О.**
15 жовтня 2024 р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Чернову Олегу Олександровичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: *Мікропроцесорна система керування електроприводом свердловинного насоса.*

керівник роботи *Черно Олександр Олександрович, д.т.н., доцент*
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від "14" жовтня 2024 р. № 1075-уч

2. Строк подання роботи *18.12.2024 р.*

3. Вихідні дані до роботи *Потужність електродвигуна насоса 4 КВт. Розробка комп'ютеризованої системи автоматичного управління електроприводами свердловинного насосу.*

4. Мета дослідження *Мета керування – підтримка заданого тиску у трубопроводі.*

5. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (основні задачі дослідження)

- *розробка функціональної схеми;*
- *розрахунок та вибір основних елементів;*
- *розробка принципових електричних схем;*
- *розробка алгоритму керуючої програми;*
- *розробка динамічної моделі електроприводу свердловинного насосу;*
- *визначення структури і параметрів регулятору системи управління;*
- *аналіз питань охорони праці.*

6. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

- функціональна схема системи управління;

- схема зв'язків між елементами системи управління;

- алгоритми основної програми та підпрограми формувача задаючих сигналів;

- алгоритми підпрограм перевірки наявності аварії та І-регулятора;

7. Консультанти розділівроботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Охорона праці	*Черно О.О., зав. каф. КСУ*	04.09.2024	26.10.2024

Дата видачі завдання: «04»вересня 2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	*Аналіз структури, принципу роботи та систем*	*22.10.2024*	*виконано*
	управління насосних станцій		
2	*Розробка принципової електричної схеми*	*05.11.2024*	*виконано*
3	*Розробка програмного забезпечення*	*15.11.2024*	*виконано*
4	*Розрахунок регулятора системи автоматичного*	*26.11.2024*	*виконано*
	керування		
5	*Охорона праці*	*30.11.2024*	*виконано*
6	*Охорона навколишнього середовища*	*02.12.2024*	*виконано*
7	*Оформлення кваліфікаційної магістерської*	*04.12.2024*	*виконано*
	роботи		

Студент (підпис) Чернов О. О. (прізвище та ініціали)

Керівник роботи (підпис) Черно О. О. (прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

У даній кваліфікаційній магістерській роботі розроблено систему частотного управління електроприводом свердловинного насосу. В процесі розробки системи управління була сформована функціональна схема системи частотного управління електроприводом свердловинного насосу; розроблена вимірювально-обчислювальна частина системи управління та обрані її основні складові елементи; побудована динамічна модель керованого електропривода насоса у програмі *Simulink*; визначено коефіцієнти регулятора; розроблена принципова електрична схема системи управління; побудовано алгоритм основної керуючої програми та підпрограм; розроблено алгоритм роботи програми та підпрограм, що входять до основної програми.

Розглянуто питання охорони праці, охорони навколишнього середовища. В данній роботі нараховується 78 сторінок, 5 розділів, 5 таблиць, 14 джерел використаної літератури та 19 рисунків.

Ключові слова: відцентровий насос, електропривод, частотне керування.

ANNOTATION

This master's qualification project develops a frequency control system for the electric drive of a well pump. In the process of designing the control system, a functional diagram for the frequency control system of the pump drive was created; the measurement and computational section of the control system was developed, and its main components were selected. A dynamic model of the controlled pump drive was built in Simulink; the controller coefficients were determined; the electrical schematic of the control system was designed; and the algorithm of the main control program and its subroutines was constructed. Additionally, the algorithms for program operations and the subroutines within the main program were developed.

The project also addresses occupational safety and environmental protection. This work includes 78 pages, 5 chapters, 5 tables, 14 references, and 19 figures.

Keywords: centrifugal pump, electric drive, frequency control.

ЗМІСТ

ВСТУП **8**

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТРУКТУРИ, ПРИНЦИПУ РОБОТИ ТА СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ НАСОСНИХ СТАНЦІЙ **9**

1.1. Насоси та їх класифікація **9**

1.2. Свердловинна установка з занурювальним агрегатом **14**

1.3. Автоматизація системи водопостачання за допомогою перетворювача частоти **19**

1.4. Способи управління насосними системам **25**

1.5. Постановка задачі проектування **30**

Висновки за розділом **31**

РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА ПРИНЦИПОВОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СХЕМИ **32**

2.1. Розробка функціональної схеми системи управління електроприводом свердловинного насосу та вибір її елементів **32**

Висновки за розділом **43**

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ **44**

3.1. Розробка алгоритму основної програми **41**

3.2. Розробка алгоритмів підпрограм **43**

Висновки за розділом **50**

РОЗДІЛ 4. РОЗРАХУНОК РЕГУЛЯТОРА СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ **51**

4.1. Розрахунок динамічних параметрів електропривода **51**

4.2. Побудова динамічної моделі нескоригованої системи керування у програмі Simulink **55**

4.3 Вибір структури регулятора та визначення його коефіцієнтів **56**

Висновки за розділом **63**

РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ **61**

5.1 Загальні відомості **61**

5.2 Аналіз небезпечних і шкідливих факторів при випробуванні та експлуатації свердловинного насосу **63**

5.2.1. Вплив шуму на організм людини **65**

5.2.2. Вплив вібрації на організм людини **66**

5.3 Розробка заходів щодо підвищення безпечності робіт,пов'язаних з експлуатацією й налагодженням електропривода свердловинного насосу 67
5.4 Розрахунок захисного заземлення системи частотного управління електроприводом свердловинного насосу 71
Висновки за розділом 73
ВИСНОВКИ 75
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 77

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ

ПЧ – перетворювач частоти;

АД – асинхронний двигун;

СН – свердловинний насос;

ДТ1 – датчик тиску (в кінці трубопроводу);

ДТ2 – датчик тиску в насосній станції;

ДСХ – датчик “сухого ходу”;

ІАС – ідентифікатор аварійної ситуації;

АЦП – аналогово-цифровий перетворювач.

ФСЗ – формувач задаючого сигналу.

ВСТУП

Люди здавна шукали способи переміщення і підйому води – питної, поливної чи дренажної. Перші водопровідні системи використовували силу гравітації для транспортування води, прикладом чого можуть слугувати римські акведуки. Однак для того, щоб піднімати воду вгору, знадобилися спеціальні пристрої, відомі сьогодні як насоси.

Насосні станції є важливою складовою сучасних систем водопостачання. Це комплекс механічних, електричних і будівельних компонентів, призначених для підйому чи перекачування води. У сучасних насосних станціях зазвичай використовуються відцентрові насоси з електродвигунами та електромеханічними системами управління.

Автоматизація управління насосними станціями є ключовим напрямом технічного прогресу в забезпеченні водопостачання і водовідведення в містах і на підприємствах. Застосування частотного перетворювача (ПЧ) для автоматизації системи водопостачання забезпечує низку переваг у порівнянні з традиційними системами. Саме це питання розглядається у цій дипломній роботі.

Мета роботи – розробити комп’ютеризовану систему управління електроприводом свердловинного насоса.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СТРУКТУРИ, ПРИНЦИПУ РОБОТИ ТА СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ НАСОСНИХ СТАЦІЙ

1.1. Насоси та їх класифікація

Насоси - це гідравлічні машини, які перетворюють механічну енергію двигуна в енергію рідини. Вони забезпечують переміщення рідини як у горизонтальному, так і у вертикальному напрямках або організовують циркуляцію в замкнених системах. Насоси є важливою частиною насосної станції, принципова схема якої адаптована для водопостачання та каналізації. У таких станціях насос працює від електродвигуна, підключеного до мережі. Насос перекачує воду чи іншу рідину з нижнього резервуару через напірний трубопровід до верхнього резервуару, використовуючи енергію, отриману від двигуна. Енергія рідини після проходження через насос завжди більша за ту, що була до нього.

Ключові параметри насосів, що визначають робочі режими насосної станції, її обладнання та конструкцію, включають напір, подачу, потужність та коефіцієнт корисної дії [1]. Всі насоси, незалежно від типу, конструкції та принципу дії, які використовуються у системах водопостачання та каналізації, повинні відповідати основним вимогам:

- надійність і довговічність;

- кономічність;

- зручність експлуатації;

- стабільність робочих параметрів у широкому діапазоні при високому ККД;

- компактність та мала вага;

- простота конструкції.

Вибір насоса в кожному випадку здійснюється індивідуально, з урахуванням експлуатаційних та конструктивних характеристик, що найкраще відповідають завданням насосної станції.

Насосні станції водопостачання — це комплекс пристроїв, призначених для підйому води з нижнього рівня на вищий або транспортування її до місця, де відбувається повторне підвищення тиску у місцевих системах водопостачання.

Класифікація насосних станцій водопостачання

У системах водопостачання зустрічаються різні насосні станції, які можна класифікувати:

а) за призначенням:

– господарсько-питні – обслуговують побутові потреби міст і селищ;
– промислові – постачають воду для виробничих потреб;
– змішані – постачають воду для різних потреб.

б) за місцем розташування та завданням, що виконуються в системі водопостачання:

– насосні станції I подають воду від джерела водопостачання до очисних споруд, а у тому випадку, коли очистка не потрібна, безпосередньо до резервуарів чистої води (РЧВ), водонапірної башти, розподільчої водопровідної мережі або інших споруд, в залежності від схеми водопостачання;
– насосні станції II підйому призначені для постачання води від РЧВ по водоводах та водопровідних мережах до споживачів;
– підвищуючі насосні станції призначені для подачі води під підвищеним тиском до місцевої водопровідної мережі. При цьому вода із однієї мережі під збільшеним тиском подається до іншої (міста, району,

окремої будівлі). Крім того, влаштовують у будівлях підвищеної поверховості для збільшення тиску води у системі водопостачання.

– циркуляційні насосні станції використовують у зворотних системах водопостачання промислових підприємств (при цьому частина насосів подає воду на промислові потреби, а інші - відпрацьовану воду до очисних споруд або на охолодження) або в системах гарячого водопостачання.

в) за способом регулювання:

– насосні станції з ручним регулюванням, при якому включення і виключення насосів проводиться обслуговуючим персоналом;

– саморегулюючі насосні станції з накопичувальною ємністю, в яких включення і виключення насосів виконуються контактними манометрами або реле тиску;

– насосні станції з автоматичним регулюванням, в яких включення і виключення, а також зміни швидкості обертання насосів виконуються відповідною апаратурою автоматичного регулювання (в залежності від рівнів води в резервуарах, тиску або розрідження в трубопроводах);

– насосні станції з напівавтоматичним регулюванням, які запускаються або зупиняються одним імпульсом, програмованим обслуговуючим персоналом, однак всі інші операції виконуються відповідною апаратурою автоматичного регулювання;

– насосні станції з дистанційним автоматичним регулюванням, які управляються з віддаленого центру управління, наприклад, з використанням електронного програмованого процесора.

г) за розміщенням насосів:

– з вертикальним розташуванням обладнання;
– з горизонтальним розташуванням обладнання.

В обладнанні насосних станцій можна виділити три групи:

– гідравлічне обладнання (насоси, контрольно-вимірювальні прилади, системи трубопроводів);

– енергетичне обладнання, до складу якого входять приводи насосів;

– обладнання для регулювання і управління (пристрої, що забезпечують вимірювання та автоматику).

В насосних станціях підземних вод можуть бути встановлені насоси наступних типів:

– свердловинні насоси з електроприводом. Ці насоси використовуються найчастіше. Вони встановлюються в свердловинах нижче рівня води і приводяться в рух трифазними двигунами змінного струму;

– ерліфтні насоси, тобто насоси, що піднімають водоповітряну суміш. Вони призначені для підйому чистої води або води з піском з глибоких криниць.

Насосні станції, що використовуються в системах водопостачання, можна класифікувати за декількома ознаками:

а) за призначенням:

-господарсько-питні – забезпечують водопостачання для побутових потреб населення;

-промислові – призначені для подачі води в промислові об’єкти;

-змішані – використовуються для обслуговування як побутових, так і виробничих потреб.

б) за місцем розташування та завданням, що виконуються в системі водопостачання:

-насосні станції I підйому подають воду з джерела до очисних споруд або безпосередньо в резервуари чистої води (РЧВ), водонапірні башти, чи до розподільчих мереж залежно від потреб;

-насосні станції II підйому транспортують воду від РЧВ через магістральні трубопроводи та водопровідні мережі до кінцевих споживачів;

-підвищуючі насосні станції забезпечують подачу води під підвищеним тиском до місцевих мереж водопостачання, включаючи високоповерхові будівлі для забезпечення стабільного тиску;

-циркуляційні насосні станції використовуються в рециркуляційних системах промислових підприємств (де частина насосів транспортує воду на виробництво, а інші повертають відпрацьовану воду на очистку або охолодження) та в системах гарячого водопостачання.

в) за способом регулювання:

-станції з ручним регулюванням, коли вмикання та вимикання насосів здійснюється персоналом;

-станції із саморегулюванням через накопичувальні ємності, де процес вмикання і вимикання контролюється манометрами або реле тиску;

-автоматизовані насосні станції, що забезпечують автоматичне регулювання роботи насосів на основі показників рівня води, тиску чи розрідження у трубопроводах;

-станції з напівавтоматичним керуванням, де запуск і зупинка виконуються програмованим імпульсом, а інші функції контролюються автоматикою;

-станції з дистанційним автоматичним керуванням, які можна управляти з віддалених центрів за допомогою електронних контролерів.

г) за розміщенням насосів:

-з вертикальним розташуванням насосного обладнання;

-з горизонтальним розміщенням насосів.

В обладнанні насосних станцій можна виділити три групи:

– гідравлічне обладнання (насоси, контрольно-вимірювальні прилади, системи трубопроводів);

– енергетичне обладнання, до складу якого входять приводи насосів;

– обладнання для регулювання і управління (пристрої, що забезпечують вимірювання та автоматику).

В насосних станціях підземних вод можуть бути встановлені насоси наступних типів:

– свердловинні насоси з електроприводом. Ці насоси використовуються найчастіше. Вони встановлюються в свердловинах нижче рівня води і приводяться в рух трифазними двигунами змінного струму;

– ерліфтні насоси, тобто насоси, що піднімають водоповітряну суміш. Вони призначені для підйому чистої води або води з піском з глибоких свердловин.

1.2. Свердловинна установка з занурювальним агрегатом

Системи водопостачання, засновані на використанні підземних вод, є найбільш поширеними в сільських районах, малих містах та на промислових підприємствах. Серед них найбільш популярними є занурювальні насоси для свердловин, які застосовуються для підйому води з свердловин діаметром від 100 мм. Окрім водопостачання, такі насоси використовуються в системах зниження рівня води при будівельних роботах і в вертикальному дренажі.

Відцентрові свердловинні електронасоси виготовляються для обсадних труб з діаметром від 100 до 486 мм, мають продуктивність 0,63–1200 м³/год і створюють напір від 12 до 680 м.

Свердловинна установка з занурювальним насосним агрегатом включає відцентровий насос, занурювальний електродвигун, кабель для живлення, водопідйомний трубопровід, обладнання для гирла свердловини (опорний пристрій, триходовий кран, манометр, засувку) та систему автоматичного управління.

На рис. 1.1 представлені найбільш розповсюджені схеми водопостачання.

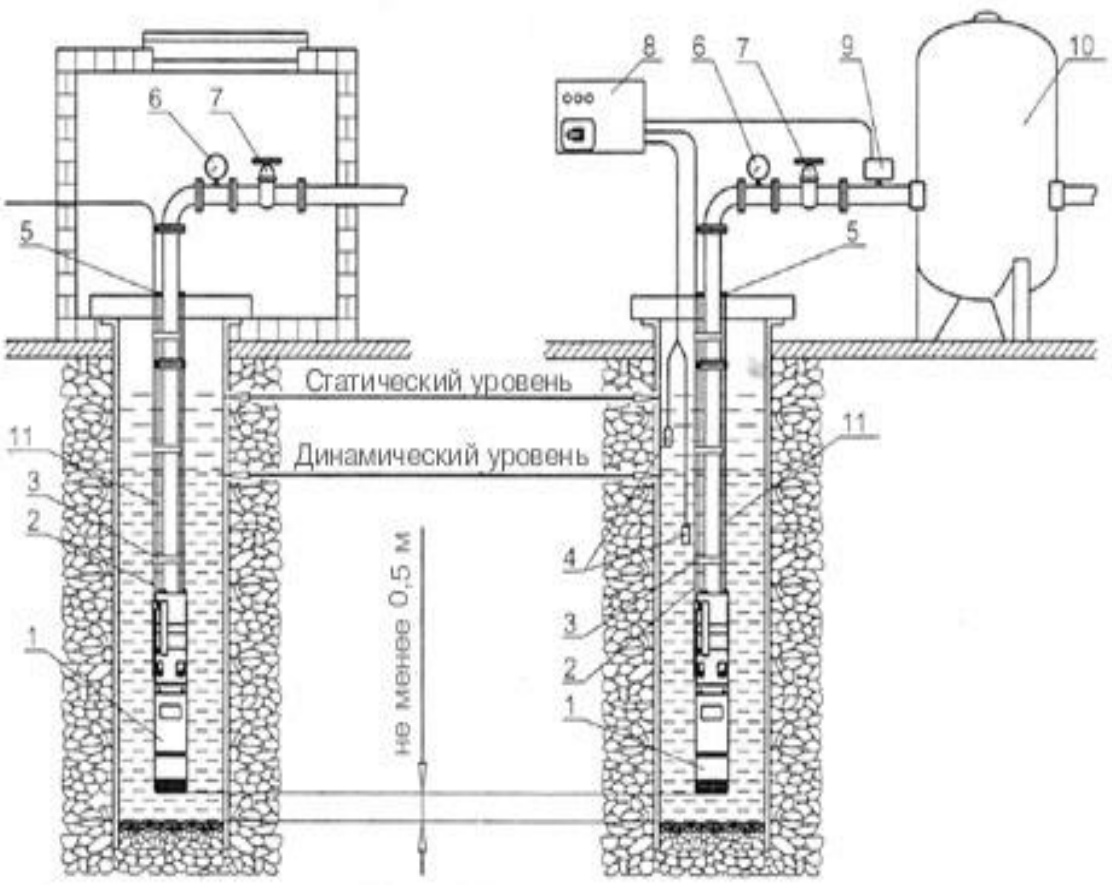


Рис. 1.1. Схеми водопостачання:

1 – електронасос занурювальний;
2 – кабель електроживлення;
3 – хомут кріплення кабелю;
4 – датчик “сухого ходу”;
5 – кріплення тросів на кришці свердловини;
6 – манометр;
7 – вентиль;
8 – пульт управління;
9 – реле тиску;
10 – гідроакумулятор;
11 – трос підвісу.

Для того щоб занурювальні свердловинні насоси виробили свій, закладений в них конструкторами ресурс, треба просто дотримуватися правил їх експлуатації. Розглянемо детальніше конструкцію насоса для свердловин.

Занурювальний насос для води складається з занурювального водозаповненого електродвигуна і відцентрового насоса свердловини, який має, як правило, кілька ступенів. Ступені монтуються на валу насоса 11 і за

допомогою стяжок 3 кріпляться до основи 16 насоса. З іншого боку до основи кріпиться електродвигун.

Ступінь відцентрового насосу складається з обойми 7, в якій закріплені кільце 8 і лопатковий відвід 6 (ЛВ), а також робочого колеса 9 (РК), закріпленого на валу насоса свердловини за допомогою шпонки 12. Між собою на валу РК фіксуються проставочними втулками 10.

Опорами валу служать верхній і нижній гумометалеві підшипники. Верхній підшипник 4 розташовується в корпусі 5, до якого прикріплені головка насоса 1 із зворотним клапаном 2. Головка має конічну різьбу для приєднання насоса до водопідіймальної колони. Підшипники змащуються водою, що перекачується.

Нижній кінець валу насоса ЕЦВ і хвостовик ротора електродвигуна з'єднані між собою за допомогою муфти 15 і шпонок 13 і 17. Між валом і хвостовиком встановлені регулювальні шайби 14, для виставлення необхідного зазору між РК і ЛВ.

Свердловинні насоси завжди багатоступінчасті, причому кількість ступенів може бути більше двох десятків. Це необхідно для того, мати можливість підняти воду з великої глибини і створити необхідний тиск в мережі. Є моделі свердловинних насосів, які можуть піднімати воду з глибини понад 300 метрів. Саме тому їх називають ще й глибинні.

На рис. 1.2. зображено конструкцію свердловинного насосу:

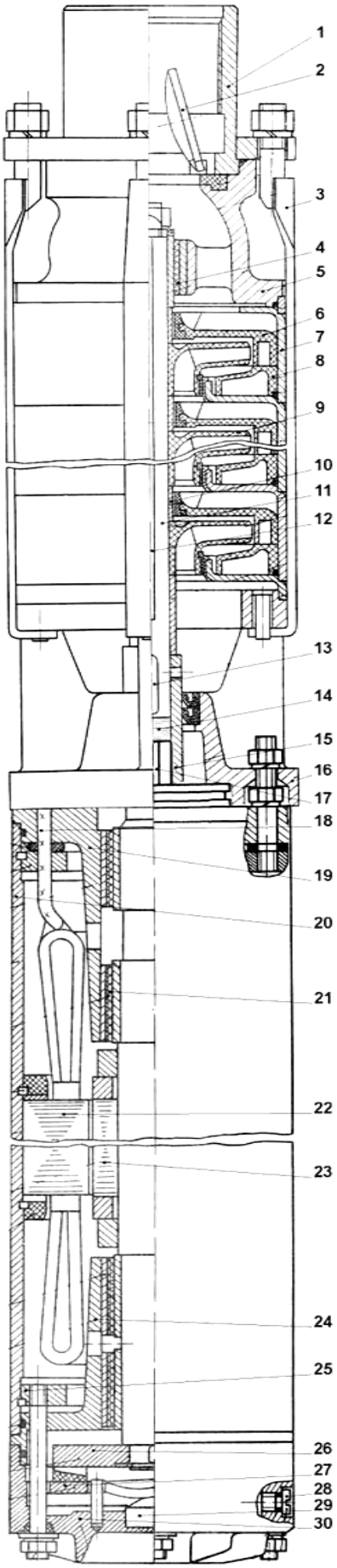


Рис. 1.2. Конструкція насосу:

1 – головка насоса; 2 – зворотній клапан; 3 – стяжок; 4 – верхній підшипник; 5 – корпус; 6 – лопатковий відвід;

7 - обойба; 8 – кільце; 9 – робоче колесо; 10 – проставочні втулки; 11 – вал насоса; 12 , 13, 17– шпонка; 14 – регулювальні шайби; 15 – муфта; 16 – основа насоса; 18 – хвостовик; 19 – верхній підшипниковий щит; 20 – корпус статора; 21 – підшипники; 22 – пакет пластин магнітопроводу; 23 – ротор; 24 – нижній підшипниковий щит; 25 – кільце кріплення; 26 – стопорне кільце закріплення; 27 – підп’ятник; 28 – пробка днища; 29 – сфера; 30 – днище

На корпусі статора 20 закріплені верхній 19 і нижній 24 підшипникові щити, а також кільце 25 кріплення днища 30 з елементами упорного осьового підшипника до корпусу статора. У кожному щиті розташовано по два підшипника 21. Усередині корпусу статора запресований пакет пластин магнітопроводу 22, що утворюють пази для укладки обмотки статора. Обмотка статора виконана спеціальним обмотувальним проводом типу ПВДП з поліетиленовою ізоляцією, що здатна забезпечити роботу електродвигуна повністю зануреним у воду. Кінці обмоток виводяться на поверхню за допомогою занурювального кабелю 18 типу ВПП.

Ротор 23 має звичайну конструкцію "білячої клітки" з провідниками з алюмінію або міді. На нижньому кінці ротора за допомогою шпонки і стопорного кільця закріплена п'ята 26. П'ята і підп'ятник 27 разом зі сферою 29 утворюють упорний підшипниковий вузол для сприйняття гідравлічних осьових сил, а також маси ротора електродвигуна і насоса для свердловин.

Перед монтажем занурювального насоса в свердловині електродвигун заповнюється водою. Злив води здійснюється через спеціальну пробку 28 в днище. Вода служить для змащування підшипників і охолодження статора. Основа закрита сіткою для запобігання попадання в свердловинний насос великих механічних включень.

Основні переваги занурювальних насосів включають: відсутність довгого трансмісійного валу та проміжних підшипників; можливість їх встановлення в викривлених свердловинах; легкість монтажу та демонтажу; можливість монтажу насоса прямо в колодязі.

Серед недоліків більшості конструкцій занурювальних насосів виділяються високі вимоги до якості води, що подається зі свердловин. Особливо чутливі такі агрегати до механічних домішок, кількість яких не повинна перевищувати 0,01% або 100 мг/л.

1.3. Автоматизація системи водопостачання за допомогою перетворювача частоти.

Автоматизація системи водопостачання з використанням перетворювача частоти (ПЧ) надає ряд переваг у порівнянні з традиційними системами. Раніше система водопостачання включала такі основні елементи: свердловинний насос, водонапірну башту або резервуар, насос другого підйому, блок управління та захисту. Управління двигуном свердловинного насоса (або насоса другого підйому) зазвичай здійснювалося за сигналами датчиків рівня чи реле тиску, а запуск відбувався через прямий пуск із максимальними механічними та електричними навантаженнями.

Автоматизація насосних станцій є одним із ключових напрямків технічного прогресу у сфері подачі та відведення води в населених пунктах і на промислових об’єктах. На насосних станціях автоматизуються пуск і зупинка насосів і допоміжних установок, контроль і підтримка заданих параметрів (рівень води, подача, тиск тощо), а також передача сигналів на диспетчерський пункт.

Для моніторингу параметрів роботи насосної станції використовуються різні датчики, які перетворюють контрольовані величини в електричні сигнали, що подаються на виконавчі механізми.

В автоматизованих системах управління насосними агрегатами застосовують різні типи датчиків і реле:

- датчики рівня - для подачі імпульсів на включення і зупинку насосів при зміні тиску в трубопроводі;
- датчики - для управління ланцюгами автоматики при зміні тиску в трубопроводі;
- струменеві реле - для управління ланцюгами автоматики залежно від напрямку руху води в контрольованому трубопроводі;

– реле часу - для відліку часу, необхідного для протікання певних процесів при роботі агрегатів;
– термічні реле - для контролю за температурою підшипників і сальників;
– вакуум реле - для підтримки певного розрідження в насосі або у всмоктуючому трубопроводі;
– проміжні реле - для перемикання окремих ланцюгів у встановленій послідовності;
– реле напруги - для забезпечення роботи агрегатів на певній напрузі;
– аварійні реле - для відключення агрегатів при порушенні встановленого режиму роботи.

Основний сенс використання автоматизованих систем управління (АСУ) в насосних установках полягає в тому, щоб режим роботи насосів відповідав режимові роботи водопровідної або каналізаційної мережі з урахуванням широкого діапазону зміни водоспоживання. Щоб відслідковувати ці зміни, необхідно постійно регулювати режим роботи насосної системи.

Регулюванням частоти обертання насоса його робочі параметри приводяться у відповідність з режимом роботи водопровідної або каналізаційної мережі. Для зміни частоти обертання електродвигун насоса підключають через частотний перетворювач. Значення частоти обертання насоса, з якою він повинен працювати в той чи інший момент часу, визначається АСУ, тобто режимом роботи насосної установки. До теперішнього часу найбільш поширеним способом регулювання було дроселювання напірною засувкою, яке є простим у реалізації, але неекономічним.

На рис. 1.3 наведено графік спільної роботи насосного агрегату (НА) та мережі у випадку керування зміною параметрів мережі (дроселювання засувкою). Характеристика мережі при цьому залежить від ступеня відкриття засувки (крива 2 – засувка відкрита, крива 2 ' – ступінь відкриття зменшено). Робоча точка рухається по характеристиці насоса (1).

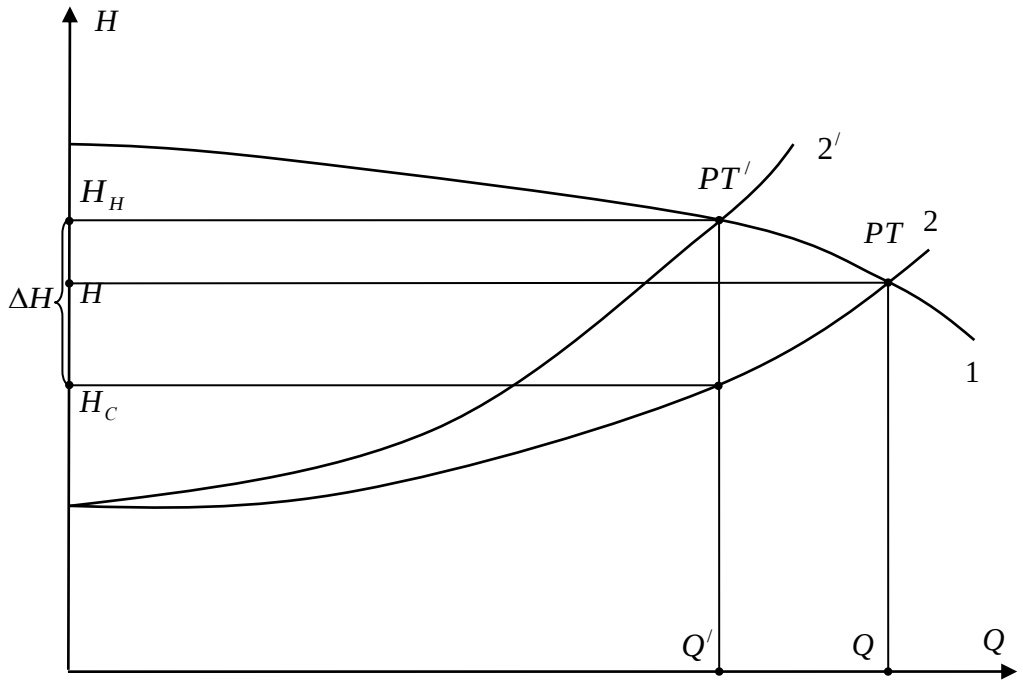


Рис. 1.3. Графік спільної роботи насосного агрегату (НА) та мережі у випадку керування зміною параметрів мережі (дроселювання засувкою)

Насосна установка працює з підвищеним тиском через зростання гідравлічного опору в системі трубопроводів. Підвищення напору, спричинене зміною гідравлічного опору, не є стабільним і залежить від витрат рідини. Це впливає на значення динамічної складової напору, який розвиває насосна установка, та змінює крутизну характеристики трубопроводу. Якщо насосна установка працює з подачею, меншою за розрахункову, виникає невідповідність між створюваним насосом напором і тим, який необхідний для забезпечення потрібної подачі рідини, що призводить до перевищення напору насоса.

Порівняння характеристики відцентрових насосів і трубопроводів показує, що при зменшенні подачі необхідний напір також зменшується, а створюваний насосом напір збільшується. Різниця цих напорів і є перевищення напору понад необхідного. З графіка спільної роботи насоса і трубопроводу видно, що значення перевищення напору тим більше, чим крутіше характеристики насоса і трубопроводу, і чим менше фактична

подача насоса в порівнянні з розрахунковою. На перевищення напору нераціонально витрачається додаткова потужність.

Отже, оптимальним є режим роботи, за якого напір, створюваний насосом, дорівнює напору, необхідному для подачі води. Цей режим, зокрема, може бути досягнутий шляхом регулювання частоти обертання насоса за допомогою частотно-регульованого електроприводу (рис. 1.4).

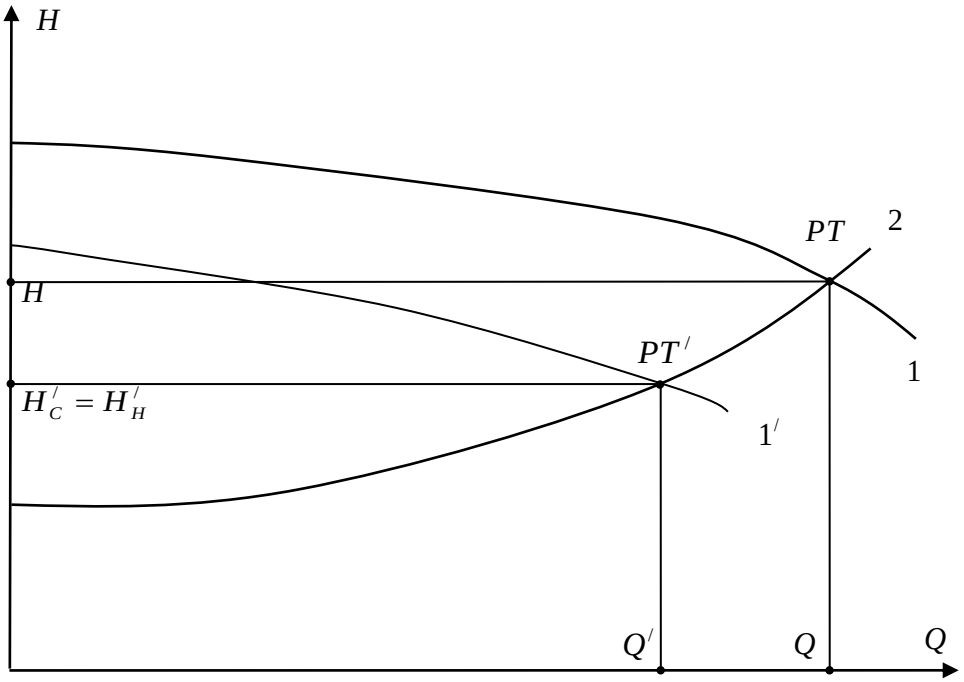


Рис. 1.4. Регулювання режиму роботи відцентрового насоса зміною частоти обертання робочого колеса

Характеристика насоса залежить від частоти обертання вала електродвигуна (частоти живлення електромережі). Крива 1 відповідає номінальній частоті обертання (при частоті мережі 50 Гц), крива 1 ' – зниженій частоті. Ступінь відкриття засувки не змінюється.

Принциповою відмінністю цього методу є рух робочої точки по характеристиці трубопроводу (2). Насос працює зі змінним напором від Н до НС '. Очевидно, що в такому режимі роботи напір, що розвивається насосом менше, ніж у попередньому. Отже, і витрата електроенергії на перекачку одного і того ж об'єму рідини менша. Більше того, створений насосом напір

повністю витрачається на перекачування робочої рідини по мережі трубопроводів (Н = Нс), а значить зайва втрата напору (і відповідно перевитрата електроенергії) мінімальні.

Сучасні частотні перетворювачі компактні, мають простий інтерфейс і міцний корпус, що захищає від пилу та вологи, завдяки чому їх можна використовувати навіть у складних кліматичних умовах та в помірно агресивних середовищах. Асортимент на ринку охоплює широкий діапазон потужностей від 0,4 до 500 кВт і більше при стандартному живленні 220/380 В та частоті 50–60 Гц.

Доведено, що застосування перетворювачів частоти на насосних станціях дає такі позитивні ефекти:

– Частотний пуск двигуна забезпечує плавний розгін без надмірних пускових струмів і механічних ударів, що знижує навантаження на двигун і трансмісійні механізми, продовжуючи термін їх експлуатації та дозволяючи знизити потужність приводних двигунів.

– Економія електроенергії завдяки регулюванню роботи електропривода відповідно до фактичного водоспоживання.

– Зменшення витрат води на 5% за рахунок зниження витікань при надлишковому тиску в мережі, коли споживання води невелике.

– Зниження витрат на ремонт та обслуговування завдяки уникненню аварійних ситуацій, наприклад, гідравлічного удару, який часто трапляється при використанні нерегульованого привода. Термін служби обладнання при цьому зростає на 1,5 рази.

– Скорочення фонду заробітної плати обслуговуючого персоналу завдяки комплексній автоматизації систем водопостачання.

– Економія тепла в системах гарячого водопостачання завдяки зменшенню втрат води.

– Можливість збільшення напору в разі потреби.

– Зниження місткості баків водонапірних башт або повна відмова від них завдяки частотному регулюванню.

– Зниження експлуатаційних витрат за рахунок зменшення чисельності обслуговуючого персоналу та зменшення витрат на опалення й освітлення приміщень.

– Підвищення строку служби обладнання завдяки своєчасному виключенню агрегатів у разі несправностей.

– Можливість централізованого управління кількома автоматизованими насосними станціями з одного пункту, що робить систему більш гнучкою та надійною.

– Усунення участі персоналу в технологічних операціях, які відбуваються в антисанітарних умовах.

– Застосування зворотного зв’язку з частотним перетворювачем забезпечує стабільну підтримку швидкості двигуна або заданого технологічного параметра при змінних навантаженнях та інших впливах.

Практика показує, що більшість проектів з упровадження частотних перетворювачів окупаються за 1–2 роки.

1.4. Способи управління насосними системами

Розвиток техніки привів до широкого застосування електроприводів з електродвигунами змінного струму та до створення нових систем керування цими двигунами. На відміну від систем керування електроприводами постійного струму, системи для змінного струму є значно більш різноманітними. У регульованих електроприводах застосовуються асинхронні двигуни з короткозамкненим або фазним ротором, синхронні та вентильні двигуни. Швидкість електродвигунів регулюється різними способами, такими як зміна напруги статора, частоти й напруги статора, частоти та напруги ротора тощо. Кількість регульованих координат у приводах змінного струму значно більша, ніж у приводах постійного струму. Однак існують певні обмеження щодо використання того чи іншого методу керування, а також відповідної системи управління для електродвигунів. Усі ці чинники ускладнюють формування загальних підходів до синтезу автоматичних систем керування (АСУ) електроприводами змінного струму такою ж мірою, як це було зроблено для АСУ електроприводів постійного струму.

Керування електродвигунами змінного струму має свої труднощі, ключові з яких полягають у наступному:

– момент електродвигуна визначається помноженням двох результуючих векторів електромагнітних параметрів статора і ротора і є функцією чотирьох змінних;

– є сильна взаємодія намагнічуючих сил статора і ротора, взаємний стан яких безперервно міняється при обертанні ротора;

– з метою кращого використовування двигуна в різних режимах його роботи виникає задача регулювання магнітного потоку двигуна.

Електродвигуни змінного струму разом з керованими перетворювачами є складними багатозв'язковими нелінійними системами управління. Повний

математичний опис цих систем досить складний і не підходить для використання в методах синтезу систем управління. У той же час у практиці проектування систем електроприводів, зокрема АСУ ЕП змінного струму, поширені прості методи синтезу, засновані на принципах підлеглого управління та використанні уніфікованих налаштувань регуляторних контурів, які входять до системи управління. Застосування цих методів не лише спрощує синтез систем управління, а й дозволяє спростити математичну модель електроприводів змінного струму, зокрема, ігноруючи зв'язок між деякими координатами та параметрами.

Основна складність у створенні АСУ ЕП змінного струму полягає в досягненні незалежного управління електромагнітним моментом і потоком двигуна. Якщо це вдається реалізувати, то АСУ ЕП змінного струму з зворотним зв’язком за швидкістю або положенням працює так само, як і АСУ ЕП постійного струму, з можливістю управління пусковими і гальмівними режимами.

Для управління двигунами змінного струму використовуються різні тиристорні перетворювачі (ТП): випрямлячі та залежні інвертори, автономні інвертори, перетворювачі частоти, імпульсні перетворювачі, перетворювачі напруги. Схеми ТП дуже різноманітні і залежать від вимог до електроприводу за такими характеристиками, як потужність, діапазон регулювання швидкості, енергетичні втрати, складність реалізації, форма вихідної напруги або струму тощо.

У ТП частоти з постійним струмом напруга мережі змінного струму спочатку випрямляється, згладжується, а потім за допомогою автономного інвертора перетворюється в змінну напругу з регульованою частотою та амплітудою. ТП частоти можуть мати керований або некерований випрямляч. У першому випадку роздільне управління напругою і частотою здійснюється через керований випрямляч (КВ) для регулювання напруги ТП та автономний інвертор (АІ) для регулювання частоти. При використанні

некерованого випрямляча (НВ) застосовуються автономні інвертори з широтно-імпульсною модуляцією, де управління напругою і частотою виконується через роздільні канали АІ.

Переваги схем ТП частоти з КВ полягають у відносній простоті їх реалізації. Недоліки схем: зміна напруги живлення інвертора; необхідність відповідних запасів по ємності комутуючих конденсаторів або необхідність застосування окремих джерел підзарядку конденсаторів; низький коефіцієнт потужності, залежний від кута регулювання тиристорів; істотна питома вага вищих гармонік в кривій вихідної напруги, що приводить до створення додаткових обурень на систему електроприводу при формуванні електромагнітних моментів (особливо на низьких швидкостях електродвигуна) і підвищенню втрат в двигуні.

Значною перевагою володіють схеми ТП частоти з НВ і АІ з широтно-імпульсною модуляцією. При використовуванні АІ з широтно-імпульсною модуляцією можна істотно понизити спектральний склад вищих гармонійних тим самим наблизитися до синусоїдальної форми цієї напруги. Основними недоліками такого ТП частоти є складність реалізації та велика кількість елементів, пов’язана з комутаційними блоками. При частотно-струмовому управлінні електроприводами змінного струму в ТП частоти застосовуються автономні інвертори струму (АІС). На відміну від автономних інверторів напруги (АІН), АІС формують змінний струм двигуна з регульованою частотою. Для живлення інвертора постійним струмом може застосовуватися стабілізатор струму на базі керованого випрямляча (КВ).

Інвертування струму технічно реалізуються простіше за інвертування напруги. Крім того, в ТП частоти з АІС можлива рекуперація енергії в мережу, що важливе в електроприводах, що працюють в повторно-короткочасних режимах роботи. При роботі електродвигуна в генераторному режимі напрям постійного струму не міняється. У замкнутих системах КВ автоматично переходить в інверторний режим і забезпечує рекуперацію

енергії в мережу. Для організації рекуперативних режимів роботи електроприводу з АІС необхідно застосовувати реверсивні випрямлячі.

Недоліком АІС є необхідність в їх значному ускладненні при формуванні струмів двигуна, близьких до синусоїдальних.

У статичних режимах існує два основні способи частотного управління:

– частотне управління, при якому в якості управляючих дій прийняті частота і напруга статора;

– частотне управління, при якому в якості управляючих дій прийняті частота і струм статора.

Другий спосіб називають частотно-струмовим управлінням. Формування механічних характеристик асинхронних двигунів при частотному управлінні, як і при управлінні двигунами постійного струму, є задачею забезпечення необхідної перевантажувальної здатності і жорсткості характеристик у всьому діапазоні регулювання швидкості. Задана перевантажувальна здатність забезпечується шляхом виконання певних співвідношень між частотою і напругою статора. Жорсткість механічних характеристик може бути скільки завгодно високою при використовуванні зворотних зв'язків по швидкості. Варто підкреслити, що і без зворотних зв'язків по швидкості жорсткість механічних характеристик частотно-керованих електроприводів змінного струму виявляється вищою, ніж у приводів постійного струму. Ця обставина сприяє застосуванню простих систем управління асинхронними електроприводами, не оснащеними датчиками швидкості і контурами регулювання швидкості. Крім вимог формування механічних характеристик двигунів, до систем управління можуть пред'являтися також вимоги оптимального управління по енергетичним витратам, наприклад забезпечення необхідного моменту і швидкості при мінімумі струму статора або мінімумі втрат, забезпечення максимального моменту при заданому струмі статора. Такі задачі управління розв'язуються при використовуванні екстремальних систем управління.

Докладніше розглянемо деякі способи управління: системи частотного

управління з функціональними перетворювачами координат. При частотному управлінні асинхронним двигуном напруга статора може в загальному випадку регулюватися як у функції відносної частоти статора v, так і у функції моменту навантаження. Передбачається, що абсолютне ковзання *S*2 може визначатися, а відносна напруга статора у є функцією *v* і *S*2, тобто *y*= *y* (*v, S*2). Проте, слід, мати на увазі, що при великому зниженні частоти постійність критичного моменту забезпечується за рахунок збільшення магнітного потоку двигуна і відповідно струму намагнічення. При більшому зниженні частоти постійність перевантажувальної здатності приводу супроводжується різким збільшенням потоку двигуна і струму намагнічення. З урахуванням насичення двигуна і обмежень по струму статора отримання критичного моменту при значеннях v<0,l, рівного критичному моменту при *v* = l стає проблематичним.

Системи частотного управління із зворотними зв'язками по електрорушійній силі (ЕРС) статора, швидкості двигуна, швидкості і струму двигуна. При використовуванні зворотного зв'язку по ЕРС статора двигуна порівняно просто реалізуються системи, в яких може бути забезпечена стабільність потоку двигуна при регулюванні швидкості двигуна. Постійність потоку двигуна забезпечується, якщо виробляти зміну ЕРС двигуна пропорційно зміні частоти статора. Завдання по швидкості двигуна в цьому випадку є загальним завданням на частоту і ЕРС статора. Контур стабілізації ЕРС для заданої швидкості включає датчик ЕРС ДЕ і регулятор ЕРС РЕ. Вимірювання ЕРС статора можна виробляти за допомогою додаткових вимірювальних обмоток, виконуваних так само, як обмотки статора, або за допомогою вимірювальних пристроїв, поновлюючих значення ЕРС по напрузі і струму статора. Контур регулювання ЕРС забезпечує постійність потоку двигуна. Разом з тим можна використовувати контур регулювання швидкості двигуна, що забезпечуючує високу жорсткість механічних характеристик електроприводу в замкнутій системі.

Системи частотно-струмового управління. У системах частотно-струмового управління двигун живиться від ТП частоти з автономним

інвертором струму (АІ). У такому разі КВ спільно з контуром регулювання струму випрямляча утворює джерело струму. Управління двигуном виробляється шляхом завдання струму статора і частоти АІС. Обидві величини, у свою чергу, залежать від загального сигналу завдання на систему, визначаючого швидкість двигуна. Струм статора пов'язаний також з навантаженням двигуна. Регулювання швидкості асинхронних електродвигунів в широкому діапазоні можливе шляхом регулювання напруги статора, якщо механічні характеристики електродвигуна штучно пом'якшені. Виконати це можна найпростіше, якщо в коло ротора двигуна включити постійний додатковий опір. Найсприятливішим режимом роботи таких електроприводів є режим з моментом навантаження. Схеми електроприводів є відносно простими і використовуються в установках з малої потужністю, працюючих в короткочасних і повторно-короткочасних режимах роботи. Область регулювання швидкості обмежена максимальною і мінімальною напругами статора двигуна і допустимим струмом статора.

1.5. Постановка задачі проектування

Після проведеного аналізу можна зробити такі висновки:

– частотний пуск асинхронних двигунів насосних станцій забезпечує їх плавний, без підвищених пускових струмів і механічних ударів розгін, що знижує навантаження на двигун і пов'язані з ним передавальні механізми, збільшує термін їх експлуатації;

– частотне регулювання насосних станцій забезпечує економію електроенергії шляхом налаштування роботи електропривода відповідно до фактичного споживання води, що дає ефект економії від 20 до 50%;

– у разі необхідності можливо підвищити напір понад звичайний;

– частотне регулювання насосних станцій дозволяє зменшити обсяг баків водонапірних башт та збірних резервуарів, завдяки більш частому плавному пуску та зупинці агрегатів, або навіть повністю відмовитися від використання водонапірних веж.

– частотне регулювання сприяє зниженню витрат на заробітну плату обслуговуючого та чергового персоналу завдяки комплексній автоматизації систем водопостачання;

Таким чином, метою дипломного проекту є створення комп'ютеризованої системи управління електроприводом насоса для свердловини.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

– розробка функціональної схеми;
– розрахунок та вибір основних елементів;
– розробка принципових електричних схем;
– розробка алгоритму керуючої програми;
– розробка динамічної моделі електроприводу свердловинного насосу;
– визначення структури і параметрів регулятору системи управління;
– аналіз питань охорони праці та охорони навколишнього середовища.

Висновки за розділом

У цьому розділі було розглянуто такі питання:

- розглянуто загальну характеристику насосів та їх класифікацію;
- принцип роботи свердловинної установки з занурювальним агрегатом;
- спосіб керування насосом за допомогою перетворювача частоти.

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБКА ПРИНЦИПОВОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СХЕМИ

2.1. Розробка функціональної схеми системи управління електроприводом свердловинного насосу та вибір її елементів

Система частотного управління електроприводом свердловинного насосу повинна виконувати наступні основні задачі [10]:

– вимірювання поточних значень тиску, порівняння їх з еталонними та і формування сигналу помилки;

– автоматична підтримка заданого тиску в напірному трубопроводі;

– захист насосної установки від “сухого ходу”;

– управління електродвигуном насосного агрегату;

– захист насосної установки від витікань води в разі пошкодження трубопроводу.

Оскільки регулювання потрібно відтворювати з досить високою точністю, систему потрібно побудувати за принципом зворотного зв’язку. В процесі управління система повинна здійснювати :

– вимір дійсних поточних значень тиску в напірному трубопроводі;

– порівняння їх з набором приписаних значень тиску;

– формування керуючого сигналу в залежності від помилки згідно з певним законом;

– формування сигналу помилки;

– підсилення цього сигналу;

– в залежності від значень сигналу помилки керування частотною обертів валу електродвигуна насосного агрегату (до складу якої входять асинхронний двигун та свердловинний насос);

– аварійне відключення насосної установки в разі “сухого ходу”;

– аварійне відключення насосної установки в разі пошкодження трубопроводу.

Для отримання інформації про тиск у напірному трубопроводі у вигляді електричного сигналу слід включити в систему датчик тиску, розташований в кінці трубопроводу, безпосередньо перед точками водоспоживання. Таке розміщення датчика є найефективнішим, оскільки за санітарними нормами необхідно підтримувати необхідний тиск саме у споживача, а не на насосній станції. Різні значення тиску в споживача та насосній станції обумовлена подоланням сил тертя води під час її руху в трубопроводі.

Щоб запобігти перегріву електродвигуна та механічним поломкам насоса, в свердловині встановлюється датчик "сухого ходу". Формувач аварійного сигналу перетворює дискретний сигнал від датчика в сигнал аварійної зупинки частотного перетворювача.

Для виявлення пошкоджень трубопроводу та запобігання втратам води (через несанкціоновані підключення або прорив трубопроводу) необхідно мати в реальному часі наступну інформацію:

– витрати води в трубопроводі;

– значення тиску в насосній станції;

– значення тиску в кінці трубопроводу;

– табличні значення залежності втрат тиску в трубопроводі від витрат води.

Отримання цієї інформації забезпечується встановленням додаткового обладнання: датчика тиску і витратоміра на виході насосної станції. Крім того, комплект GSM-модемів потрібен для передачі даних з датчика тиску, розташованого в кінці трубопроводу, на насосну станцію.

Щоб керувати частотним перетворювачем залежно від сигналів датчиків, встановлюється програмований мікроконтролер. На мікроконтролер надходитимуть сигнали з датчиків, а з контролера, згідно з керуючою програмою, будуть передаватися керуючі сигнали потрібної величини на частотний перетворювач.

Функціональна схема насосної системи зображена на рис. 2.1, де:

ПЧ – перетворювач частоти;

АД – асинхронний двигун;

СН – свердловинний насос;

ДТ1 – датчик тиску (в кінці трубопроводу);

ДТ2 – датчик тиску в насосній станції;

ДСХ – датчик “сухого ходу”;

ІАС – ідентифікатор аварійної ситуації;

АЦП – аналогово-цифровий перетворювач.

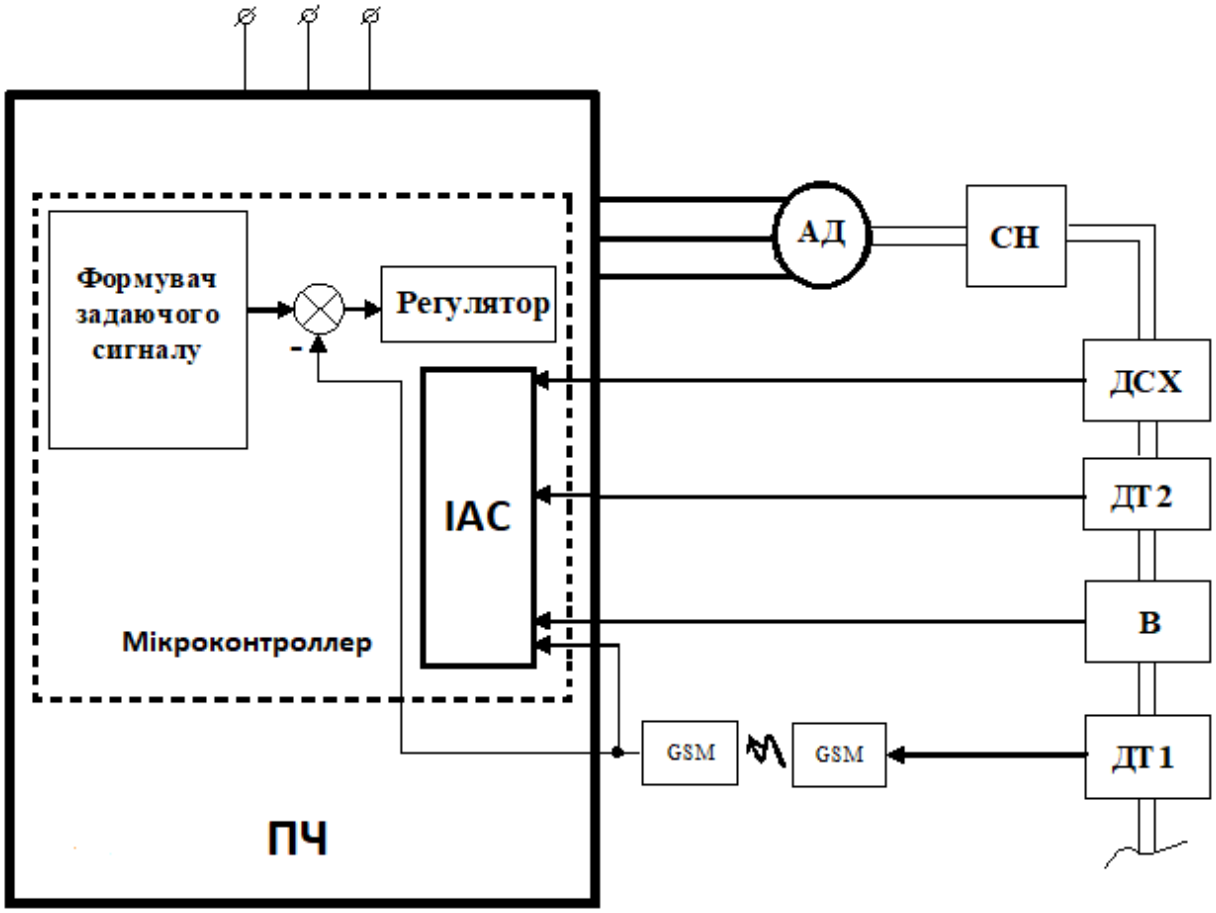


Рис. 2.1. Функціональна схема системи частотного управління електроприводом свердловинного насосу

Свердловинні насоси – це високоефективні пристрої, спеціально розроблені для видобутку води з глибоких свердловин та мають унікальну конструкцію. Двигун знаходиться внизу, насосна частина вгорі, забір води - з середини. Ця конструкція забезпечує ефективне охолодження двигуна, оскільки двигун глибинного насоса працює в надзвичайно суворих умовах експлуатації. При невеликому діаметрі він повинен забезпечувати на валу необхідний крутний момент.

Система автоматичного управління, представлена на рис. 2.1 працює наступним чином. При подачі живлення програма мікроконтролера та ПЧ перевіряють відсутність аварійних сигналів, а саме: відсутність аварійного сигналу від ДСХ, відсутність короткого замикання та обриву АД, якість електроживлення. Ці дані перевіряються і надалі при штатному функціонуванні. Якщо сигнали відсутні, мікроконтролером подається команда на запуск ПЧ. Частота на виході ПЧ наростає з заданим в ПЧ темпом. В цей час в трубопроводі наростає тиск. Сигнал з датчика тиску в кінці трубопроводу за допомогою комплекту модемів потрапляє на від'ємний вхід суматора. На додатній вхід суматора надходить один з еталонних сигналів з формувача задаючого сигналу (ФЗС). Вибір одного із еталонних сигналів в ФЗС здійснюється в залежності від часу доби (так як споживання води змінюється в залежності від пори доби і в кожному конкретному випадку визначається за допомогою статистичних даних). Сигнал похибки з суматора потрапляє на вхід І-регулятора, який змінює завдання на вихідну частоту ПЧ таким чином щоб відхилення (похибка) було зведене до нуля.

При досягненні потрібного тиску і відбувається перевірка на пошкодження трубопроводу. Значення витрат води надходять із витратоміра (В), а реальні втрати тиску обчислюються як різниця між тиском на насосній станції та тиском в кінці трубопроводу. ПЧ являється основним силовим модулем, який безпосередньо і здійснює частотне управління електродвигуном свердловинного насосу.

На рис. 2.2 представлена схема, яка показує зв’язки між елементами даної системи.

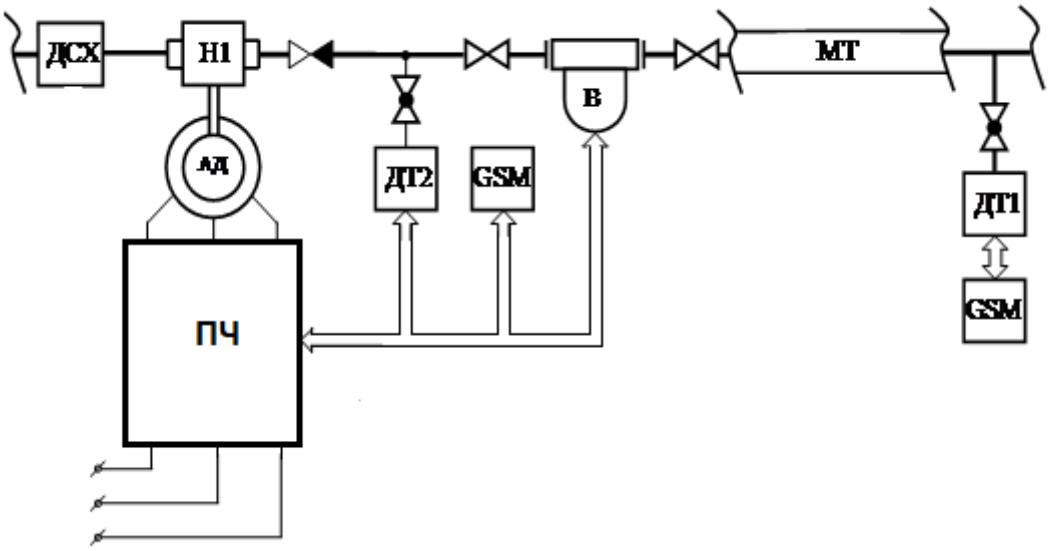


Рис. 2.2. Схема зв’язків між елементами системи управління

вентиль;

зворотний клапан;

кульовий кран;

МТ – магістральний трубопровод.

Виходячи із сформованих схем треба зробити вибір частотного перетворювача, двох датчиків тиску, датчика “сухого ходу”, витратоміра і, насамперед, двигуна та свердловинного насосу (насосного агрегату). Оскільки до привода АД насосної системи пред’являються дуже жорсткі вимоги, а переваги АД якнайповніше реалізуються при частотному управлінні, у якості привода АД обираємо частотний перетворювач фірми *Danfoss* VLT Aqua Drive типу FC-202, спеціально розроблений для застосувань у водопостачанні, та водовідведенні та який задовольняє усім вимогам до привода нашої насосної системи, а саме[2]:

– велика точність;

– надійність;

– широкий діапазон регулювання вихідної частоти;

– оптимізація енергоспоживання, що дозволяють знизити витрати електроенергії ;

– підтримує протоколи Modbus TCP та Profibus, що полегшує інтеграцію в автоматизовані системи.

Окрім того, даний частотний перетворювач має дуже добрі рекомендації, до його обслуговування та ремонту вже є вся необхідна інформація

Даний частотний перетворювач має наступні характеристики:

– напруга живлення 3х380В;

– максимальна потужність 4 кВт;

– частота живлення 50/60 Гц;

– вихідна частота 0.1 - 600 Гц;

– час сканування на вході 2,5 мс;

– кількість аналогових входів 2;

– швидкість, точність (замкнутий контур) <1500 об/хв., макс. похибка ±1,5 об/хв;

– захист від сухого ходу; компенсація потоків;

– допоміжне обладнання, яке підключається за технологією Plug&Play

– підтримує протоколи Modbus TCP та Profibus, що полегшує інтеграцію в автоматизовані системи.

Цифрові системи управління мають значні переваги у порівнянні з системами, реалізованими на аналогових елементах. Тому елементи малопотужної частини системи доцільно реалізувати за допомогою мікроконтролера. У частотному перетворювачі Danfoss VLT AQUA Drive FC-202 мікроконтролер вже інтегрований, що дозволяє реалізовувати всі необхідні функції управління без використання додаткових пристроїв. Він виконує формування завдаючого сигналу, порівнює його з сигналами від датчиків, визначає необхідну частоту (ω1) і напругу (U). Така інтеграція забезпечує високу стабільність

роботи, захищеність від перешкод та універсальність, дозволяючи адаптувати систему під конкретні задачі без використання зовнішніх елементів.

Для визначення тиску у трубопроводі обираємо датчики тиску *Siemens SITRANS P DS/PA,* які мають наступні характеристики наведені в табл. 2.1:

Таблиця 2.1

Характеристики датчика тиску *Siemens SITRANS P DS/PA*

Характеристика	Значення
Тип протоколу	*Profibus-PA*
Частота дискретизації, Гц	10
Діапазон вимірювання (абсолютний або відносний тиск), МПа	0-10
Робочий діапазон температур, °С	от -40 до +85
Матеріал, що контактує з середовищем	*AISI* 316
Клас захисту корпусу:	*IP*68
Точність виміру:	±0,075%
Напруга живлення, В	24
Вага, кг, не більше	1,2
Кількість, шт	2

Для захисту насосної установки від “сухого ходу” обираємо поплавковий вимикач *Wilo MS1*, який має наступні характеристики[4]:

– максимальна температура рідини – 80°С;

– провід – 3*1мм²;

– номінальний струм – 16А;

– маса з кабелем – 1.5 кг;

– довжина кабелю – 10м;

– матеріал поліпропілен (PP) – 1.5 кг.

Принцип дії поплавкового вимикача

Поплавковий вимикач підвішується на гнучкому та міцному кабелі, що дозволяє налаштувати його на потрібні рівні для режимів «включено», «вимкнено» та «аварія». Коли рівень рідини змінюється, положення поплавця теж змінюється, що призводить до активації або деактивації мікровимикача. Цей мікровимикач розриває або замикає електричне коло, унаслідок чого насос запускається, вимикається або подається аварійний сигнал. Для кожної команди на включення / вимикання вимагається один поплавок.

Галузь застосування даного пристрою.

Застосовується в комунальній, промисловій, побутовій стічній воді та агресивних або фекальних середовищ.

Поплавковий вимикач *Wilo MS1* стійкий до наступних рідин [4]:

Ссылка на источник:

- брудна вода;
- фекальна вода;
- побутові стічні води;
- вода від ванн і душових;
- миючі лужні розчини;
- дощова вода;
- ґрунтова вода;
- хлорована вода;
- промислові стоки.

Максимально допустима температура рідини становить 80 ˚С.

Поплавковий вимикач повинен бути встановлений таким чином, щоб він вільно висів у рідині, не торкаючись дна або стінок резервуара, а також не розташовувався поблизу арматури чи в зоні сильних течій рідини. Крім того, він повинен бути підключений до низьковольтного току через клеми приладу керування, а не безпосередньо до електричної мережі або насоса.

Обираємо насосний агрегат Optima з найбільш відповідними технічними параметрами — 4SD8/28, основні технічні характеристики якого наведені в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2

Характеристики свердловинного насоса 4SD8/28

Характеристика	Значення
Тип насоса	Відцентровий
Номінальна потужність двигуна, кВт потужність приводного ЕДВ,кВт	4
Діаметр насоса	4"
Діаметр підключення	2"
Номінальний напір, м	120
Номінальна подача, л/хв	120

У корпусі насоса, який зазвичай має спіральну форму, на валу жорстко закріплено робоче колесо. Воно може бути відкритого типу (диск на якому встановлені лопаті) і закритого типу - лопаті розміщені між переднім і заднім дисками. Лопаті відігнуті від радіального напрямку в сторону, протилежну напрямку обертання робочого колеса. За допомогою патрубків корпус насоса з'єднується з всмоктуючим і напірним трубопроводами.

За умови якщо корпус насоса повністю наповнений рідиною з усмоктувального трубопроводу, то при наданні обертання робочого колеса (наприклад, за допомогою електродвигуна) рідина, яка знаходиться в каналах робочого колеса (між його лопатями), під дією відцентрової сили буде відкидатися від центру колеса до периферії. Це призведе до виникнення розрідження в центральній частині колеса та підвищення тиску на його периферії. Підвищення тиску в насосі спричиняє переміщення рідини в напірний трубопровід. Це в свою чергу створює розрідження всередині корпусу насоса, яке стимулює потік рідини з усмоктувального трубопроводу

в насос. Отже таким чином, відбувається безперервна подача рідини відцентровим насосом з всмоктуючого в напірний трубопровід.

Відцентрові насоси бувають не тільки одноступінчастими (з одним робочим колесом), але і багатоступінчатими (з декількома робочими колесами), принцип їх дії в усіх випадках залишається незмінним, як і завжди. Рідина переміщується під впливом відцентрової сили, яка розвивається за рахунок обертового робочого колеса.

Обираємо комплект *GSM*-модемів Moxa 4G LTE Industrial Cellular Gateway (MGate 5102) — це надійний промисловий шлюз для віддаленого зв'язку, який підтримує мережі 4G LTE, 3G та 2G. Завдяки підтримці різноманітних протоколів зв'язку, включаючи **Profibus**, він є ідеальним рішенням для застосувань у системах автоматизації та управління, таких як системи управління електроприводами свердловинних насосів.

Пристрій дозволяє інтегрувати промислові мережі на основі Profibus з мобільними або дистанційними системами, забезпечуючи надійну передачу даних для моніторингу та керування, що важливо в умовах віддалених об'єктів або промислових процесів.

Moxa 4G LTE Industrial Cellular Gateway (MGate 5102) має кілька відмінних рис[3]:

- підтримка кількох стандартів мережі;
- підтримка протоколів (Modbus та Profibus);
- надійність і безпека (завдяки підтримці шифрування) ;
- простота інтеграції (завдяки простоті налаштування та підтримці різних протоколів) ;
- міцність і стійкість до зовнішніх впливів(температурний вплив та механічних навантажень) ;
- віддалений моніторинг (нагляду за обладнанням, яке знаходиться на великих відстанях).

Таблиця 2.3

Характеристики *GSM*-модемів Moxa 4G LTE Industrial Cellular Gateway (MGate 5102)

Характеристика	Значення
Стандарт зв'язку	*GSM* 900 / 1800 3G и 4G LTE
Пам'ять	400 кБ *RAM*, 1,7 Мб *Flash*
Живлення	DC 12 ... 48В
Розміри	36 x 105 x 140 мм
Вага	500 грамів
Діапазон температур	-40...+75 °C
Функції терміналів	4G LTE, 3G, and 2G Network Support , Data Transmission via SMS Web Interface for Remote Configuration, VPN Support, Cellular Modem Features
Послуги, які підтримуються оператором	USSD (Unstructured Supplementary Service Data) CSD (Circuit-Switched Data)
Інтерфейси / порти	*Serial (COM)* Ethernet (10/100 Mbps) Serial Ports (RS-232/RS-485),SIM Slot,USB порт

Висновки за розділом

В даному розділі дипломного проекту були розв'язані наступні задачі:

1. Розроблена функціональна схема системи частотного управління електроприводом свердловинного насосу.

2. Розроблена вимірювально-обчислювальна частина системи управління, для якої були вибрані наступні складові елементи:

- датчика тиску *Siemens SITRANS P DS/PA*;
- свердловинного насоса 4SD8/28;
- поплавковий вимикач Wilo *MS*-1 ;
- комплект *GSM*-модемів Moxa 4G LTE Industrial Cellular Gateway (MGate 5102) ;
- частотний перетворювач фірми *Danfoss* VLT Aqua Drive типу FC-202.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

3.1. Розробка алгоритму основної програми

Відповідно функціональній схемі (див.рис. 2.1), мікроконтролер який вбудований в ПЧ повинен виконувати дві основні задачі: підтримувати сталий тиск в трубопроводі в залежності від часу доби та формувати аварійні сигнали.

Для програми мікроконтролера вхідними даними є наступні сигнали:

P_1, P_2, P_3, P_4 P_1,P_2,P_3,P_4– приписані значення тиску;

T_1, T_2, T_3, T_4 – моменти часу доби, коли необхідно перемикати приписані значення тиску; Значення тиску та моменти часу задаються людиною-оператором під час налаштування системи;

D_{CX} – дискретний сигнал з датчика “сухого ходу”, приймає наступні значення: 1 – у скважині є вода; 0 – рівень води у скважині нижчий мінімально-необхідного;

P – цифровий сигнал з датчика тиску, встановленого в кінці напірного трубопроводу;

P' – цифровий сигнал з датчика тиску, встановленого в насосній установці;

$\Delta P_{ДОП}$ – допустиме відхилення втрат тиску від табличних значень.

Головна програма працює наступним чином (рис.3.1). Після подачі електроживлення в систему програма автоматично запускається. Відбувається прийом даних D_{CX} і P з відповідних датчиків та значень $P_1, P_2, P_3, P_4, T_1, T_2, T_3, T_4$ з панелі керування мікроконтролера.

Спершу аналізується сигнал від датчика "сухого ходу". У разі його спрацювання на панелі пч з’являється аварійне попередження та на відповідний вхід частотного перетворювача подається сигнал для зупинки електропривода насоса.

У подальшому етапі запускається підпрограма перевірки аварійних ситуацій. У цій підпрограмі визначається табличне значення втрат тиску для фактичної витрати води, здійснюється порівняння реальних втрат тиску із цим значенням, і формується сигнал аварії, якщо втрати перевищують допустимий рівень.

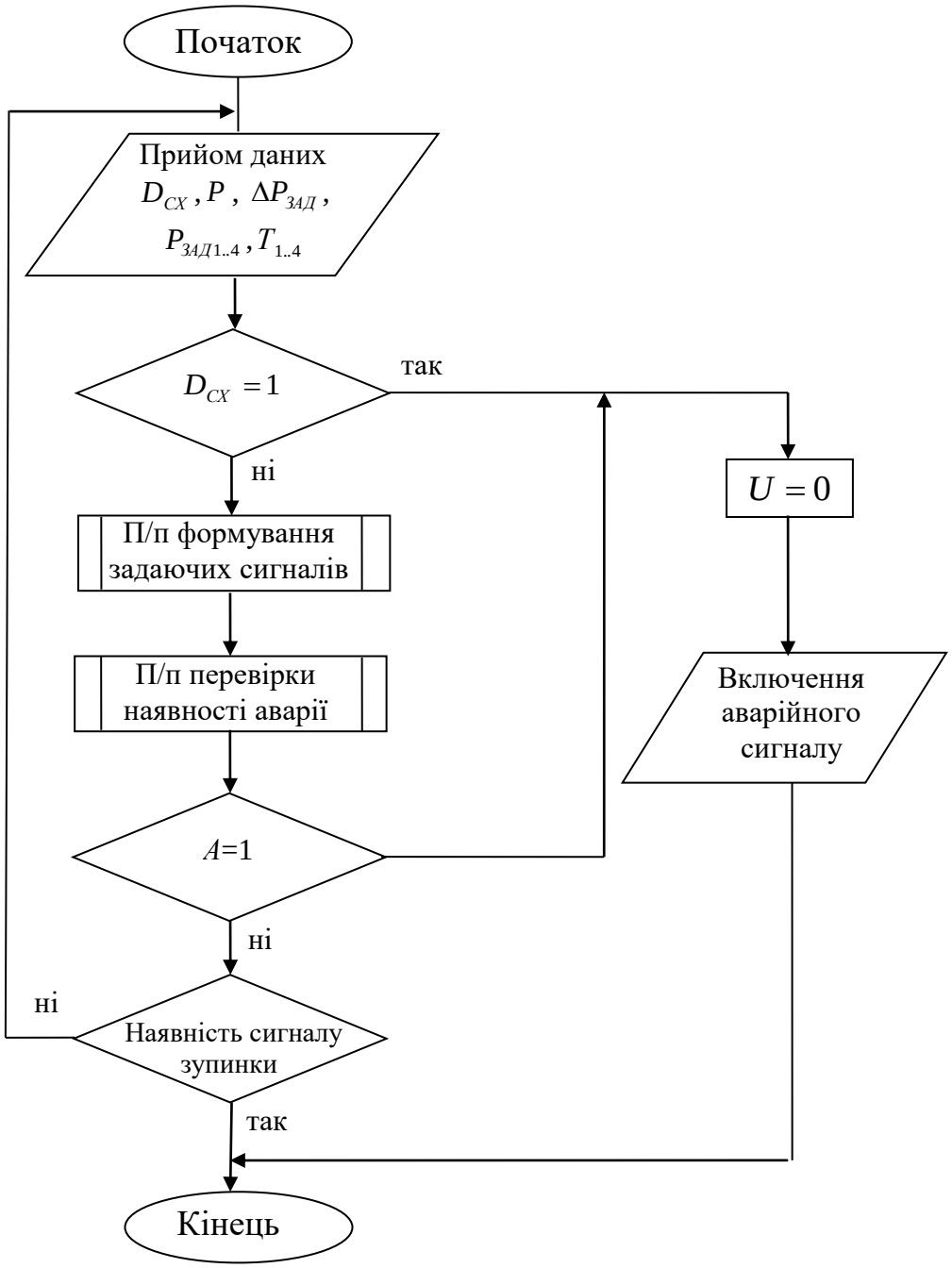


Рис. 3.1. Алгоритм програми мікроконтролера

Завершальним етапом роботи програми є перевірка наявності команди з панелі мікроконтролера для зупинки електродвигуна та частотного

перетворювача. Якщо така команда відсутня, весь цикл програми запускається повторно. Паралельно з основним циклом виконується підпрограма обробки переривань таймера.

У підпрограмі генерації формування задаючих (рис. 3.2) сигналів обирається потрібне значення $P_{ЗАД}$. Воно залежить від реального часу доби T_C. В залежності від того, в якому з чотирьох проміжків часу знаходиться T_C знаходиться відповідне значення $P_{ЗАД}$:

$$T_1 \le T_c < T_2 \Rightarrow P_{зад} = P_1;$$
$$T_2 \le T_c < T_3 \Rightarrow P_{зад} = P_2;$$
$$T_3 \le T_c < T_3 \Rightarrow P_{зад} = P_3;$$
$$T_4 \le T_c < T_4 \Rightarrow P_{зад} = P_4.$$

Підпрограма для виявлення аварії (рис. 3.3) призначена для генерації аварійного сигналу у разі прориву магістрального водопроводу або несанкціонованого підключення. Наявність прориву або несанкціонованого підключення вважається встановленим, коли втрати тиску в магістральному трубопроводі перевищують допустимі значення для будь-якого реального витоку води.

Для нормальної роботи підпрограми в пам'ять мікроконтролера попередньо вводяться табличні дані, які показують залежність втрат тиску від витрати води. Значення витрат записуються в лінійному порядку. Для трубопроводів діаметром до 200 мм зазвичай достатньо 100 пар значень «витрата – втрата тиску». Ці дані для конкретних діаметрів труб, матеріалу та ступеня зносу отримуються з спеціальних таблиць.

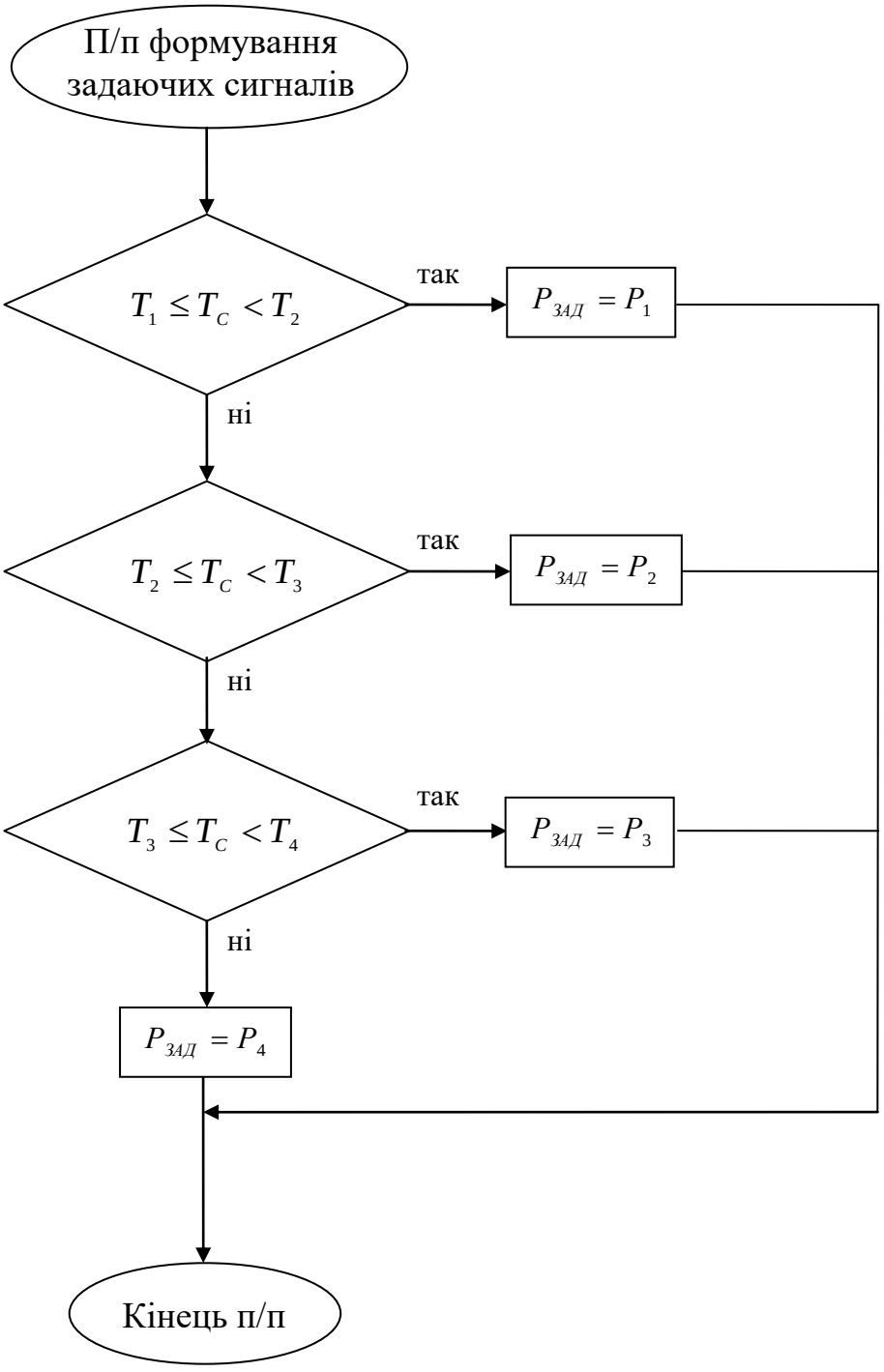


Рис. 3.2. Алгоритм підпрограми формування задаючих сигналів

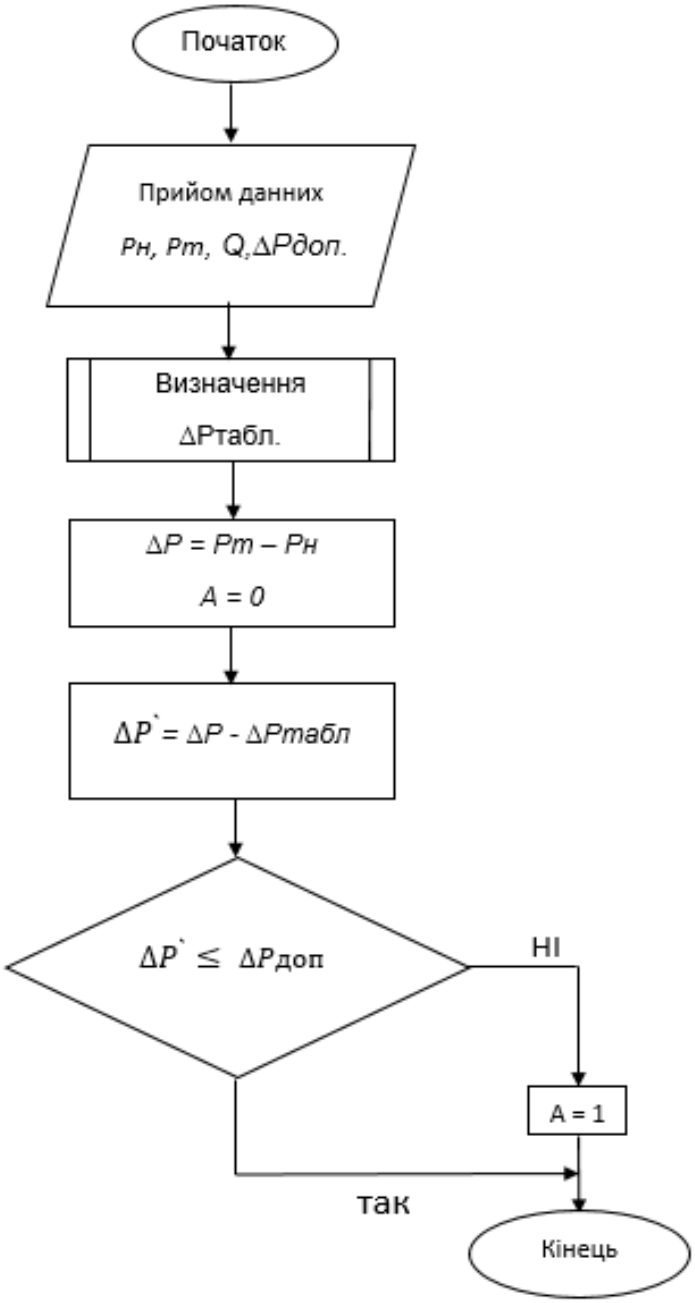


Рис. 3.3. Алгоритм підпрограми перевірки наявності аварії

Таким чином, вхідними даними для підпрограми являються :

P_m – значення тиску в кінці напірного трубопроводу;

$P_н$ – значення тиску в насосній установці;

Q – реальна витрата води;

$\Delta P_{ДОП}$ – допустиме відхилення втрат тиску від табличних значень.

Робота підпрограми відбувається наступним чином. Спочатку в таблиці здійснюється пошук найближчого значення витрати води, отриманого від витратоміра, і відповідного йому значення втрати тиску. Далі знайдене табличне значення втрати тиску порівнюється з фактично виміряним. У випадку, якщо різниця між цими значеннями перевищує допустимий поріг, генерується сигнал аварії. Варто зазначити, що якщо значення витрати води не буде знайдено в таблиці (що вказує на перевищення максимально допустимої витрати для даного трубопроводу), також формується сигнал аварії.

На рисунку 3.4. представлений алгоритм обробки переривань таймера, який реалізує інтегральний (I) регулятор.

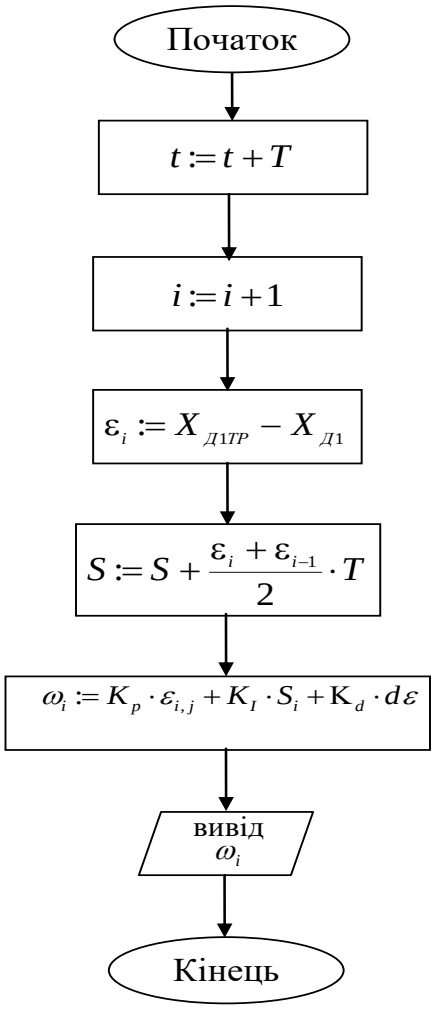


Рис. 3.4. Алгоритм обробки переривань таймера (алгоритм роботи I-регулятора)

У цій системі найбільш раціонально використовувати пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор, який працює за перериваннями таймера-лічильника. Початок роботи І-регулятора визначається умовою, в якій логічна "1" означає його роботу. Далі виконується інкремент лічильника таймера і обчислення різниці між заданим значенням тиску та поточним регульованим (обчислюється помилка). Потім виконується інтегрування помилки методом трапецій, після чого визначається нове значення частоти ω1, що є задаючим сигналом для частотного перетворювача.

Таким чином, на основі функціональної схеми (див. рис. 2.1) було розроблено алгоритм керуючої програми та підпрограм, які виконують дві ключові функції: формування вхідних сигналів і формування потрібного значення тиску P залежно від сигналів, отриманих з датчика тиску.

Висновки за розділом

У цьому розділі дипломної роботи були розв'язані наступні завдання:

1.Створено алгоритм керуючої програми для мікроконтролера, що складається з основної програми та підпрограм алгоритму для перевірки наявності аварій, обробки переривань таймера (І-регулятор) і формувача задаючих сигналів.

2. Створено алгоритм роботи програми та підпрограм, що входять до основної програми.

РОЗДІЛ4

РОЗРАХУНОК РЕГУЛЯТОРА СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ

4.1 Розрахунок динамічних параметрів електропривода

За каталогом [12] визначаємо параметри електродвигуна, наведені в табл 4.1.

Таблиця 4.1

Паспортні дані асинхронного електродвигуна 4А100L4У3

Характеристика	Значення
Номінальна потужність $P_н$, кВт	4
Число пар полюсів $p_п$	2
Номінальна частота напруги статора $\omega_{1н}$, рад/с	314
Кратність пускового моменту $m_п$	2
Кратність максимального (критичного) моменту $m_к$	2,4
Номінальне ковзання $s_{ном}$, %	4,6
Критичне ковзання $s_к$, %	31,5
Динамічний момент інерції ротора $J_{д.р}$, Н·м^2	0,011

На рис. 4.1 Зображена спрощена структурна схема динамічної моделі асинхронного електродвигуна у приростах.

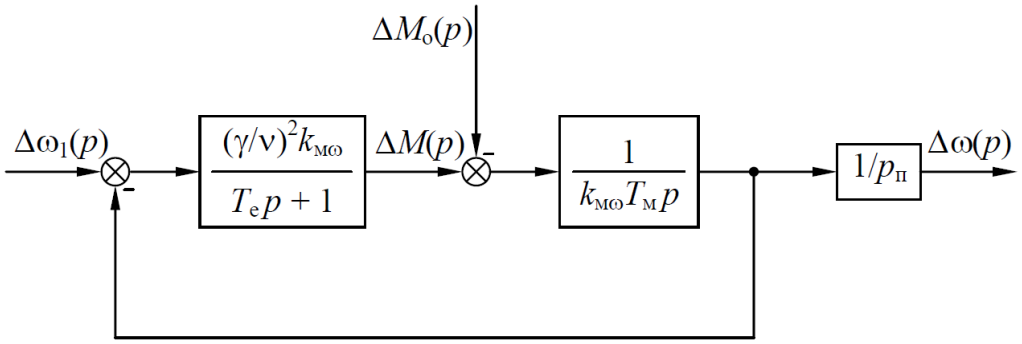


Рис. 4.1. Спрощена структурна схема асинхронного електродвигуна у приростах при частотному керуванні

На схемі прийняті наступні позначення: $\Delta\omega_1$ – приріст частоти напруги статора; $k_{м\omega} = M_{п.ф} / \omega_{1н}$ – відношення фіктивного пускового моменту $M_{п.ф}$ до номінальної частоти напруги статора $\omega_{1н}$; ΔM – приріст моменту двигуна; $\Delta M_о$ – приріст моменту опору; $p_п$ – число пар полюсів ($p_п = 2$);

T_e – електромагнітна постійна часу двигуна; $T_м$ – механічна постійна часу двигуна; $\Delta\omega$ − приріст частоти обертання ротора двигуна.

Розрахуємо значення параметрів структурної схеми. Номінальна частота напруги статора:

$$\omega_{1н} = 2\pi \cdot 50 = 314 \text{ (рад/с)}.$$

Швидкість обертання магнітного поля (синхронна частота):

$$\omega_С = \frac{\omega_{1н}}{p_П} = \frac{314}{2} = 157 \text{ (рад/с)}.$$

Номінальна швидкість обертання ротора:

$\omega_н = \omega_с \cdot (1\text{-}s_{ном}) = 157 \cdot (1\text{-}0{,}046) = 149{,}7$ (рад/с).

Номінальний момент:

$$M_н = \frac{P_н}{\omega_н} = \frac{4 \cdot 10^3}{149.7} = 26.7 \ (Н \cdot м).$$

Максимальний момент:

.

$$M_{max} = m_k M_н = 2{,}4 \cdot 26{,}7 = 0{,}64 \cdot 10^3 \text{ (Н} \cdot \text{м)}.$$

Фіктивний пусковий момент та його відношення до номінальної частоти напруги статора:

$$M_{п.ф} = \frac{2M_{max}}{s_к} = \frac{0{,}64 \cdot 10^3}{0{,}315} = 0{,}2031 \cdot 10^4 \ (Н \cdot м);$$

$$k_{\text{мω}} = \frac{M\text{п.ф}}{\omega_{1\text{н}}} = \frac{0{,}2031 \cdot 10^4}{314} = 6{,}46\ (H \cdot м/с);$$

Електромеханічна постійна часу електропривода:

$$T_{\text{м}} = \frac{J \cdot \omega_{\text{с}}}{M\text{п.ф}},$$

де J – момент інерції частини електропривода, що обертається.

Приймаємо

$$J = 2J_{Д.Р} = 2 \cdot 0{,}011 = 0{,}0022\ \text{Н·м}^2.$$

Тоді

$$T_{\text{м}} = \frac{J \cdot \omega_{\text{с}}}{M\text{п.ф}} = \frac{0{,}0022 \cdot 157}{0{,}2031 \cdot 10^4} = 0{,}001\ (\text{с}).$$

Електромагнітна постійна часу :

$$T_{\text{е}} = \frac{1}{\omega_{1н} \cdot s_к} = \frac{1}{314 \cdot 0{,}315} = 0{,}0101\ (\text{с}).$$

У спрощеній математичній моделі можна вважати, що момент опору про-порційний швидкості обертання вала двигуна:

$$M_o(t) = b \cdot \omega(t),$$

де b – коефіцієнт в’язкого тертя. Коефіцієнт b визначається як відношення номінального моменту двигуна до номінальної частоти обертання:

$$b = \frac{M\text{н}}{\omega_н} = \frac{26{,}7}{149{,}7} = 0{,}17\ \ (H \cdot c).$$

На рис. 4.2. зображена спрощена структурна схема асинхронного двигуна у приростах з урахуванням моменту опору.

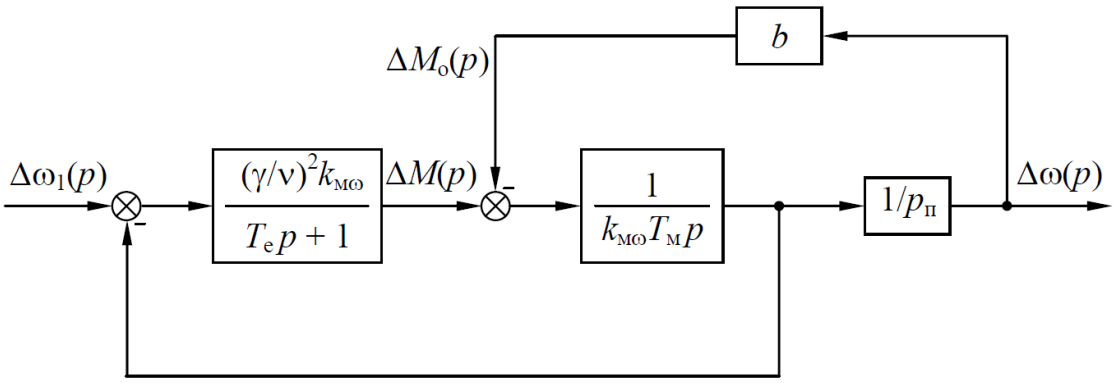


Рис. 4.2. Спрощена структурна схема асинхронного електродвигуна у приростах з урахуванням моменту опору

Номінальний тиск насоса:

$$P_{ном} = \rho g H_{ном} = 10^3 \cdot 9{,}8 \cdot 120 = 1{,}176 \cdot 10^6 \text{ (Па)},$$

де $\rho = 10^3$ кг/м^3 – густина води;

g – прискорення вільного падіння (9,8 м/с^2) ;

$H_{ном}$ – номінальна висота підйому рідини.

Коефіцієнт пропорційності між тиском на виході насоса і його швидкістю обертання:

$$k_н = \frac{P_{ном}}{\omega_н} = \frac{1{,}176 \cdot 10^6}{149{,}7} = 7{,}85 \cdot 10^3 \text{ (Па·с)}.$$

Швидкість розповсюдження тиску в трубопроводі:

$$c \approx 0{,}8 c_{зв} = 0{,}8 \cdot 1435 = 1148 \text{ (м/с)},$$

де $c_{зв} = 1435$ м/с – швидкість розповсюдження звукової хвилі у воді.

Час проходження хвилі тиску від насоса до датчика ДТ1:

$$T_p = \frac{l}{c} = \frac{100}{1148} = 87 \cdot 10^{-3} \text{(с)}.$$

де l =100м – довжина трубопроводу.

4.2 Побудова динамічної моделі нескоригованої системи керування у програмі *Simulink*

На підставі структурної схеми асинхронного двигуна у приростах (рис. 4.2) і визначених параметрів двигуна, насоса, трубопроводу і датчика тиску складаємо динамічну модель нескоригованої системи керування електроприводом насоса у програмі *Simulink* (рис. 4.3).

Час проходження хвилі тиску в трубопроводі T_p в моделі враховується за допомогою ланки затримки "*Transport Delay*", а затримка сигналу датчика T – ланкою затримки "*Unit Delay*". Налаштування цих ланок показано на рис. 4.4.

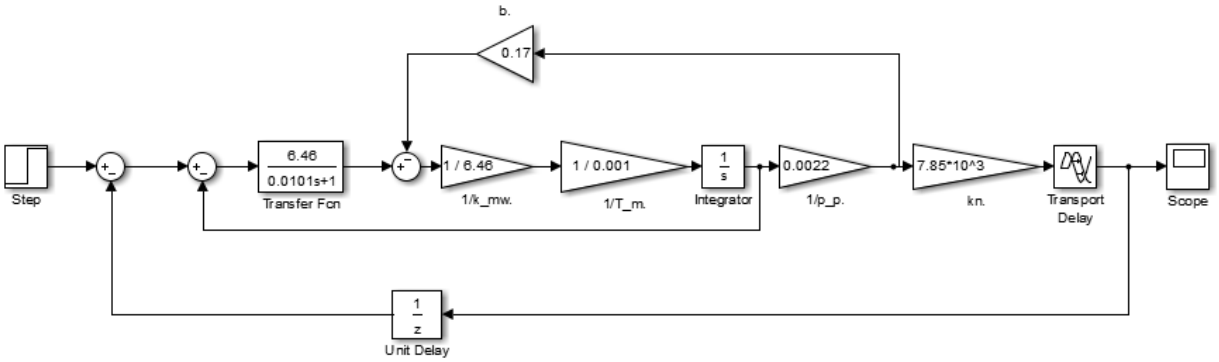


Рис. 4.3. Динамічна модель нескоригованої системи керування у програмі *Simulink.*

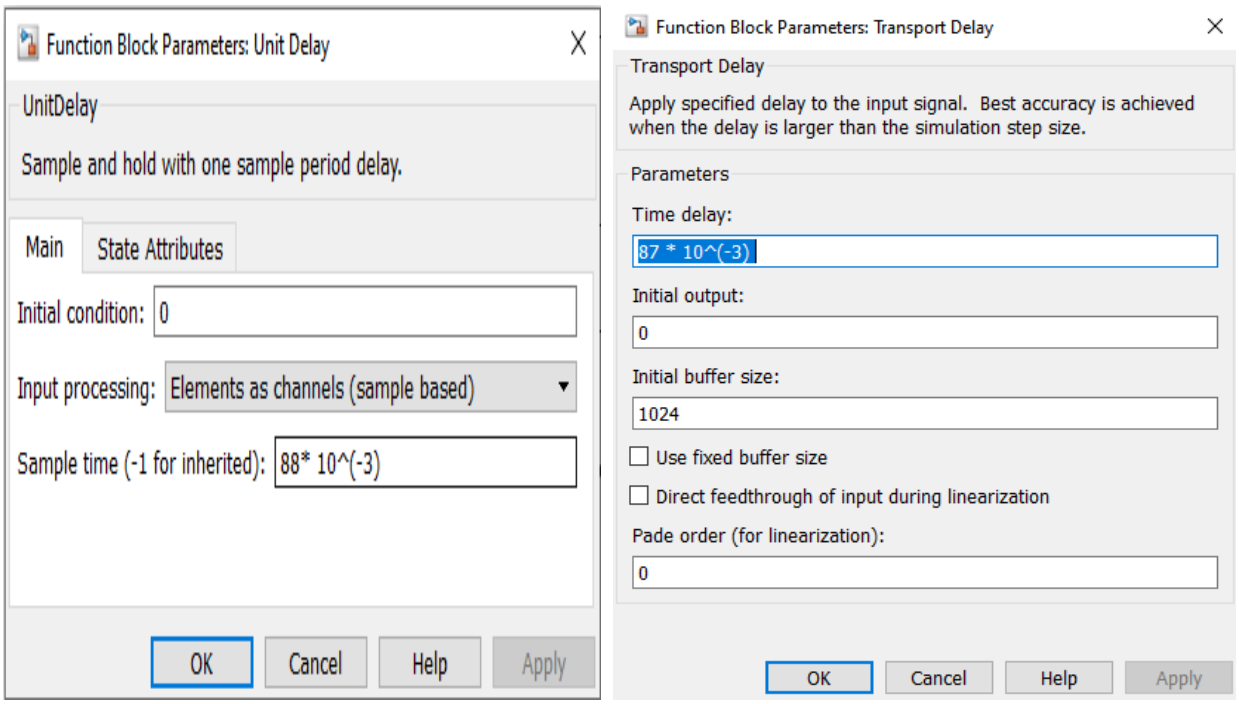


Рис. 4.4. Налаштування блоків "*Transport Delay*" і "*Unit Delay*"

У параметрах сходинкового вхідного сигналу "*Step*" задаємо *Step time* = 0. В налаштуваннях віртуального осцилографа "*Scope*" прибираємо обмеження кількості точок даних (*Scope→Parameters→History→Limit data points to last*). Задаємо максимальний крок моделювання 10^{-3} с (*Simulation→Model Configuration Parameters→Max step size* = 10^-3). Схема готова до моделювання.

4.3 Вибір структури регулятора та визначення його коефіцієнтів

Оскільки, датчик тиску має великий період дискретизації (0,088 с), який значно перевищує обидві постійні часу електродвигуна, то в результаті загальні перехідні процеси у системі складатимуться з послідовностей перехідних процесів, які є реакціями системи на сходинкові сигнали помилки.

Для уникнення зазначених явищ, будемо використовувати інтегральний регулятор з періодом дискретизації $T = 0{,}001$ с, що дорівнює найменшій постійній часу двигуна. В цьому випадку на виході інтегратора сигнал буде кусково-лінійним і не буде викликати значних прискорень.

Цифровий І-регулятор має наступну передавальну функцію:

$$W_c(z) = \frac{k_I T z}{z-1}.$$

На рис. 4.5. зображена структурна схема цифрового І-регулятора.

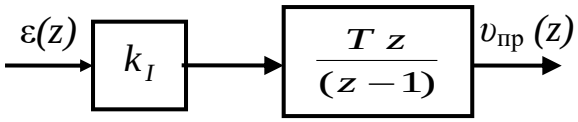


Рис. 4.5. Цифровий І-регулятор

Визначимо передавальну функцію цифрового регулятора так, щоб система задовольняла потрібним критеріям якості. Керований процес заданий передавальною функцією в операторній формі:

$$W_1(p) = k_{д1}\, W_{дв}(p) k_н = \frac{6.46 \cdot 7.85 \cdot 10^{-3}}{p(1 \cdot 10^{-6} \cdot p^2 + 2.002 \cdot p + 2)}.$$

Розімкнена система без корекції має дискретну передавальну функцію:

$$W_{h0} W_1(z) = (1 - z^{-1})\, z \left[\frac{6.46 \cdot 7.85 \cdot 10^{-3}}{p(1 \cdot 10^{-6} \cdot p^2 + 2.002 \cdot p + 2)}\right].$$

Таким чином, щоб отримати передавальну функцію цифрового регулятора, потрібно виконати наступні розрахунки (для цього використовуємо середовище програмування Mathcad):

1. Виконаємо зворотне перетворення Лапласа, використовуючи функцію invlaplace, при цьому отримаємо рівняння імпульсної характеристики нескоригованої системи:

$W_{н.с}(t)$ =3874.0259740259740260 – 3874. 0259740259740260· exp(-50.· t)· cos (314.34978841043333923· t)- 616.19668866578347028 · exp (-50.· t) · sin (314.34978841043333923· t)

2. Виконаємо z-перетворення, використовуючи функцію ztrans (період квантування приймемо рівним T=0,088 (с):

$$W_{н.с}(z) = \frac{3{,}909 \cdot 10^3 \cdot (z + 0{,}011)}{z^2 - 0{,}02 \cdot z + 1{,}507 \cdot 10^{-4}}.$$

Коефіцієнт помилки за швидкістю визначається наступним рівнянням:

$$k_v = \frac{1}{\lim\limits_{z\to 1}(\mathrm{z}-1)\cdot \mathrm{W}(z)} = \frac{1}{k_{\mathrm{I}}\cdot W_{\mathrm{н.с}}(1)}.$$

Задамо коефіцієнт помилки за швидкістю:

$$k_v = 0{,}002 \text{ с}.$$

Визначаємо коефіцієнт інтегратора k_I:

$$k_{\mathrm{I}} = \frac{1}{k_v \cdot W_{\mathrm{н.с}}(1)} = \frac{1}{0{,}002\cdot 3{,}858\cdot 10^3} = 0{,}13 \text{ с}^{-1}.$$

Динамічна модель системи керування з І-регулятором наведена на рис. 4.6 .

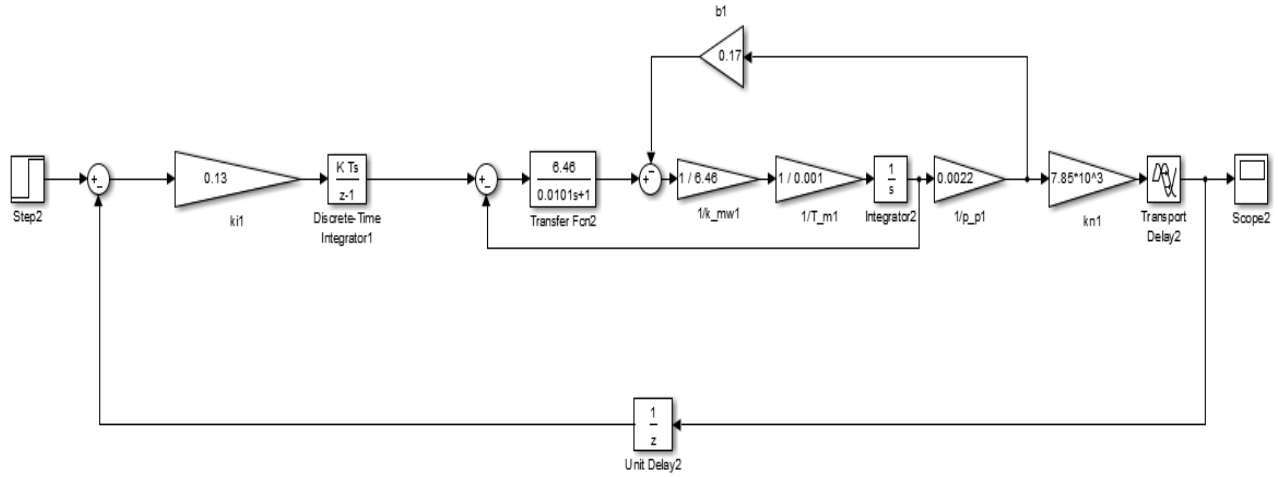
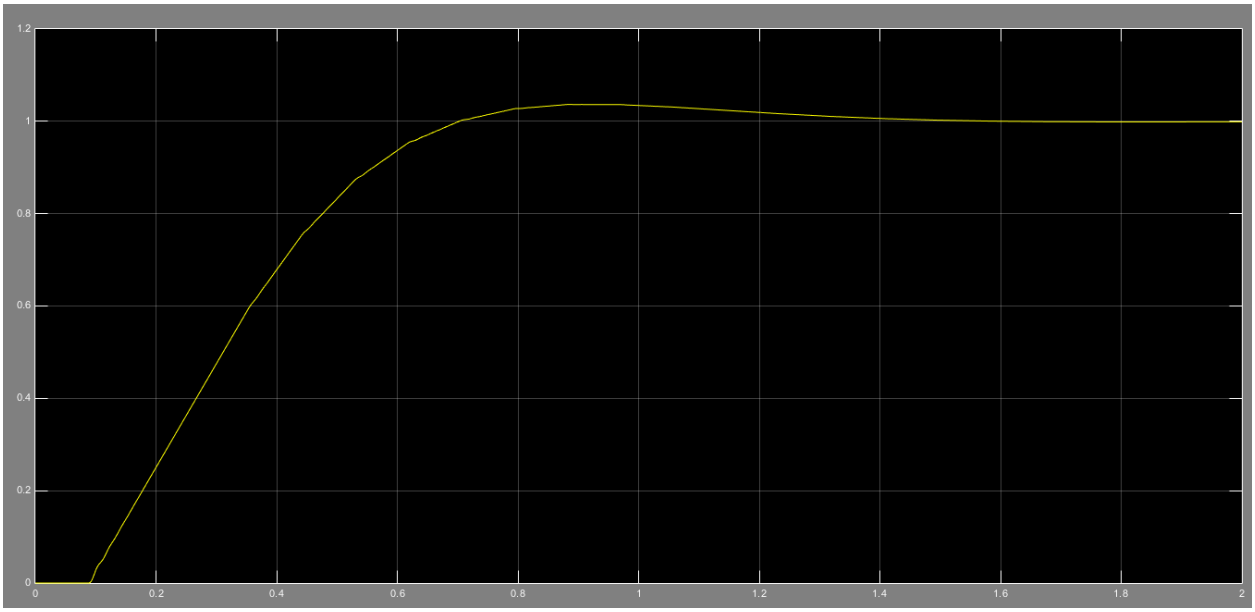
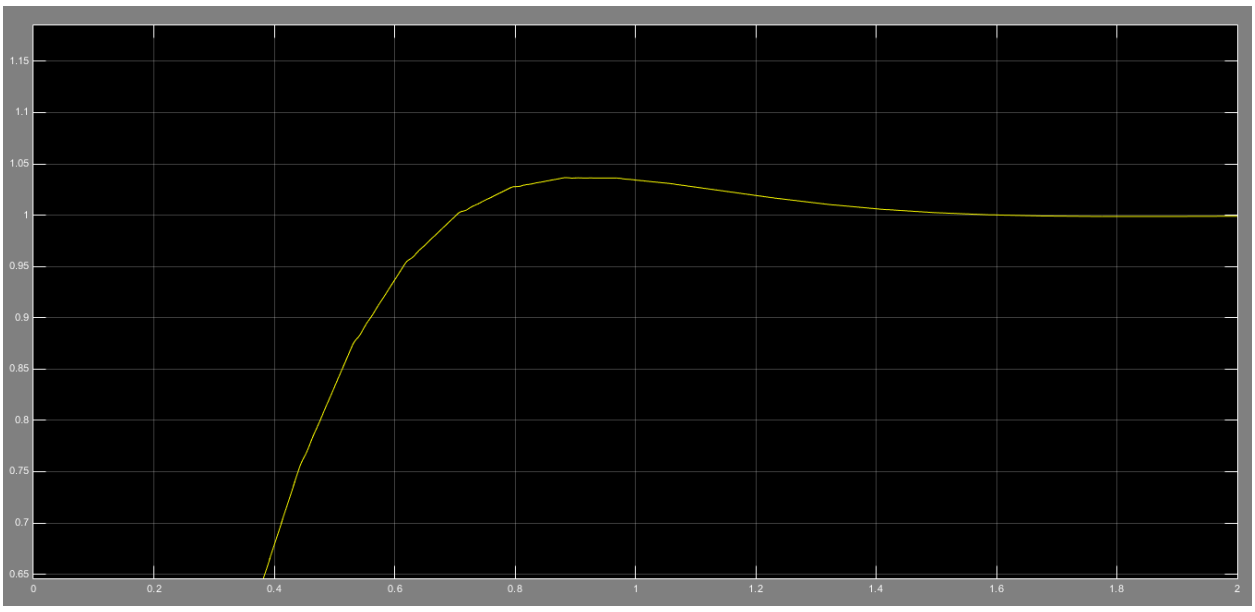


Рис. 4.6. Динамічна модель системи керування з І-регулятором.

В результаті моделювання отримуємо перехідну характеристику системи керування, як реакцію на одиничний сходинковий сигнал (рис. 4.7.).



а



б

Рис. 4.7. Графіки перехідних характеристик.

Результати розрахунків зводимо до таблиці 4.2.

Таблиця 4.2

Коефіцієнт І - регулятора і показники якості керування

k_i, с$^{-1}$	$t_{п.п}$, с	σ, %
0,13	0,6	4

Визначаємо показники якості керування: максимальне перерегулювання σ = 4 %, час перехідного процесу $t_{п.п}$ = 0,6 с.

Таким чином, отримані значення коефіцієнта регулятора забезпечать наведені в табл. 4.2 показники якості керування.

Висновки за розділом

Аналіз шляхів модернізації насосних станцій показав, що застосування частотно-керованого електроприводу дозволяє істотно зменшити енергоспоживання, а також суттєво збільшити ресурс роботи насосів.

В даному розділі побудована динамічна модель керованого електропривода насоса у програмі *Simulink.*

Для забезпечення якісного керування тиском обрано І-регулятор. Шляхом числового моделювання за допомогою розробленої динамічної моделі визначено коефіцієнт регулятора: k_I = 0,13с.

Розроблений регулятор при співпаданні параметрів об’єкта керування з параметрами моделі забезпечує наступні показники якості керування: час перехідного процессу $t_{п.п}$ = 0,6 с; максимальне перерегулювання δ max = 4% остаточне налаштування регулятора потрібно здійснювати на стадії випробування електропривода.

РОЗДІЛ 5

ОХОРОНА ПРАЦІ

5.1. Основні положення охорони праці

Охорона праці (англ. *labour protection*; нім. *Arbeitsschutz*) — це сукупність правових, соціально-економічних, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних і лікувально-попереджувальних заходів та засобів, спрямованих на збереження життя, здоров'я і працездатності людини під час трудової діяльності [11].

Людина живе і працює в середовищі, яке складається з природних компонентів і штучно створених об'єктів, тобто техносфери, сформованої в процесі розвитку суспільства (виробництво, транспорт, побут). Однією з ключових складових техносфери є виробництво, де людина виконує свою трудову діяльність, перебуваючи під впливом різних небезпечних, шкідливих і травмуючих факторів. У техносфері негативний вплив спричиняється як елементами техносфери (машини, споруди, технології тощо), так і діями самої людини.

Сучасне виробництво характеризується використанням різноманітних технологічних процесів, складних за своєю фізико-хімічною природою, а також застосуванням нових матеріалів, які ще недостатньо вивчені щодо їхнього негативного впливу на людину та навколишнє середовище. На окремих підприємствах активно використовуються високотоксичні та легкозаймисті речовини, а також джерела різних видів випромінювань. Технологічні процеси нерідко супроводжуються підвищеним рівнем шуму, вібрації, ультразвуку й інфразвуку. Крім того, багато робіт виконується в умовах запиленості й загазованості. Паралельно у всіх сферах діяльності людини відбувається інтенсивна комп’ютеризація, яка, хоча й сприяє підвищенню ефективності та зручності, також може бути пов’язана з негативними факторами, що впливають на здоров’я.

Безпечні конструкції електричних пристроїв і апаратів мають гарантувати здоров'я та безпечні умови праці для обслуговуючого персоналу та виробничих робітників, які взаємодіють із цим обладнанням. Однак у процесі експлуатації можливі порушення технологічного режиму (наприклад, несправності обладнання чи помилки оператора), що за певних обставин може створювати загрозу для людей, які перебувають поруч із електроустановками. Абсолютно безпечних і нешкідливих виробництв не існує, тому основним завданням є мінімізація ризиків для здоров'я працюючих, забезпечення комфортних умов праці та досягнення максимальної продуктивності.

Законодавство України про охорону праці є системою взаємопов’язаних нормативних актів, які регулюють відносини у сфері реалізації державної політики, спрямованої на забезпечення правових, соціально-економічних і лікувально-профілактичних заходів для збереження здоров’я та працездатності людини під час трудової діяльності. Ця система складається із загальних законів України та спеціалізованих нормативно-правових актів. Основними загальними законами, що визначають ключові положення у сфері охорони праці, є Конституція України, Кодекс законів про працю України та Закон України "Про охорону праці".

До спеціальних законодавчих актів у галузі охорони праці належать державні нормативні акти з охорони праці (ДНАОП) – правила, стандарти, норми, положення, інструкції та інші документи, яким надано чинність правових норм, обов'язкових до виконання.

Умови праці на кожному робочому місці мають відповідати вимогам нормативних актів з охорони праці, зокрема:

- безпека технологічних процесів, машин, механізмів, обладнання та інших виробничих засобів;
- належний стан засобів колективного й індивідуального захисту;
- відповідність санітарно-побутових умов встановленим стандартам.

5.2. Аналіз небезпечних і шкідливих факторів при випробуванні та експлуатації свердловинного насосу

Присутність джерела небезпеки не завжди означає, що людині чи групі людей обов'язково буде завдано шкоди або ушкоджень. Воно лише вказує на існування або можливість виникнення конкретної небезпечної ситуації, за якої може бути завдано шкоди. Матеріальні збитки, пошкодження, шкода здоров'ю, летальні наслідки чи інші негативні наслідки спричиняє конкретний вражаючий фактор.

Вражаючі фактори прийнято називати чинники навколишнього середовища, які за певних умов можуть завдавати шкоди як людям, так і системам їх життєзабезпечення, а також спричиняти матеріальні збитки. За походженням вони поділяються на фізичні (включно з енергетичними), хімічні, біологічні, соціальні та психофізіологічні. Вплив вражаючих факторів на організм людини може мати різні наслідки, тому їх класифікують на шкідливі та небезпечні залежно від ступеня загрози.

Шкідливі фактори називають такі чинники навколишнього середовища, які викликають погіршення самопочуття, зниження працездатності, розвиток захворювань і, у деяких випадках, можуть призвести до смерті внаслідок хвороби.

Небезпечними факторами є чинники, які можуть спричинити травми, опіки, обмороження, інші пошкодження організму або його окремих органів, і навіть призвести до раптової смерті.

Хоча поділ вражаючих факторів на небезпечні та шкідливі є досить умовним, оскільки іноді важко чітко визначити, до якої з цих груп належить певний фактор, він ефективно застосовується в охороні праці для організації розслідувань та обліку нещасних випадків і професійних захворювань, налагоджування роботи, спрямованої на розробку заходів і засобів захисту працівників, а також на профілактику травматизму та захворюваності на виробництві.

За характером та природою впливу всі небезпечні та шкідливі фактори поділяються на чотири групи: фізичні, хімічні, біологічні та психофізіологічні [5].

Їх основна характеристика:

1. Фізичні:

– підвищена швидкість руху повітря;

– підвищена або понижена вологість;

– підвищений або понижений атмосферний тиск;

– недостатня освітленість;

– конструкції, що руйнуються;

– підвищений рівень статичної електрики та ін.

2. Хімічні:

– хімічні елементи, речовини та сполуки, які перебувають у різному агрегатному стані (твердому, газоподібному, рідкому);

– які різними шляхами проникають в організм людини через органи дихання, через шлунково-кишковий тракт, через шкірні покрови та слизові оболонки які за характером дії виділяють такі речовинній (токсичні, наркотичні, подразнюючі, задушливі, сенсибілізуючі, канцерогенні, мутагенні, такі, що впливають на репродуктивну функцію).

3. Біологічні:

– макроорганізми (рослини та тварини);

– мікроорганізми (бактерії, віруси, рикетсії, спірохети, грибки, найпростіші).

4. Психофізіологічні

– фізичні перевантаження (статичні, динамічні);

– нервово-психічні перевантаження (розумові перевантаження, перевантаження аналізаторів, монотонність праці, емоційні перевантаження).

Небезпечні та шкідливі фактори часто є прихованими, неявними або ж такими, які важко виявити чи розпізнати. Це стосується не лише самих небезпечних та шкідливих факторів, так само як і джерел небезпеки, які їх викликають.

У приміщенні, де встановлена система вентиляції, під час її експлуатації можуть виникати такі небезпечні та шкідливі фактори: рухомі частини механізмів, вібрація, шум, вплив на людину електричного струму, а також пожежна небезпека.

Рухомі частини обертових пристроїв можуть спричинити серйозні фізичні травми при контакті з ними, а частини, що рухаються поступально, – забої та переломи.

Насиченість приміщення електроустаткуванням призводить до підвищення небезпеки ураження електричним струмом. Пошкодження та несправність електричних пристроїв і проводки, а також неналежне використання електроустаткування можуть викликати короткі замикання та призвести до виникнення пожежі.

5.2.1. Вплив шуму на організм людини

Шум – це сукупність звуків різної частоти та інтенсивності, що виникають у результаті коливального руху частинок у пружних середовищах (твердих, рідких, газоподібних). Поняття шумового забруднення формується в результаті вивчення впливу різноманітних звуків на людину. Інтенсивність шумового забруднення (тиску) вимірюється в децибелах (дБ). Шуми інтенсивністю 30-80 дБ не наносять шкоди людському організму. Водночас шуми інтенсивністю 85 дБ і більше призводять до фізіологічних і психологічних негативних наслідків на нервову систему, сон, емоції, працездатність. Дуже сильний шум (понад 140 – 180 дБ) може викликати розірвання барабанної перетинки. Постійна дія сильного шуму може не лише негативно вплинути на слух, але й викликати інші шкідливі наслідки – дзвін у вухах, запаморочення, головний біль, підвищення втоми, зниження працездатності [6].

Шум має накопичувальний ефект, тобто акустичні подразнення поступово накопичуються в організмі людини, що посилює негативний вплив. Шум негативно впливає на різні системи організму: серцево-судинну,

нервову, порушує сон, увагу, збільшує роздратованість, депресію, неспокій, подразнення, може впливати на дихання і травну систему. Ушкодження слухової функції з тимчасовою або постійною втратою слуху, порушення здатності передавати та сприймати звуки мовного спілкування, відволікання уваги від звичайних занять, зміни фізіологічних реакцій людини на стресові сигнали, вплив на психічне і соматичне здоров'я, дію на трудову діяльність і продуктивність праці. Дослідження свідчать що шум має накопичувальний ефект, тобто акустичні подразнення поступово накопичуються в організмі людини, що посилює негативний вплив шуму на центральну нервову, серцево-судинну систему і органи травлення. Порушення стану функціонування центральної нервової системи під впливом шуму призводить до ослаблення уваги і працездатності, особливо розумової.

На сьогодні проблема шумового забруднення є дуже актуальною, оскільки воно зростає з часом все більше, особливо у містах.

5.2.2. Вплив вібрації на організм людини.

Вібрація (англ. vibration) — це механічні коливання твердих тіл або систем, які виникають під дією зовнішніх чи внутрішніх сил. Вона характеризується такими параметрами, як частота, амплітуда зміщення (максимальне відхилення від положення рівноваги), швидкість і прискорення коливань. Ступінь і характер впливу на людину залежить від амплітуди і частоти коливань. Так, власні частоти внутрішніх органів знаходяться в області 6 – 9 Гц. Отже, вібрація машин, площадок, ручних інструментів і т. д. особливо небезпечна при частотах 8 – 12; 17 – 25 Гц і т. д., тому що вони можуть бути резонансними для органів. При роботі з ручними машинами (їхня вібрація знаходиться в області 100 Гц) виникають судинні розлади. Загальна вібрація, що має широкий спектр частоти, справляє несприятливий вплив на центральну нервову систему, вестибулярний апарат, шлунково-кишковий тракт, викликає запаморочення, оніміння кінцівок, захворювання

суглобів. Тривалий вплив вібрації на організм може призвести до професійного захворювання, відомого як вібраційна хвороба.

Вібрація спостерігається майже на всіх ділянках трубопроводу установки. Її вплив на людський організм може призвести не лише до погіршення загального самопочуття, але й до розвитку професійних захворювань. Функціональні зміни, такі як підвищена втомлюваність, зниження гостроти зору, уповільнення рухових реакцій і порушення координації, спричиняють зниження ефективності праці. У разі тривалого впливу вібрації виникають фізіологічні зміни, зокрема захворювання нервової системи, порушення роботи серцево-судинної системи та опорно-рухового апарату, що може призвести до розвитку вібраційної хвороби.

5.3. Розробка заходів щодо підвищення безпечності робіт, пов'язаних з експлуатацією й налагодженням електропривода свердловинного насосу.

Вібрація. Низькочастотні вібрації зазвичай спричиняються дисбалансом роторів, який виникає через нерівномірну густину матеріалів, помилки у виборі допусків і посадок, відмінності в коефіцієнтах об’ємного розширення чи зносостійкості окремих компонентів машин.

Коли усунути вібрації безпосередньо в місці їх виникнення неможливо, використовують такі методи їх зменшення:

– віброгасіння;

– усунення надмірних люфтів та зазорів, що забезпечується періодичним оглядом машин та механізмів;

– балансування роторів (валів);

– вібродемпфірування, в основу якого покладено збільшення активних втрат у коливних системах;

– віброізоляція, виконується шляхом введення в систему додаткових пружних елементів, які перешкоджають розповсюдженню вібрації від машини на інші елементи конструкції.

Зменшення вібрації досягається завдяки вибору технологічних процесів і режимів роботи з урахуванням власних частот коливань машин і механізмів. Методи колективного захисту від вібрацій поділяються на дві групи: ті, що знижують параметри вібрації шляхом впливу на джерело її виникнення, і ті, що обмежують вібрацію на шляху її поширення.

Для віброізоляції стаціонарного обладнання застосовують віброізолюючі елементи, такі як прокладки або пружини, а інколи їх комбінацію. Комбінований віброізолятор поєднує пружинний елемент із віброізолюючою прокладкою. Пружинний віброізолятор ефективно знижує високочастотні коливання, тоді як комбінований забезпечує гасіння широкого діапазону частот. Пружинні елементи можуть виготовлятися з металу, полімерів, волокон тощо. Працівники, які задіяні у вібронебезпечних процесах, повинні використовувати спеціальний одяг і взуття.

Шум. Захист людини від шуму може бути забезпечений як колективними, так і індивідуальними засобами. Колективні засоби захисту поділяються на ті, що зменшують рівень шуму безпосередньо в джерелі його виникнення, та ті, що обмежують його поширення від джерела до захищуваного об'єкта.

Методи зниження шуму:

– звукоізоляція;

– екранування;

– будівельно-акустичні заходи.

– зниження шуму в джерелі його виникнення;

Зменшення шуму в місці його виникнення досягається шляхом зміни конструкції або принципу роботи насоса, що дозволяє знизити вібраційну активність його вузлів, шумове випромінювання поверхонь насоса та аеродинамічний шум.

Акустична обробка приміщень дозволяє зменшити шум шляхом зниження інтенсивності відбитих звукових хвиль.

Згідно з гігієнічних нормативів, витікає, що знижувати потрібно не будь-яку віброакустичну активність машин, а тільки ту, яка шкідливо впливає на людський організм, тобто за рівнем, вищим за гранично допустимий норматив.

Електромагнітного випромінювання. Підбір відповідного способу захисту від впливу електромагнітного випромінювання (ЕМВ) визначається робочим діапазоном частот, характером виконуваних робіт, рівнем напруженості та щільністю потоку енергії, а також необхідним ступенем захисту. Серед заходів для зменшення впливу на працівників ЕМВ належать: організаційні, інженерно-технічні та лікарсько-профілактичні.

Рівні ЕМВ необхідно контролювати не рідше 1 разу на рік. Якщо вводиться в дію новий об'єкт, або здійснюється реконструкція старих об'єктів, то заміри рівня електромагнітних випромінювань проводяться перед введенням їх в експлуатацію. Електронебезпека на виробництві забезпечується відповідною конструкцією електроустановок, застосуванням технічних способів та засобів захисту; організаційними та технічними заходами.

Електроустановки мають бути спроєктовані з урахуванням умов експлуатації та забезпечувати захист персоналу від контакту зі струмоведучими і рухомими частинами, а також від проникнення сторонніх предметів і води всередину обладнання.

Для забезпечення електробезпеки від випадкового дотику до струмоведучих частин досягається такими способами та засобами: захисні огорожі; ізоляція струмоведучих частин; застосування малих напруг; електричний розподіл мережі; захисне заземлення; захисне занулення; захисне відключення; захист від небезпеки при переході напруги з вищої сторони на нижчу; компенсація струмів замикання на землю; ізолюючі захисні та охоронні засоби; організації безпечної експлуатації електроустановок. [9].

Технічними заходами щодо забезпечення електробезпеки робіт є:

– установка тимчасових огорож струмоведучих частин і вивішування заборонних плакатів «не вмикати – працюють люди» або «не вмикати – роботи на лінії»;

– відключення електроустаткування, яке ремонтується, та вживання заходів проти випадкового його включення;

– приєднання переносного заземлення до заземлюючої шини стаціонарного заземлюючого пристрою і перевірка відсутності напруги на токоведучих частинах, які для безпеки виробництва робіт підлягають замиканню накоротко і заземленню;

– накладення переносних заземлень на відключені струмоведучі частини електроприводу відразу після перевірки відсутності напруги або включення спеціальних заземлюючих роз'єднувачів;

– огорожа робочого місця і вивішування на огорожі дозволяючого напису "Працювати тут".

Технічні заходи що забеспучують електробезпеку виконує допущений до роботи, з числа оперативного ремонтного персоналу, з кваліфікаційною групою не нижче III до 1000 В, по дозволу особи, що віддає розпорядження на виконання робіт або по наряду. При роботі з електричними колами напругою до 1000 В застосовуються наступні основні захисні засоби:

– покажчики напруги;

– діелектричні рукавички;

– електромонтажний інструмент;

– вимірювальні оперативні штанги;

– кліщі електровимірювань;

– покажчики напруги.

До додаткових захисних засобів в електроустановках нижче 1000 В відносять галоші, гумові килимки, ізолюючі підставки.

5.4.Розрахунок захисного заземлення системи частотного управління електроприводом свердловинного насосу

За вимогами щодо будови електроустановок на напругу устаткування меншу ніж 1000 В, опір захисного заземлення повинен бути не більше 4 Ом. Як штучне заземлення застосовуємо сталеві труби діаметро d= 0,045м і довжиною $l_m = 6{,}5$м. Для зв'язку вертикальних електродів і як самостійний горизонтальний електрод, використовуємо смугову сталь перетином 4х40 мм. Визначаємо опір розтікання струму одиничного вертикального заземлювача :

$$R_{в1} = \frac{\rho}{2\pi l_m}\left(\ln\frac{2l_m}{d} + \frac{1}{2}\ \ln\frac{4t+l_m}{4t-l_m}\right), \qquad (5.1)$$

де l_m – довжина заземлювача; t– глибина занурення труби, м;
ρ – розрахунковий питомий опір ґрунту.

Питомий опір ґрунту визначається за формулою:

$$\rho = \rho_в \cdot \psi, \qquad (5.2)$$

де $\rho_в$ – питомий опір ґрунту, Ом·м; ψ = 1,3 – коефіцієнт сезонності.

Питомий опір ґрунту визначаємо за табл. для супіску: $\rho_в$ =400 Ом· м.

Підставляючи відомі величини у формулу (5.2), одержимо:

$$\rho = 400 \cdot 1{,}3 = 520 \text{ (Ом·м)}.$$

Визначимо глибину занурення труби, яка дорівнює відстані від землі до середини труби:

$$t = 0{,}5l_m + t_0 \qquad (5.3)$$

де t_0 – відстань від поверхні землі до верхнього кінця заземлювача, приймаємо $t_0 = 1{,}5$м.

$$t = 0{,}5 \cdot 6{,}5 + 1{,}5 = 4{,}75\text{м}.$$

Підставляючи відомі величини у формулу (5.1), одержимо:

$$R_{в1} = \frac{520}{2 \cdot 3{,}14 \cdot 6{,}5} \left(\ln \frac{2 \cdot 6{,}5}{0{,}045} + \frac{1}{2} \ln \frac{4 \cdot 4{,}75 + 6{,}5}{4 \cdot 4{,}75 - 6{,}5} \right) = 76.72 \text{ Ом.}$$

Визначимо кількість заземлень по формулі:

$$n = \frac{R_{в1}}{\eta \cdot R_3} \qquad (5.4)$$

де R_3 – найбільший допустимий опір заземлюючого пристрою, Ом; η – коефіцієнт використання вертикальних заземлювачів без урахування впливу сполученої смуги, η = 1 (електроди розміщені по контуру). Тоді

$$n = \frac{76.72}{1 \cdot 4} = 19.18 \quad .$$

Приймаємо n=19 шт.

$$R_{ВФ} = \frac{R_{в1}}{n \cdot \eta_ф} = \frac{76.72}{19 \cdot 0{,}7} = 5{,}77 \text{ Ом.} \qquad (5.5)$$

Визначимо опір розтіканню струму горизонтальної смуги:

$$R_{1Г} = \frac{\rho}{2\pi l_1} \cdot \ln \frac{2 l_1^2}{b \cdot t_1}, \qquad (5.6)$$

де t_1 – глибина занурення смуги, м; b – ширина смуги, м; l_1 –довжина смуги, м.
Визначається як:

$$l_1 = 1{,}05 \cdot a \cdot n \qquad (5.7)$$

де а – відстань між вертикальними заземленнями, м:

$$a = 2 \cdot 6{,}5 = 13 \text{м.}$$

Підставляючи отримані величини у формулу (5.7), одержимо:

$$l_1 = 1{,}05 \cdot 13 \cdot 19 = 259{,}35 \text{ м.}$$

Підставляючи відомі величини у формулу (5.6), одержимо:

$$R_{1Г} = \frac{520}{2 \cdot 3{,}14 \cdot 259{,}35} \cdot \ln \frac{2 \cdot 259{,}35^2}{0{,}04 \cdot 1{,}5} = 4{,}68 \text{ Ом;}$$

$$R_{1Г} = \frac{R_{1Г}}{\eta_г} = \frac{4{,}68}{0{,}56} = 8{,}35 \text{ Ом.}$$

Визначимо опір розтіканню струму заземлюючого пристрою:

$$R_З = \frac{R_{ВФ} \cdot R_г}{R_{ВФ} + R_г}. \qquad (5.8)$$

Підставляючи відомі величини у формулу (5.8), одержимо:

$$R_З = \frac{5{,}77 \cdot R_г}{5{,}77 + R_г} = 3{,}41 \text{ Ом.}$$

$R_З$ не перевищує допустимого опору захисного заземлення:

$$3{,}41 \text{ Ом} < 4 \text{ Ом.}$$

Висновки за розділом

У цьому розділі було проведено аналіз небезпечних і шкідливих факторів, які можуть виникати під час експлуатації системи управління. Зокрема, рухомі частини обертових механізмів можуть стати причиною серйозних фізичних травм у разі контакту з ними, а ті, що здійснюють поступальний рух, можуть призвести до забиттів або переломів. Висока насиченість приміщення електротехнічним обладнанням створює додаткову загрозу ураження електричним струмом. Несправності в роботі електричних пристроїв і електропроводки, а також недотримання правил експлуатації електрообладнання можуть спричинити коротке замикання, що, у свою чергу, підвищує ризик виникнення пожежі. Було досліджено вплив шуму та

вібрацій на здоров’я та самопочуття людини. У рамках аналізу був виконаний розрахунок захисного заземлення.

ВИСНОВКИ

У даній дипломній роботі була розроблена комп'ютеризована система частотного управління електроприводом свердловинного насосу.

В першому розділі були розглянуті наступні питання:

- розглянуто загальну характеристику насосів та їх класифікацію;
- принцип роботи свердловинної установки з занурю вальним агрегатом;
- спосіб керування насосом за допомогою перетворювача частоти;
- були поставлені задачі проектування.

Також була розроблена функціональна схема системи частотного управління електроприводом свердловинного насосу. Разом з нею була розроблена вимірювально-обчислювальна частина системи управління, для якої були вибрані наступні складові елементи:

- датчики тиску *Siemens SITRANS P DS/PA*;
- насосний агрегат *Optima* серії 4SD8/28;
- поплавковий вимикач *Wilo MS1*;
- частотний перетворювач фірми *Danfoss* VLT Aqua Drive типу FC-202;
- комплект *GSM*-модемів Moxa 4G LTE Industrial Cellular Gateway (MGate 5102).

Був розроблено алгоритм керуючої програми для мікроконтролера, який складається з основної програми та підпрограм алгоритму перевірки наявності аварії, обробки переривань таймера (І-регулятора), формувача задаючих сигналів. Було розроблено алгоритм роботи програми та підпрограм, що входять до основної програми.

В четвертому розділі побудована динамічна модель керованого електропривода насоса у програмі *Simulink.*

Для забезпечення якісного керування тиском обрано І-регулятор. Шляхом числового моделювання за допомогою розробленої динамічної моделі визначено коефіцієнти регулятора: k_I = 0,13 с$^{-1}$.

Розроблений регулятор при співпаданні параметрів об’єкта керування з параметрами моделі забезпечує наступні показники якості керування: час перехідного процесу $t_{п.п}$ = 0,6 с; максимальне перерегулювання δ max = 4%. остаточне налаштування регулятора потрібно здійснювати на стадії випробування електропривода.

В розділі Охорони праці був проведений аналіз небезпечних і шкідливих факторів при роботі системи управління, а саме: частини обертових пристроїв, що рухаються, можуть привести до важких фізичних травм при дотику до них, ті, що рухаються поступально до забитих місць і переломів. Насиченість приміщення електроустаткуванням призводить до підвищення небезпеки ураження електричним струмом. Несправності електричних пристроїв і електропроводки, неправильна експлуатація електроустаткування можуть привести до коротких замикань і виникнення пожежі. Був проведений розрахунок захисного заземлення. Крім цього, був розглянутий вплив шуму, вібрацій та електромагнітного випромінювання на організм людини.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1.Свердловинний насос.

URL:https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%B2%D0%B5%D1%80%D0%B4%D0%BB%D0%BE%D0%B2%D0%B8%D0%BD%D0%BD%D0%B8%D0%B9_%D0%BD%D0%B0%D1%81%D0%BE%D1%81

2. Частотний перетворювач Danfoss VLT Aqua Drive FC-202.

URL: https://www.danfoss.com/uk-ua/products/dds/low-voltage-drives/vlt-drives/vlt-aqua-drive-fc-202/#tab-overview

3. *GSM*-модем Moxa 4G LTE Industrial Cellular Gateway (MGate 5102)
URL:https://inetworks.com.ua/prod6773-moxa-mgate-5102-pbm-pn.html

4.Поплавковий вимикач Wilo MS1.
URL: https://voltar.com.ua/ua/shop/wilo-ms1-poplavkovyi-vykliuchatel.html

5. Фізичні, хімічні, біологічні та психологічні фактории.
URL: https://studfile.net/preview/9242113/page:27/

6. Шумове забруднення.

URL:https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A8%D1%83%D0%BC%D0%BE%D0%B2%D0%B5_%D0%B7%D0%B0%D0%B1%D1%80%D1%83%D0%B4%D0%BD%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D1%8F

7. Вібрація.

URL:https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%92%D1%96%D0%B1%D1%80%D0%B0%D1%86%D1%96%D1%8F

8. Герман-Галкин, С. Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0: Учебное пособие. – СПб.: КОРОНА принт, 2001. – 320 с., ил.

9. Електробезпека

URL:http://www.ztec.com.ua/ztec/elib/Охорона%20праці/Тема%2017%20Електробезпека.pdf

10. Системи частотного управління електроприводом
URL:https://ukrprommotor.com.ua/blog/chastotni-peretvoryuvachi-dlya-nasosiv---use-scho-potribno-znati-dlya-efektivnoi-roboti?srsltid=AfmBOopPfYGwM8ELo3zDro_YnTjCm0i0qF1PAmxKaLMMI8YPtlgUNm8f

11. Вікіпедія – енциклопедія

URL:https://uk.wikipedia.org/wiki/Охорона_праці

12. Каталог електродвигунів АИР
URL:https://xn--80addceesnhi0axzh6mb.xn--j1amh/elektrodvigateli-air/

13. Павлов Г.В. Методичні вказівки до виконання дипломного проекту/ Г.В. Павлов, О.В. Коробко, І.В. Махнова. – Миколаїв: НУК, 2014 – 37 с.

14. Проектування пристроїв та систем управління: Методичні вказівки до практичних занять / Ю. П. Кондратенко, О. В. Козлов, О. С. Герасін. – Миколаїв: НУК, 2016. – 101 с.

15. Правила устройства електроустановок. – изд-во «Форт» Харків, 2011 – 736 с.

16. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. / Ясинський В.М., Гажаман В.І., Єліпашев В.М. – Київ 1998 – 384 с.