Хмельницький національний університет
Факультет інженерії, транспорту та архітектури
Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем

# КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА

## Розробка системи автоматичного керування електроприводом насосної установки

Галузь знань 14 «Електрична інженерія»
Шифр, назва
Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
Шифр, назва
Спеціалізація «Електропобутова техніка»

Шифр МРМА 22.00.00.000 ПЗ

Виконав студент 2 курсу
група ЕТм-21-1 _____ М.В. Костюк
Підпис Ініціали, прізвище

Керівник _____ П.С. Майдан
Підпис, дата Ініціали, прізвище

Нормоконтролер _____ С.І. Пундик
Підпис, дата Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:

Зав. кафедри МАЕЕС _____ О. С. Поліщук
Підпис, дата Ініціали, прізвище
20 12 2022 р.

Хмельницький 2022

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії, транспорту та архітектури
Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем
Освітній рівень магістр
Галузь знань 14 «Електрична інженерія»
Шифр і назва
Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
Шифр і назва
Спеціалізація _____
Освітня програма «Електропобутова техніка»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри МАЕЕС
_____
_____.2022 р.

# ЗАВДАННЯ
# НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

Костюк Максим Васильович
Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема роботи Розробка системи автоматичного керування електроприводом насосної установки

керівник роботи Майдан Павло Сергійович, к.т.н, доцент
Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання
Затверджено наказом ректора університету від 1 07 2022 р. № 83
2. Строк подання студентом роботи на кафедру _____
3. Вихідні дані до роботи технічні та електричні характеристики насосної установки

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)
Вступ. Огляд та аналіз електроприводів для насосної установки
Проєктування системи автоматизації насосної установки.
Розрахунки, що підтверджують працездатність

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень)
Суміщені статичні характеристики насосу та мережі (А1, ДІ). Алгоритм визначення напору, розрахунку та обліку величини витрати речовини (А1, ДТ). Узагальнений алгоритм роботи насосної установки (А1, ДТ). Робочі характеристики насосної установки (А1, РР). Силові кола насосної установки (А1, Е3). Проєктування системи керування електроприводом (А1, С3). Схема моделювання роботи електроприводу насосної установки (А1, С3). Перехідні процеси роботи електроприводу насосної установки (А1, РР).

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

| Розділ | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата | |
|---|---|---|---|
| | | завдання видав | завдання прийняв |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |

7. Дата видачі завдання _____

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| Назва етапів (розділів) кваліфікаційної роботи | Строк виконання етапів роботи | Примітки |
|---|---|---|
| 1 Огляд та аналіз електроприводів для насосної установки | 29.10.22 | |
| 2 Проектування системи автоматизації насосної установки | 11.11.22 | |
| 3 Виконання необхідних розрахунків що підтверджують працездатність | 2.12.22 | |
| 4 Оформлення пояснювальної записки та графічної частини | 15.12.22 | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |

Студент _____ М.В. Костюк
Підпис Ініціали, прізвище

Керівник роботи _____ П.С. Майдан
Підпис Ініціали, прізвище

р

# А Н О Т А Ц І Я

до кваліфікаційної роботи магістра
спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

1. Прізвище, ім'я та по батькові Костюк Максим Васильович

2. Тема магістерської роботи Розробка системи автоматичного керування електроприводом насосної установки

3. Прізвище, ініціали, вчена ступінь та звання опонента

4. Об'єм магістерської роботи: креслень 8 арк., сторінок записки 95

5. Основні розділи розрахунково-пояснювальної записки:
Вступ. Огляд та аналіз електроприводів для насосної установки
Проєктування системи автоматизації насосної установки
Розрахунки, що підтверджують працездатність

Підпис студента

"20" 12 2022 р.

Р І Ш Е Н Н Я  Е К:

Протокол 1 від «24» 12 2022 р.

Оцінка проекту ЕК добре 4/с
Рекомендації ЕК

Особливі відмітки

Технічний секретар

"20" 12 2022 р.

ЗМІСТ


| | с. |
|---|---|
| Вступ | 6 |
| 1 Огляд та аналіз електроприводів для насосної установки | 8 |
| 1.1 Огляд та аналіз технологічного процесу | 8 |
| 1.2 Підбір систем електроприводу та автоматизації | 13 |
| 1.3 Інформаційний огляд конструкцій насосних станцій | 15 |
| 1.4 Вимоги до автоматизованого електроприводу для НА | 22 |
| 1.5 Вимоги до системи автоматизації насосної установки, що проєктується | 23 |
| 1.6 Обґрунтування вибору системи керування електроприводом | 24 |
| Висновки до розділу | 27 |
| 2 Проєктування системи автоматизації насосної установки | 28 |
| 2.1 Підбір принципів та проектування схеми керування насосної установки | 28 |
| 2.2 Формалізація умов роботи насосної установки | 30 |
| 2.3 Підбір апаратної частини обладнання для насосної установки | 40 |
| 2.4 Розробка функціональної схеми контролеру | 43 |
| 2.5 Розробка програми керування насосною установкою | 44 |
| 2.6 Конструктивна розробка пульта керування насосною установкою | 44 |
| Висновки до розділу | 45 |
| 3 Розрахунки, що підтверджують працездатність | 47 |
| 3.1 Перевірка обраних електродвигунів за перевантажувальною здатністю та нагріванням | 47 |
| 3.2 Проєктування та розрахунок силової схеми автоматизованого електроприводу | 56 |

3.3 Проєктування системи керування електроприводом та розрахунок основних параметрів 65
3.4 Побудова статичних характеристик 75
3.5 Аналіз динамічних характеристик електропривода НУ 77
3.6 Проєктування схеми електропостачання та захисту НУ 82
Висновки до розділу 88
Загальні висновки 90
Перелік джерел посилань 92
Додатки 95

# ВСТУП

Доцільне використання паливно-енергетичних та водних ресурсів, а також охорона довкілля загалом визначили напрямок розвитку систем тепло- та водопостачання. Під час проектування нових та модернізації існуючих систем водопостачання дедалі частіше передбачають розробку та створення систем безстічного водокористування, яка базується на замкнутих циклах. Головними енергетичними ланками систем водопостачання, що використовуються для забезпечення транспортування різних рідких речовин по водопроводах, звичайно є насосні станції.

Тому нашим завданням є проєктування автоматичного керування електроприводом насосної установки, наприклад, для системи гарячого водопостачання або насосної станції для гарячого водопостачання (для теплового пункту).

Значна економія паливно-енергетичних ресурсів може бути досягнута під час централізації теплопостачання громадських, житлових та промислових будівель у населених пунктах. Раціональна централізація та концентрація виробництва гарячої води та пари як для опалювальних так і для технологічних потреб, будівництво теплоелектроцентралей (ТЕЦ) та, відповідно, великих районних котелень, поступова закриття невеликих котелень, які є нерентабельними - головні шляхи розвитку централізованого теплопостачання. З цим розвитком пов'язане будівництво протяжних і широко розгалужених теплових мереж з численними тепловими пунктами різнорідних споживачів житлового та промислового секторів.

Однією із головних підсистем енергетики країни є саме теплопостачання не тільки населення, а і народного господарства. Головне призначення системи теплопостачання полягає якраз в забезпеченні споживачів необхідною кількістю теплоти у вигляді гарячої води та пари із необхідними параметрами.

У всіх системах централізованого теплопостачання (СЦТ) виконуються

такі технологічні процеси: виробництво та відпуск виробленої теплоти, переміщення та застосування теплоносія.

Виробництво та відпуск теплоти здійснюються в теплопідготовчих установках джерел теплоти - ТЕЦ і міських або промислових котелень. У джерелах теплоти використовують органічне або ядерне паливо. Основне призначення джерел теплоти - забезпечення економічних режимів відпуску теплоти в теплову мережу, надійна, безперебійна та економічна робота їхніх агрегатів.

Транспортування теплоносія здійснюється тепловими мережами, що з'єднують джерело теплоти зі споживачами. До теплових мереж відносять теплопроводи і споруди на них - мережеві станції (підкачувальні, змішувальні, дросельні). СЦТ міст є, як правило, водяними системами, де як теплоносій застосовується вода.

Водяні системи теплопостачання можуть бути закритими і відкритими. У закритих системах вода, що циркулює в тепловій мережі, використовується тільки як теплоносій, з мережі для споживання її не відбирають; у відкритих системах теплоносій (воду) розбирають у споживачів для потреб гарячого водопостачання.

Для теплопостачання міст від джерел теплоти до цієї групи споживачів, як правило, використовують двотрубні теплові мережі.

Призначення теплових мереж - надійне, безперебійне транспортування теплоносія за мінімальних втрат теплоти і води.

Використання теплоносія (відпуск теплоти) здійснюється в теплоприймачах споживачів: у системах опалення, вентиляції, гарячого водопостачання. Під час відпуску теплоти споживачам здійснюється підтримання за заданим законом параметрів середовища, що нагрівається.

У зв'язку зі зростаючою вартістю електроенергії тема цього проєкту є актуальною

# 1 ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ ДЛЯ НАСОСНОЇ УСТАНОВКИ

## 1.1 Огляд та аналіз технологічного процесу

Під час аналізу роботи технологічної установки використовуються деякі терміни, які є специфічними для такого типу установок [1, 2, 3]:

Насос – вид гідравлічної машини, що використовується для створення напірного переміщення рідини при передачі їй енергії.

Насосний агрегат (НА) - поєднання електроприводу, насосу та спеціалізованого передавального механізму (наприклад, муфта, редуктор, шків тощо).

Насосна установка (НУ) - комплекс спеціалізованого обладнання, що забезпечує необхідний режим роботи насосів об’єднаних в один або декілька НА. Тому НУ, зазвичай, складається з одного або декількох НА, запірної та регулювальної арматури, трубопроводів, апаратури керування та захисту, а також контрольно-вимірювальної апаратури.

Насосна станція (НС) – капітальна споруда, що містить одну або кілька НУ, а також, за необхідністю, допоміжні системи та спеціальне обладнання.

НУ класифікують як каналізаційні, меліоративні, водопровідні, теплофікаційні тощо.

Теплофікаційні НС (так звані теплові пункти) призначені для передачі гарячої води необхідних параметрів споживачам.

Загально відомо, що НУ щорічно витрачають близько 20% електроенергії, що виробляється в нашій енергосистемі. Нині більша частина НУ працюють в неекономному режимі тому, що втрати електроенергії становлять близько 10...15%, а інколи можуть сягати 20...25% від електроенергії, що споживається.

Використання економічних способів регулювання, що базуються на регулюванні частоти обертання робочих коліс насоса, дає змогу значно знизити втрати електроенергії в НУ. У сучасних НУ регулювання частоти обертання

робочих коліс насосів виконується за допомогою використання, так званого, автоматизованого електроприводу (АЕП) [2, 3].

Транспортування гарячої води по системі господарсько-побутового споживання та характер її розподілу, типу добових витрат, є нерівномірними та сильно залежать як від кількості жителів населеного пункту так і від ступеня благоустрою самих будівель.

У відкритих системах теплопостачання житлових районів між централізованим тепловим пунктом та тепловими пунктами окремих будинків прокладають чотиритрубну теплову мережу: два трубопроводи - подачі та циркуляційний, які використовуються для подачі води в систему гарячого водопостачання та два трубопроводи – знову ж, подачі та зворотний - для подачі теплоти в систему опалення окремих будинків. Схему даного теплового пункту наведено на рисунку 1.1 [1, 2].

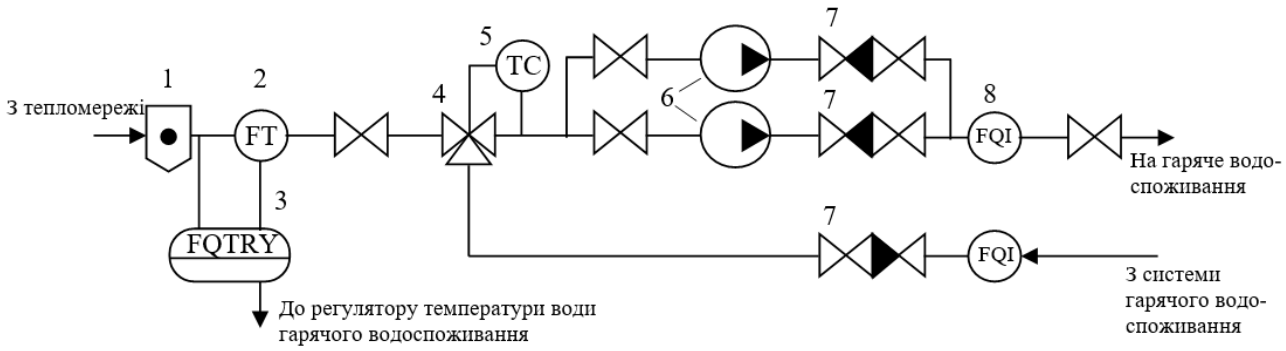


Рисунок 1.1 – Схема теплового пункту з безпосереднім водозабором на гаряче водоспоживання:

1 – брудозбірник; 2 – давач розходу; 3 – теплолічильник (для замірив розходу в трубопроводах подачі та зворотньому); 4 – змішувальний клапан (трьохпозиційний) для регулятора температури води; 5, – регулятор температури води; 6 – насоси циркуляційні; 7 – затвори зворотні; 8 – замір води

Режим роботи всієї НУ для транспортування гарячої води визначається не лише наявністю напірно-регулювальних споруд всієї системи водопостачання, а і режимом водоспоживання. У таблиці 1.1 наведено розподілення

середньодобової витрати гарячої води по годинах доби, якщо прийняти в якості середньосекундної витрати води - 20л/с та загального відомого коефіцієнта нерівномірності водовідведення $K_{заг} = 1,3$ [1, 2]. Якщо в мережі споживача відсутня регулювальна ємність, то для забезпечення споживача водою в годину пікового водоспоживання (загально відомо і підтверджується даними із таблиці від 9 до 10 години ранку) годинну подачу всієї НУ необхідно приймати за піковою, тобто такою, що дорівнює 5,6% обсягу всього добового водоспоживання. Загальну подачу та потужність всієї НС можна знизити, якщо додати в мережу споживачів спеціальну водонапірну вежу із регулювальною ємністю, але, в окремих випадках, регулювальна ємність водонапірної вежі може вийти занадто великою, а її будівництво виявиться економічно недоцільним. Якщо обладнати НУ відцентровими насосами, із можливістю саморегулювання, це надасть можливість застосовувати системи гарячого водопостачання без використання спеціальних регулювальних ємностей.

Таблиця 1.1 - Розподіл середньодобової витрати гарячої води відповідно до часу доби

| Час доби | Розхід погодинний,% | Час доби | Розхід погодинний,% |
|---|---|---|---|
| від 0 до 1 | 3 | Від 12 до 13 | 4,7 |
| Від 1 до 2 | 2,5 | Від 13 до 14 | 4,1 |
| Від 2 до 3 | 2,5 | Від 14 до 15 | 4,1 |
| Від 3 до 4 | 2,6 | Від 15 до 16 | 4,4 |
| Від 4 до 5 | 3,5 | Від 16 до 17 | 4,7 |
| Від 5 до 6 | 4.1 | Від 17 до 18 | 4,1 |
| Від 6 до 7 | 4,5 | Від 18 до 19 | 4,5 |
| Від 7 до 8 | 4,9 | Від 19 до 20 | 4,5 |
| Від 8 до 9 | 4,9 | Від 20 до 21 | 4,5 |
| Від 9 до 10 | 5,6 | Від 21 до 22 | 4,8 |
| Від 10 до 11 | 4,9 | Від 22 до 23 | 4,6 |
| Від 11 до 12 | 4,7 | Від 23 до 24 | 3,3 |

НС для системи гарячого водопостачання, зазвичай, складається із вхідного колектора, до якого через щитовий затвор підключено всмоктувальні лінії двох насосів (типу К90/20) [4]. Напірні лінії насосів об'єднані за допомогою напірного колектору. Один із насосів, що підключені, є основним, другий, відповідно – аварійним, функції насосів можливо періодично змінювати. НС зі споживачами з'єднують за допомогою напірних водоводів.

Згідно технічного завданням на даній НС для теплового пункту системи гарячого водопостачання ми будемо застосовувати насос типу К (тобто горизонтальний консольний відцентровий насос). Насоси даного типу К використовують для подачі чистої води та інших чистих рідких речовин температурою до $105^{\circ}C$, Насоси приводяться в рух за допомогою асинхронних двигунів типу 4А. Технічні характеристики даного насосу описано в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Технічні характеристики насосу типу К90/20 [4]

| | | | |
|---|---|---|---|
| Подача води в $м^3$/год | 60 | 80 | 100 |
| або в л/с | 16,7 | 22,2 | 27,8 |
| Створюваний напір, м | 25,7 | 22,8 | 18,9 |
| Допустима висота втягування води, м | 5,4 | 5,3 | 4,2 |
| Частота обертання робочого колесу насосу, об/хв | 2900 | | |
| ККД насосу, % | 76 | 79,5 | 77 |
| Потужність насосу, кВт | 5,6 | 6,3 | 6,7 |
| Діаметр робочого колеса, мм | 148 | | |

Система автоматичного керування (САК) повинна працювати не лише у автоматичному, а і в ручному режимі. Під час використання системи в ручному режимі функція людини-оператора повинна полягати в ручній комутації насосів в залежності від напору речовини в мережі. Напір речовини в мережі в цьому режимі може контролюватися за давачами. Припустимо, що температура речовини в мережі буде контролюватись автоматично на центральному тепловому пункті [1, 2].

Під час використання системи в автоматичному режимі функція людини-оператора буде полягати лише у візуальному контролі справності всієї системи

керування.

Кінематична схема механічної частини електропривода представлена на рисунку 1.2.

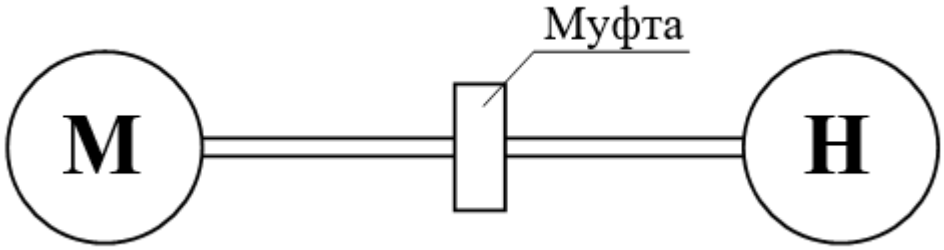


Рисунок 1.2 – Кінематична схема електроприводу:

Н - горизонтальний відцентровий консольний насос типу К90/20;

М – привідний електродвигун з короткозамкнутим ротором (асинхронний)

Пружними властивостями сполучної муфти та валів ми будемо нехтувати через достатню жорсткість механічної системи. Тоді використавши кінематичну схему (рис. 1.2.) складемо одномасову розрахункову схему механічної частини електроприводу, наведено на рисунку 1.3.

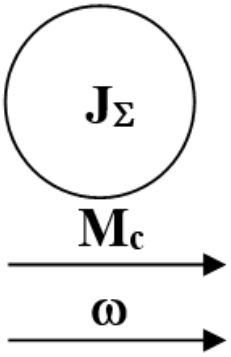


Рисунок 1.3 - Розрахункова схема механічної частини асинхронного електроприводу:

$M_C$ - статичний момент; $J_\Sigma$ - сумарний момент інерції асинхронного електроприводу; $\omega$ - кутова швидкість

## 1.2 Підбір систем електроприводу та автоматизації

### 1.2.1 Розрахунок навантажень механізмів установки

Під час підбору відцентрових насосів для потреб конкретних установок необхідно однозначно знати залежність одних параметрів від інших. Як незалежний змінний параметр під час побудови характеристик приймають подачу насоса $Q$, оскільки вона безпосередньо пов'язана з витратою речовини в системі трубопроводів даної НУ, відповідно, зміна інших параметрів насосу напряму залежить від подачі насосу.

Статичною характеристикою всієї мережі транспортування (трубопроводу) називають залежність між витратою рідини через трубопровід та напором $H$, який потрібен для забезпечення величини витрати. Характеристика описується наступним рівнянням [1]:

$$H_C = H_{ст} + R \cdot Q_{ном}, \tag{1.1}$$

де $R$ - опір мережі, не є величиною постійною, змінюється в залежності від стану мережі від $100R_б$ при повній відсутності споживання води із мережі до $R_б$ за пікового споживання води з мережі, приймаємо $R_б = \frac{H_{ном}}{Q_{ном}^2}$ - базовий опір мережі (опір мережі за пікового споживання води). При повній відсутності споживання води із мережі, опір мережі має значення $100R_б$, оскільки в цьому разі йде скидання води через зворотний трубопровід, а також є витоки води (наприклад, через нещільність з'єднаннях тощо); $H_{ст}$ - статична складова напору, у нашому випадку приймаємо рівною нулю.

Залежність напору $H$ від подачі насоса $Q$ при постійній частоті обертання робочого колеса $n$ носить назву статична (або напірна) характеристика насоса [1, 5]:

$$H = H_0 \cdot \left( \frac{n}{n_{ном}} \right)^2 - C \cdot Q^2, \qquad (1.2)$$

де $H_0$ - напір, що відповідає нульовій подачі, $H_0 = H_{ном} + C \cdot Q^2$, м; $C$ - коефіцієнт, який визначається за формулою $C = \frac{H_1 - H_{ном}}{Q_{ном}^2 - Q_1^2}$, де $H_1 = 25,7$м та $Q_1 = 60$м$^3$/год - точки на характеристиці насосу; $n, n_{ном}$ - відповідно поточна та номінальна швидкість обертання робочого колеса насоса.

Характеристики будемо будувати для $n_{ном} = 2900$об/хв, $n = 2489$об/хв, $n = 1993$ об/хв, що необхідно для підтримання напору відповідно за пікового споживання води із мережі постачання, споживання води з мережі постачання, що дорівнює 50% від максимального споживання води з мережі постачання [5].

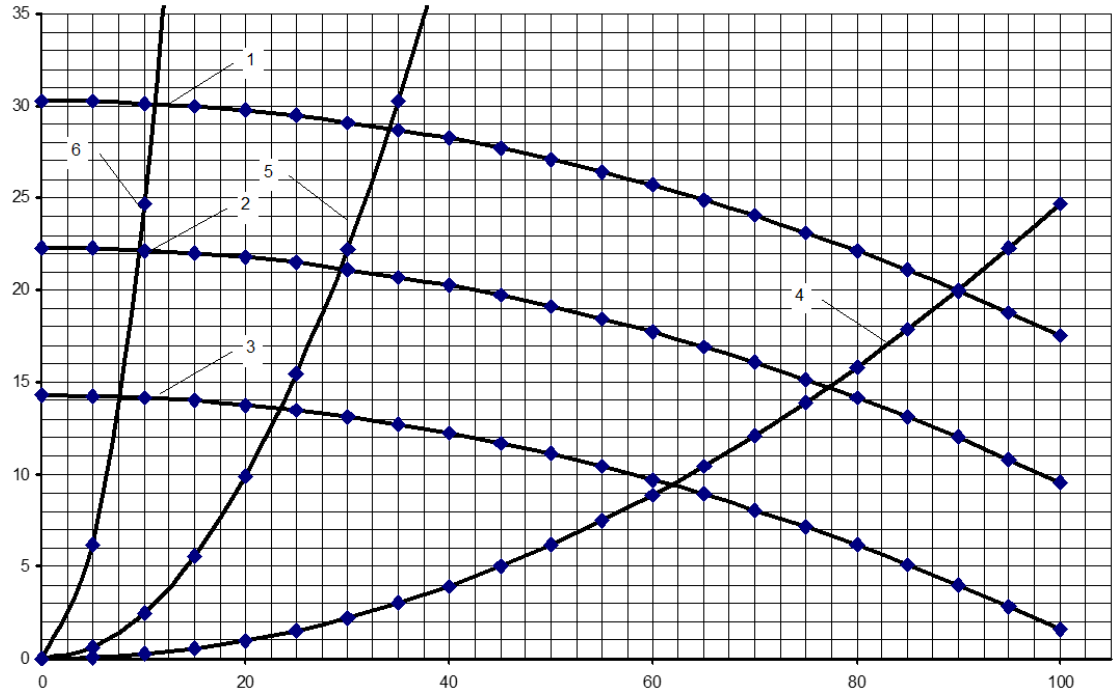


Рисунок 1.4 – Суміщені статичні характеристики насосу та мережі:
1 – характеристика насосу при $n_{ном} = 2900$об/хв; 2 – характеристика насосу при $n = 2489$об/хв; 3 – характеристика насосу при $n = 1993$ об/хв; 4 – характеристика мережі при $R = R_б$; 5 – характеристика мережі при $R = 10R_б$; 6 – характеристика мережі при $R = 100R_б$

Згідно формул 1.1 та 1.2 ми побудуємо суміщені статичні характеристики насоса (турбомеханізму) та мережі постачання (трубопроводу). Результати аналітичних розрахунків згідно формул 1.1 та 1.2 у графічному вигляді наведено на рисунку 1.4.

1.2.2 Попередній розрахунок потужності двигуна

Розрахуємо потужність двигуна, яка необхідна для електроприводу насоса. Згідно із [1, 5, 7] отримуємо:

$$P = \frac{\rho \cdot g \cdot Q_{ном} \cdot H_{ном} \cdot k_з}{1000 \cdot \eta_{ном}}, \qquad (1.3)$$

де $\rho = 1000$ кг/м$^3$ - густина рідини, що транспортується (наприклад, води); $g = 9{,}81$ кг/м$\cdot$с$^2$ - прискорення вільного падіння; $Q_{ном}$ та $H_{ном}$ - номінальні (паспортні) параметри насоса; $k_з = 1{,}25$ - коефіцієнт запасу; $\eta_{ном} = 79{,}5\%$ - номінальний (паспортний) ККД насоса [5, 7].

Підставивши необхідні значення до формули 1.3, розрахуємо потужність, що є необхідною для приведення насоса в рух, і вона дорівнює $7{,}5$ кВт.

1.3 Інформаційний огляд конструкцій насосних станцій

1.3.1 Загальні відомості про насосні станції [1, 2, 8, 9]

У сучасних зарубіжних та вітчизняних системах регулювання режимів роботи НУ здійснюється за допомогою використання АЕП. У таких системах регульованим параметром є напір рідини. Розвиток техніки на сучасному етапі розвитку, дозволяє підтримувати заданий напір із достатньо великою точністю. Однак така висока точність одразу призводить до безперервних змін частоти обертання електродвигуна НА та внаслідок цього призводить до виникнення знакозмінних навантажень на окремі елементи НА (наприклад, еластичні муфти,

що використовуються для з'єднання двигуна із насосом тощо), що, в свою чергу, приведуть до передчасного зносу. Тому в низці випадків доводиться встановлювати підвищену зону нечутливості системи автоматичного регулювання (САР), що призводить до зниження точності стабілізації напору.

В якості регульованого електроприводу НУ в мережі гарячого водопостачання пропонується використання одного з наступних типів електроприводів, зокрема: електроприводів за схемою АВК на базі перетворювачів ТДП-2 та спеціальних станцій керування ШДУ; електроприводів на базі вентильних електродвигунів із перетворювачами ПЧВН, ПЧВС; частотних перетворювачів серії ПЧТ, ПЧР-2 SAMI (наприклад, фірми Stromberg та інших типів); індукторних муфт ковзання (ІМК) із живленням збудження від тиристорних блоків (наприклад, БУ-3509 або подібних) [8, 9].

Стабілізація напору речовини, що транспортується, здійснюється за рахунок того, що під час зменшення водорозподілення напір у мережі постачання збільшується, а частота обертання електродвигуна насоса в результаті дії САР зменшується. У разі збільшення водоспоживання, навпаки, напір рідини в мережі буде знижуватись, а частота обертання буде зростати. Основна мета системи стабілізації напору рідини в системі трубопроводів полягає в підтримці напору на необхідній величині.

У системах стабілізації напорів у мережі водопостачання у разі істотних збільшень припливу води або водоспоживання необхідно також передбачати ввімкнення додаткових нерегульованих насосів та вимкнення їх у разі зменшення припливу.

Регульованим приводом мають оснащуватися найпотужніші НА із найбільш пологою характеристикою. У разі використання одного типу насосів, щоб уникнути утворення, так званих, «мертвих зон», нерегульовані насоси повинні бути оснащені робочими колесами із діаметрами нижчими за діаметри коліс регульованих. У разі повної рівності діаметрів коліс та роботи регульованого насоса в режимі пікових подач із підвищеною частотою

обертання (у разі використання частотно-регульованого електроприводу) він повинен бути оснащений двигуном із підвищеною потужністю відповідно до рекомендацій.

Незважаючи на видимі та суттєві переваги, регульований електропривод ще не набув широкого застосування в НУ. Нині в світі склалися умови, що вимагають ширшого використання подібних електроприводів тому, що бурхливий розвиток напівпровідникової техніки дав змогу створити на базі статичних перетворювачів надійні та відносно недорогі регульовані електроприводи.

Світова енергетична криза продемонструвала справжню цінність енергетичних ресурсів та, відповідно, стимулювала певні заходи щодо їх раціонального використання. У результаті цього збільшились дослідження, розробка та створення НУ, що оснащені спеціальними автоматизованими регульованими електроприводами [1, 2, 8, 9].

1.3.2 НС для перекачування речовини із регульованим електроприводом на основі ІМК [8-10]

Доцільність застосування САК із регульованим електроприводом у НС для перекачування речовини, з урахуванням наявного у нас у країні співвідношення цін на обладнання й електроенергію та інших чинників давно обґрунтовано. Наприклад на НС два встановлених НА з шести були оснащені ІМК, що виготовляються серійно. Номінальні (паспортні) параметри агрегатів: подача $800\ м^3/год$, напір $33\ м$, потужність $160\ кВт$, частота обертання колеса $960$ об/хв, обертальний момент ІМК $160$ кгс/м. Керування режимом роботи НУ без регульованого електроприводу здійснювалося за допомогою періодичного вмикання-вимикання НА. Число таких вмикань за добу складало приблизно $30-40$, а кількість працюючих НА змінювалася від $1$ до $6$ в залежності від величини припливу. САК буде змінювати частоту обертання регульованих агрегатів, одного чи двох, за потреби, а загальна кількість працюючих агрегатів

буде залежати від зміни величини припливу. Частота обертання регулюватиметься відповідно до сигналу відхилення, що буде формуватися при виході рівня із заданих границь. Сигнал відхилення, що буде оброблено, відповідно до ПІ-закону регулювання, буде надходити на вхід системи імпульсно-фазового керування тиристорного збудника встановленої ІМК. Таким чином буде виконуватись регулювання струму збудження та відповідно частоти з якою обертається електродвигун нашого насоса. У разі різких змін величини припливу, при яких зміна частоти обертання регульованого насосу не буде забезпечувати потрібну зміну подачі НУ, буде виникати потреба у зміні загальної кількості агрегатів, що включені на насосній станції.

Для цього буде використовуватись спеціальний блок для взаємодії нерегульованих та регульованих агрегатів. Спеціальний блок буде відключати спін із нерегульованих агрегатів та форсуватиме збудження ІМК до максимального значення струму (5 А) саме в той момент часу, коли частота обертання регульованого насоса буде настільки низькою, що його зворотний затвор закривається та насос буде припиняти відкачування. Якщо ж частота обертання регульованого насоса сягатиме пікового значення, а приплив буде продовжувати зростати, та установка не буде справлятись із відкачуванням стічних вод із баків, спеціальний блок вмикатиме додатково один із нерегульованих агрегатів та знижуватиме збудження ІМК до мінімального значення. Система буде забезпечувати стабілізацію рівня в бакові НС із заданою точністю 50 мм та короткотривалим відхиленнями (до 350 мм) під час під'єднання або від'єднання нерегульованого НА. Така система дасть змогу регулювати частоту обертання одночасно для кількох, наприклад двох, агрегатів. Потреба у роботі в такому режимі може виникнути при незначному перевищенні величини припливу над подачею одного підключеного насосу. Саме в таких умовах паралельна робота нерегульованого та регульованого агрегатів буде нестійкою тому, що навантаження регульованого агрегату буде становити тільки $5-10\%$ від номінального значення. Малі зміни величини припливу, що можуть

виникнути при цьому, будуть призводити до увімкнення та вимкнення нерегульованого агрегату. Тому можуть виникнути досить значні збурювальні впливи, які не завжди можуть бути погашені системою автоматичного регулювання. Синхронна ж робота двох регульованих агрегатів, буде дорівнювати роботі одного агрегату досить великої потужності, та в свою чергу, запобігатиме виникненню нестійких режимів роботи агрегату. Впровадження системи регулювання надасть можливість знизити споживання електроенергії приблизно на 10% тобто приблизно на 170000 кВт на рік, а також знизити кількість вмикань НА із 30 до 3 на кожну добу.

Підвищення ефективності роботи СНУ буде досягатись введенням спеціального пристрою, що змінює кількість ввімкнутих агрегатів до того, як регульований НА потрапить в зону неприпустимо низького ККД. Проте досвід використання виявив надзвичайно низьку надійність застосування ІМК, що серійно виготовляються промисловістю, це в свою чергу, не дозволяє рекомендувати ІМК для широкого використання до приведення їх у відповідність до виготовлених зарубіжними фірмами ІМК. Випробовували декілька систем подібного регулювання: із аналоговими та дискретними перетворювачами рівня різних типів. В умовах застосування НС найнадійнішими виявилися саме аналогові перетворювачі з «повітряним колоколом» [8-10].

### 1.3.3 НС із застосуванням регульованого електроприводу по схемі АВК

САК буде складатись із одного асинхронного електродвигуна із фазним ротором з частотою обертання 740 об/хв та потужністю до 800 кВт, перетворювача АВК, функції якого буде виконувати агрегат ТДП230400-Т, який в свою чергу складається із інвертора та випрямляча, станції керування П3ДУ90248А та пускових резисторів, трансформатора ТС400 для узгодження, дроселя для згладжування ФРОС-800, перетворювача рівня, що складається з диференціального манометра та «повітряного колоколу»; ПІ-регулятор. Така система керування дозволить стабілізувати рівень рідини в резервуарі з точністю

7-10 см. Більш висока точність стабілізації рівня буде спричиняти зростання зносу пальців, що знаходяться в еластичній муфті, для сполучення електродвигуна із насосом. Підвищення величину знос пальців обумовлено рухом речовини в бакові (висота хвилі до 20 см), що призводить до зростання зони нечутливості САК та, відповідно, зниження точності стабілізації рівня. Принцип дії даної системи керування частоти обертання НА аналогічний вищеописаному. Зміна кількості НА, що працюють на станції, здійснюється лише оперативним персоналом. Використання даної системи в НУ дозволяє зекономити щорічно до 600 – 700 тис. кВт/год електроенергії, або приблизно 4-5% загального енергоспоживання.

Додаткові капітальні витрати, які можуть бути зумовлені використанням такої системи керування в НУ, склали 7-8 тис. гривень. Регульований НА буде використовуватись впродовж року приблизно до 5000 год.

На сучасному етапі, з метою підвищення ефективності роботи САК та, відповідно, зниження зношування регульованого НА задумано модернізація ще одного використовуваного насоса, за допомогою регульованого електроприводу такого типу [8-10].

### 1.3.4 НС із використанням частотних електроприводів

В НС звичайний короткозамкнений асинхронний електродвигун насосу потужністю до 110 кВт/год підключено через перетворювач ПЧТ. Система керування даного електроприводу побудована аналогічно описаним вище приводам, єдиним винятком є те, що в якості перетворювача рівня в САК застосовується ультразвуковий вимірювач рівня ЕХО3. Використання частотного електроприводу в такій установці зменшує використання електричної енергії на 60 тис. кВт/год в рік, або приблизно на 5%.

В НС часто застосовуються також частотні перетворювачі типу ПЧР-2 та фінської фірми Stromberg, на базі яких розроблені, створені та включені в роботу більше як 10 САК режимом роботи НС з агрегатами потужністю

від 75 до 160 кВт. САК з використанням частотних перетворювачів типу SAMI фірми Stromberg достатньо довго експлуатуються на НС та забезпечують економію електричної енергії на рівні 7 – 8% від загального використання.

Частотні перетворювачі фірми Stromberg – достатньо компактне устаткування для регулювання роботи НА. Для забезпечення рівномірного використання НА передбачають спеціальне пристосування, за допомогою якого агрегати можуть почергово підключатись до одного перетворювача. Відомі випадки застосування вітчизняних перетворювачів типу ПЧТ в м. Харків [8-10].

1.3.5 НС із електроприводом на базі вентильного електродвигуна

На НС в метро впроваджено САК із використанням електроприводу, що базується на вентильному електродвигуні. Із шести насосів марки 30-ФВ-17, встановлених на станції, лише один оснащено подібним електроприводом із використанням перетворювача ПЧВН. Потужність даного електроприводу 1600 кВт, номінальна напруга двигуна 10 кВ. Перетворювач під'єднано до електромережі живлення за допомогою сухого понижувального трансформатору із номінальною потужністю 4000 кВА, а електродвигун - до перетворювача через аналогічний підвищувальний трансформатор. До складу перетворювача входить спеціальний тиристорний перетворювач живлення системи збудження для синхронного електродвигуна, який при модернізації електроприводу не був замінений [8-10].

САК електроприводом даного насосу абсолютно аналогічна вищеописаним. Як давач рівня використано дифманометр із виходом 0-5 мА та «повітряний колокол». У САК застосовується ПІ-регулятор типу Р-17. Застосування САК із даним регульованим електроприводом дозволить знизити споживання електроенергії приблизно на 1200 тис. кВт/год за рік, це в свою чергу полегшило умови роботи оперативного персоналу та поліпшило умови використання насосного обладнання.

Аналіз роботи САК та виконані розрахунки показують, що якщо

обладнати подібним електроприводом другий НА це дало б змогу підвищити економію електроенергії приблизно в два рази. На станції було виконано перевірку пристосування, що виключатиме роботу регульованого насосу в зоні низьких ККД [8-10].

### 1.3.6 Багатошвидкісні електродвигуни в НУ

Циркуляційні НС деяких ТЕЦ оснащені вертикальними насосними агрегатами із двошвидкісними двигунами марки ДВДА215/64-16-20К. Із семи насосів, що встановлені на кожної станції лише два приводяться в рух даними електродвигунами. Номінальна потужність таких двигунів 1400 кВт, а частота обертання 375 та 300 об/хв. Наявність таких НА надасть можливість краще регулювати режим роботи НУ до режиму роботи всієї тепломережі. Можливе використання таких двошвидкісних електродвигунів і у НУ водопроводів [8-10].

## 1.4 Вимоги до автоматизованого електроприводу для НА

Насоси є механізмами із режимом досить тривалого навантаження із низьким числом включень та, відповідно, великою кількістю робочих годин на рік. Навантаження на валу приводного електродвигуна постійне, без різких перевантажень. Необхідний діапазон частоти регулювання не повинен перевищувати наступне відношення 2:1. Навантаження на валу всього механізму носить так званий вентиляторний характер, тобто статичний момент опору на валу всього механізму повинен бути пропорційний квадрату швидкості [1, 2].

Крім того електропривод повинен стабільно працювати в умовах відносно високих температур та підвищеної вологості, а також володіти максимально можливими показниками надійності. У даних умовах роботи найкращим варіантом є використання саме асинхронного електродвигуна із короткозамкненим ротором, що буде отримувати живлення через перетворювач частоти. Асинхронний двигун із короткозамкненим ротором вирізняється

надійністю, простотою та відсутністю контактних з'єднань (щіток), відповідно дешевизною, а перетворювач частоти надасть можливість досягти досить точного регулювання швидкості такого двигуна [11].

Таким чином, необхідно сформулювати вимоги, які ми висуваємо до проєктованого електроприводу, він повинен забеезпечувати:

- плавний пуск НА та розгін до необхідної швидкості;
- гальмування вибігом;
- перевантажувальну здатність не нижче 1,5;
- діапазон регулювання швидкості 3:1;
- кліматичне виконання УХЛ4;
- ступінь захисту IP44.

## 1.5 Вимоги до системи автоматизації насосної установки, що проєктується

Автоматизація виробничих установок надасть можливість точно та швидко відтворювати необхідний технологічний процес. При абсолютній автоматизації процесу не потрібна постійна участь людини-оператора, які залишиться роль коригувальника та спостерігача. На сучасному етапі доцільно проводити автоматизацію виробничих установок за допомогою застосування мікропроцесорних систем (або програмованих контролерів), які нададуть можливість замінити жорстку логіку на програмне керування, а, відповідно, і підвищити надійність та гнучкість системи керування [11].

Висуваємо необхідні вимоги до автоматизованої системи керування:

- визначення необхідного напору, що в свою чергу залежатиме від величини поточної витрати;
- стабілізація необхідного напору рідини в мережі за рахунок регулювання швидкості обертання асинхронного електродвигуна;
- плавний пуск НА та розгін до необхідної швидкості;
- включення та виключення резервного насоса в залежності від величини

необхідної витрати;

- включення в роботу резервного насоса в разі аварії робочого;

- після зникнення напруги живлення автоматичний розгін НА (автоматичне повторне вмикання через АВР);

- періодична зміна основного НА, що стабілізує подачу речовини в мережу;

- захист від теплових перевантажень приводних електродвигунів НА;

- система керування повинна забезпечити контроль величини мінімальної, максимальної та аварійної витрати.

## 1.6 Обґрунтування вибору системи керування електроприводом

### 1.6.1 Обґрунтування вибору системи керування електроприводом

Для електроприводу НУ попередньо було обрано наступну систему керування: асинхронний двигун із короткозамкненим ротором та перетворювач частоти [11, 12].

Базуючись на сформованих вимогах до електроприводу та загальної системи автоматизації, робимо припущення, що використання в НУ двигунів постійного струму із тиристорним випрямлячем не матиме сенсу, тому що, виконавши порівняння із АД КЗР та ПЧ, двигун постійного струму має наступні недоліки [12, 13]:

- висока вартість двигунів постійного струму (ДПС);

- наявність щіткового контакту призводить до зниження надійність та загальної невибагливості двигуна;

- на контакти щіток негативно впливає висока вологість довкілля, тобто, для використання в НУ знадобиться спеціальний, герметизований ДПС, що призведе до підвищення складності конструкції та, відповідно і вартості.

Переваги ДПС перед асинхронними двигунами, наступні: хороші статичні характеристики, легкість та точність регулювання швидкості в досить широкому

діапазоні, у даному випадку, під час використання в якості приводу НУ, не матимуть великого значення, тому що підвищена точність витримування заданої швидкості та її стабілізації не потрібна, тим більше не потрібен досить широкий діапазон регулювання швидкості (цілком достатньо - D=3...5). Тим паче, що використання системи частотний перетворювач – асинхронний двигун має результати не набагато нижчі, ніж використання системи широтно-імпульсний перетворювач-ДПС або керований випрямляч-ДПС, а перетворювач частоти коштує не набагато більше, ніж КВ або ШІП, які дедалі частіше застосовують для керування ДПС [12, 13].

Системи керування для електроприводів із використанням АД із фазним ротором (ФР) не є актуальними тому, що [11, 12]:

- система АД ФР із використанням імпульсного регулювання опору володіє характеристиками, що є аналогічними характеристикам системи ЧП-АД КЗР, але якщо зрівняти ціни ЧП та імпульсного регулятора опору, вартість АД ФР значно вища, ніж АД КЗР;

- система АД ФР із використанням ступінчастого регулювання швидкості загалом підходить за характеристиками та трохи дешевша за вартістю, але наявність додаткових опорів у роторному ланцюзі призведе до підвищення витрат електроенергії, що економічно не обґрунтовано.

Системи керування електроприводом із використанням синхронних двигунів, як і системи із АД ФР, цілком придатні для використання у НУ, але їх застосування обійдеться дорожче через загальну вартість самого двигуна.

Таким чином можна виокремити наступні суттєві переваги проєктованої системи ЧП-АД КЗР на іншими системами керування електроприводами під час використання їх в НУ [11, 12]:

- низька вартість двигуна;

- простота і надійність двигуна;

- економічність;

- відсутність контактних з'єднань (тобто щіток) у електродвигуні;

- достатня висока якість регулювання швидкості.

Недолік проєктованої системи ЧП-АД КЗР один - поки що досить висока вартість самого частотного перетворювача.

1.6.2 Попередній підбір електродвигуна, перетворювача та пристроїв автоматизації

В якості електроприводу для проєктованої установки використаємо трифазний асинхронний електропривод, побудований за системою ЧП-АД КЗР. Використання саме системи ЧП-АД КЗР дасть можливість плавно змінювати швидкість електроприводу в достатньо широких межах, що, в свою чергу, повинно забезпечити плавне регулювання напору в НУ, і, як підсумок, значно зменшити кількість енергії, що споживається НУ [11, 12].

Автоматизувати проєктовану установку пропонується за допомогою використання програмованого контролера. До функцій такого контролера в такому випадку входитимуть: вироблення завдання для електропривода в залежності від величини напору в мережі; діагностика стану елементів установки; під'єднання додаткового насоса за умови перевантаження основного; виконання перемикання основного та резервного насосів у випадку виходу з ладу основного; подача аварійних сигналів у диспетчерську службу.

Відповідно до технічних даних насоса, розрахованої вище потужності електродвигуна, а також відповідно до обраної системи електроприводу, попередньо ми обираємо трифазний асинхронний двигун 4А112М2У3 з короткозамкненим ротором серії 4А, з наступними номінальними технічними характеристиками [11, 12]:

- номінальна (паспортна) потужність: 7,5 кВт;

- синхронна частота обертання: 3000 об/хв;

- величина номінального ковзання: 2,6%;

- номінальний (паспортний) ККД: 87,5%;

-номінальний (паспортний) $\cos = 0,88$;

- відношення $M_{\max}/M_{ном}=2,2$;

- відношення $M_{п}/M_{ном}=2$;

- величина критичного ковзання: 17%;

- кратність пускового струму: $I_{п}/I_{ном}=7,5$;

- приведений момент інерції двигуна: 0,01 кг$\cdot$м$^2$.

Ступінь захисту обраного електродвигуна - IP44, забезпечує необхідний захист від проникнення твердих тіл розміром понад 1 мм та від проникнення всередину оболонки проводів, інструментів тощо діаметром або завтовшки понад 2,5 мм, забезпечує необхідний захист від бризок: вода, що розбризкується на оболонку з будь-якої сторони, не повинна нанести шкідливий вплив на електродвигун.

Спосіб охолодження ICAO141 - спеціалізована закрита машина із гладкою або ребристою станиною, що обдувається за допомогою зовнішнього вентилятору, який розташовано на головному валу машини [12].

Висновки до розділу

Виходячи із перерахованих вище міркувань, доцільно використовувати в якості приводного двигуна НУ саме асинхронний двигун із короткозамкненим ротором, а живлення двигуна виконувати через частотний перетворювач із векторним керуванням.

Відповідно до вимог, що висуваються до всієї системи автоматизації, обраної системи електроприводу та обраного електродвигуна, для живлення електродвигуна попередньо обираємо частотний перетворювач РЕН-2-02-УХЛ4 ( ЯВІЕ.435321.001), а для керування НУ використаємо програмований логічний контролер.

# 2 ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ НАСОСНОЇ УСТАНОВКИ

Вибір системи автоматизованого електроприводу для НУ будемо виконувати на основі аналізу порівняння даних. Дані для порівняння систем електроприводу НУ наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Дані для порівняння систем електроприводу

| Дані про НС | Початковий варіант | Проєктований варіант |
|---|---|---|
| Кількість насосів | 2 | 2 |
| Потужність та тип електродвигуна | 7,5 кВт, АД-КЗР | 7,5 кВт, АД-КЗР |
| Частотний перетворювач | відсутній | РЕН-2-02 |

## 2.1 Підбір принципів та проектування схеми керування насосної установки

Згідно з вимогами, що висуваються до НУ, вони повинні бути максимально автоматизовані та працювати без постійного надзору обслуговуючого персоналу, що чергує [1, 2].

Виконання цієї вимоги можна досягти лише в випадку застосування системи автоматизованого керування. Таку систему доцільно побудувати з застосуванням програмованого контролера, у функції якого буде входити аналіз інформації про загальний стан об'єкта, що надходитиме із давачів, і створення керівних впливів, а також передача інформації про перебіг робочого процесу на керуючу ЕОМ, що розташована на центральному диспетчерському пункті.

Вибір принципів керування НУ ми виконаємо на підставі вимог до системи автоматизації, що були описані вище. Відповідно до даних вимог було запропоновано структурну схему автоматизації установки, наведену на рис. 2.1.

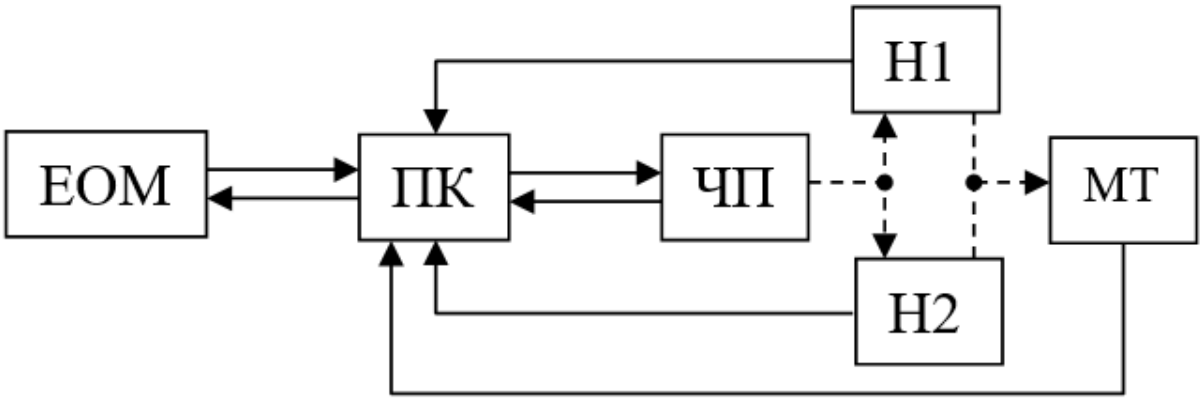


Рисунок 2.1 – Структурна схема автоматизації НУ:
ЕОМ – керуюча ЕОМ на диспетчерському пункті; ПК – програмований контролер НУ; ЧП – частотний перетворювач; Н1, Н2 – насоси №1 та №2 для НУ; МТ – мережевий трубопровід; ⟶ - потік інформаційної взаємодії; ⇢ - потік фізичної взаємодії

Структурна схема складається із програмованого контролеру (ПК) та керуючої ЕОМ, розташованою у центральному диспетчерському пункті (ЕОМ), частотного перетворювача із комутаційною апаратурою (ЧП), двох насосів (Н1 та Н2), мережевого трубопроводу (МТ) [5].

На цій структурній схемі виконано умовний розподіл потоків інформації, а саме: від контролера до агрегатів НУ та навпаки, відповідно, вказано яку інформацію має отримувати контролер, а яку передавати далі.

У процесі роботи НУ необхідно виконати контроль наступних параметрів:

- величину напору в мережевому трубопроводі;
- витрати речовини через мережевий трубопровід;
- температуру речовини в мережевому трубопроводі.

Отже, на ПК повинна надходити інформація про величину витрати речовини, температуру речовини, напір у мережевому трубопроводі, стан ЧП та насосів (а саме електродвигунів насосів). ПК же, залежно від величини витрати через МТ, має подавати на ЧП сигнал завдання на стабілізацію величини напору на необхідному рівні. Розрахунок необхідної величини напору, в залежності від реальної величини витрати, виконується відповідно до характеристик мережі.

Проаналізувавши схему силових ланцюгів НУ ми робимо висновок, що для керування контакторами необхідно лише чотири дискретні вихідні сигнали. Для керування ЧП потрібно застосовувати лише один аналоговий вихідний сигнал (напруга завдання величини напору). Деяка кількість вихідних дискретних сигналів необхідна для організації сигналізації режимів роботи всієї установки. Для контролю стану контакторів необхідно чотири дискретних входи та ще два необхідно для контролю справності ЧП та контролю необхідності ввімкнення додаткового насоса. Також для опитування давачів необхідно два аналогових входи [1, 2, 5].

## 2.2 Формалізація умов роботи насосної установки

У процесі роботи НУ необхідну величину напору у мережі трубопроводів підтримують за рахунок зміни швидкості обертання насоса. Величина потрібного напору визначається за поточною витратою речовини із мережі [1, 2].

Для визначення витрати речовини із мережі використаємо наступну формулу:

$$Q_0 = \alpha \varepsilon F_0 \sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta P}, \tag{2.1}$$

де $Q_0$ - величина витрата води, м$^3$/с; $F_0$ - площа отвору звужувального пристосування, м$^2$; $\alpha$ - коефіцієнт витрати; $P$ - перепад тисків в звужувальному пристосуванні, Н/м$^2$; $\rho$ - густина речовини в робочих умовах, кг/м$^3$.

Приведення витрати води в нормальних умовах $Q_0$ Q0 до витрати води в нормальному стані $Q_H$ виконується за наступною формулою:

$$Q_H = Q_0 \frac{PT_H}{P_H TK}, \tag{2.2}$$

де $Q_H$ - витрата води в нормальному режимі, м$^3$/с; $P_H$ - нормальний абсолютний тиск речовини (води), Н/м$^2$; $T_H$ - температура речовини в нормальному режимі, $T_H = 293$ К; $K$ - коефіцієнт стискання речовини; $P$ - абсолютний тиск речовини перед звужувальним пристосуванням, Н/м$^2$; $T$ - температура речовини перед звужувальним пристосуванням, К.

Використавши формули (2.1) та (2.2) отримаємо наступну формулу для розрахунку величини витрати речовини в нормальному режимі:

$$Q_H = 900\sqrt{2}\pi\alpha\varepsilon d^2\sqrt{\frac{\Delta P \cdot P \cdot T_H}{\rho_H \cdot P_H \cdot T \cdot K}}, \qquad (2.3)$$

де $d$ - діаметр отвору звужувального пристосування, м.

У формулі (2.3) незалежними змінними є $\Delta P, P, T$. Таким чином, формулу (2.3) ми можемо дещо спростити:

$$Q_H = K'\sqrt{\frac{\Delta P \cdot P}{T}}, \qquad (2.4)$$

де $K' = 900\sqrt{2}\pi\alpha\varepsilon d^2\sqrt{\frac{T_H}{\rho_H \cdot P_H \cdot K}}$.

У мікропроцесорній системі, що може використовувати операції лише із цілими числами, вимірювані величини після АЦП подано в масштабі, який визначається тільки кількістю розряду слова даних. Тому ми введемо наступні позначення: $\Delta P_2, P_2, T_2$ - двійкові коди, пропорційні, відповідно, зміні тиску, абсолютному тиску та температурі речовини; $\Delta P_{2\max}, P_{2\max}, T_{2\max}$ - максимальні (пікові) значення двійкових кодів цілочисельних перемінних, пропорційних - зміні тиску, абсолютному тиску та температурі речовини; $\Delta P_{\max}, P_{\max}, T_{\max}$ - очікувані пікові значення, зміни тиску, абсолютного тиску та температури

речовини.

Тоді для незалежних перемінних $\Delta P, P, T$ буде справедливим наступне співвідношення:

$$X_i = m_i \cdot X_{i2}, \tag{2.5}$$

де $X_i$ - незалежна перемінна; $X_{i2}$ - двійковий код, пропорційний незалежній перемінній; $m_i$ - масштаб незалежної перемінної.

Використавши формули (2.4) та (2.5) отримаємо наступне співвідношення для обліку величини витрати речовини:

$$Q_H = K' \sqrt{\frac{m_{\Delta P} m_P}{m_T}} \cdot \sqrt{\frac{\Delta P_2 \cdot P_2}{T_2}}. \tag{2.6}$$

Миттєве значення величини витрати речовини можливо представити в двійковому цілочисельному вигляді:

$$Q_H = m_O \cdot Q_{H2}, \tag{2.7}$$

де $m_O$ - масштаб подання величини витрати стисненого повітря в двійковому вигляді.

Тоді використавши (2.6) та (2.7) одержимо:

$$Q_{H2} = K'' \sqrt{\frac{\Delta P_2 \cdot P_2}{T_2}}, \tag{2.8}$$

де $K'' = \frac{K'}{m_O} \sqrt{\frac{m_{\Delta P} m_P}{m_T}}$.

З метою забезпечення розрахунку використовуючи формулу (2.8) для збереження восьмирозрядного формату даних на всіх кроках обчислень, доцільно використовувати наступну послідовність здійснення арифметичних операцій: 1) $\sqrt{\Delta P_2}$, 2) $\sqrt{P_2}$, 3) $\sqrt{T_2}$, 4) $\sqrt{\Delta P_2}\cdot\sqrt{P_2}$, 5) $\sqrt{\Delta P_2}\cdot\sqrt{P_2}/\sqrt{T_2}$, 6) $K''\sqrt{\Delta P_2}\cdot\sqrt{P_2}/\sqrt{T_2}$.

Розрахунки згідно формули (2.8) для підвищення достовірності розрахунків необхідно виконувати для усереднених значень тиску та температури на деякому інтервалі часу. Стандартна процедура усереднення виконується згідно наступної формули:

$$X_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^{N} X_i}{N}, \tag{2.9}$$

де $X_i$ - миттєве значення певного усереднюваного параметра; $N$ - кількість значень, що використовуються для усереднення.

Для розрахунку чисельника з формули (2.9) необхідно збільшувати розрядність слова даних, тому ми виконаємо його перетворимо до наступного вигляду:

$$X_{cp} = X_1 + \frac{\sum_{i=2}^{N} \Delta X_i}{N-1}, \tag{2.10}$$

де $X_1$ - перше значення певного усереднюваного параметра, $X_i$ - відхилення *i*-го значення параметра від $X_1$ $(X_i = X_i - X_1)$.

Алгоритм розрахунку та обліку величини об'ємної витрати речовини, а також визначення необхідного для забезпечення обчисленої величини витрати речовини напору в мережі, який базується за формулою (2.8), наведено на

рисунку 2.2.

Контролювання напору та величини витрати речовини виконуються за допомогою наступних давачів: температури (витрата), абсолютного тиску (натиск) та перепаду тисків.

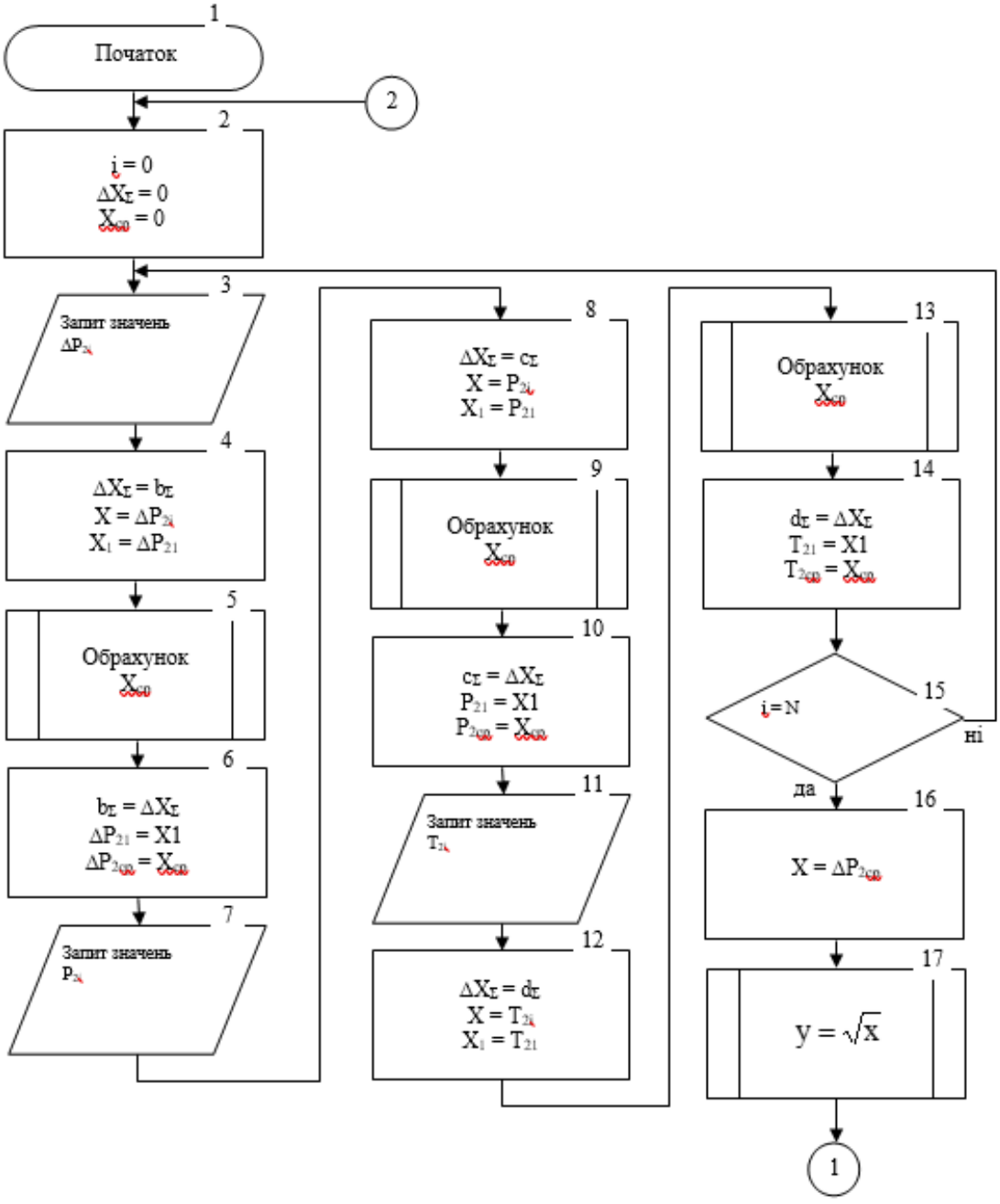


Рисунок 2.2 – Алгоритм визначення напору та розрахунку та облік величини витрати речовини (початок)

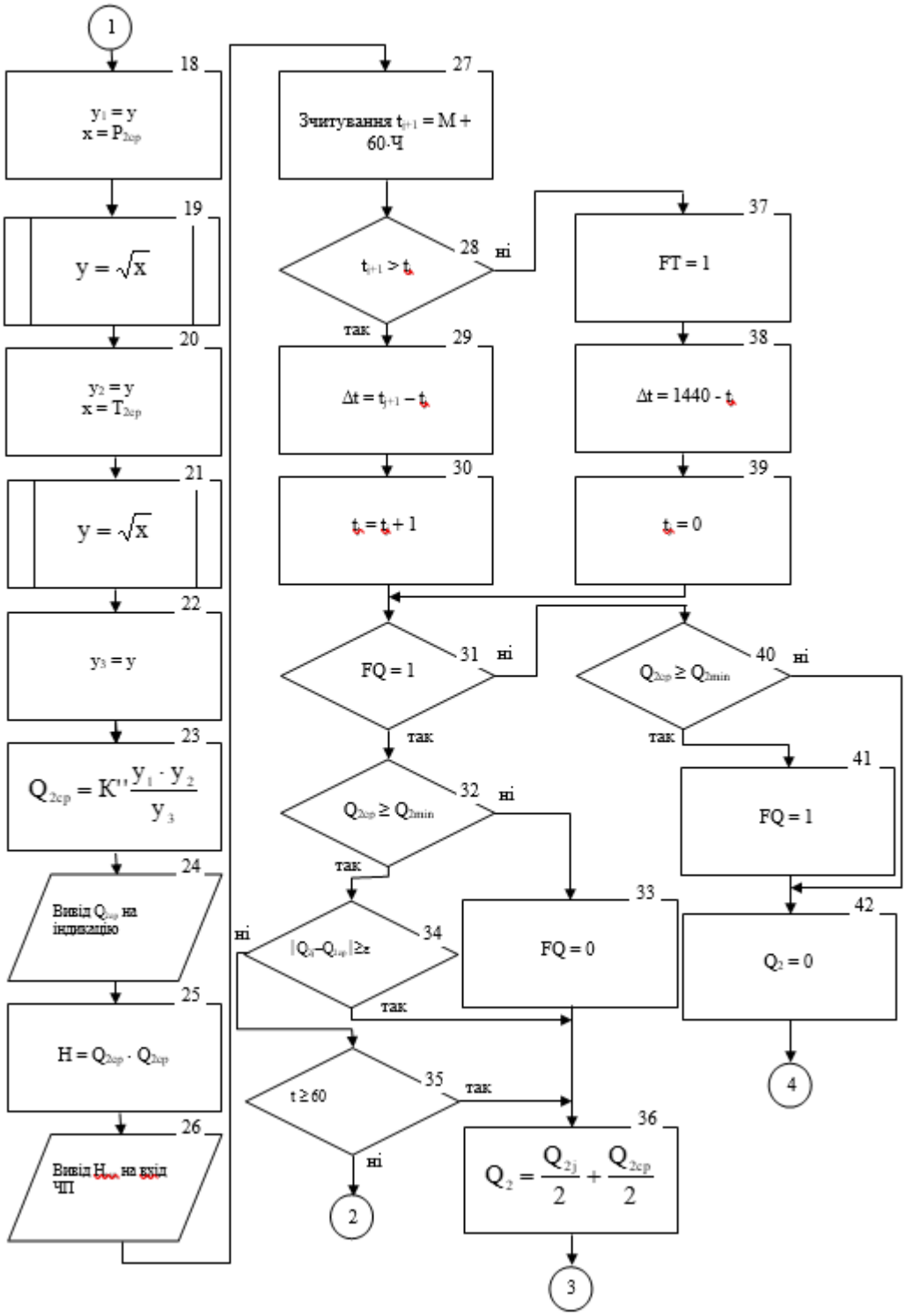


Рисунок 2.2 - Алгоритм визначення напору та розрахунку та облік величини витрати речовини (продовження)

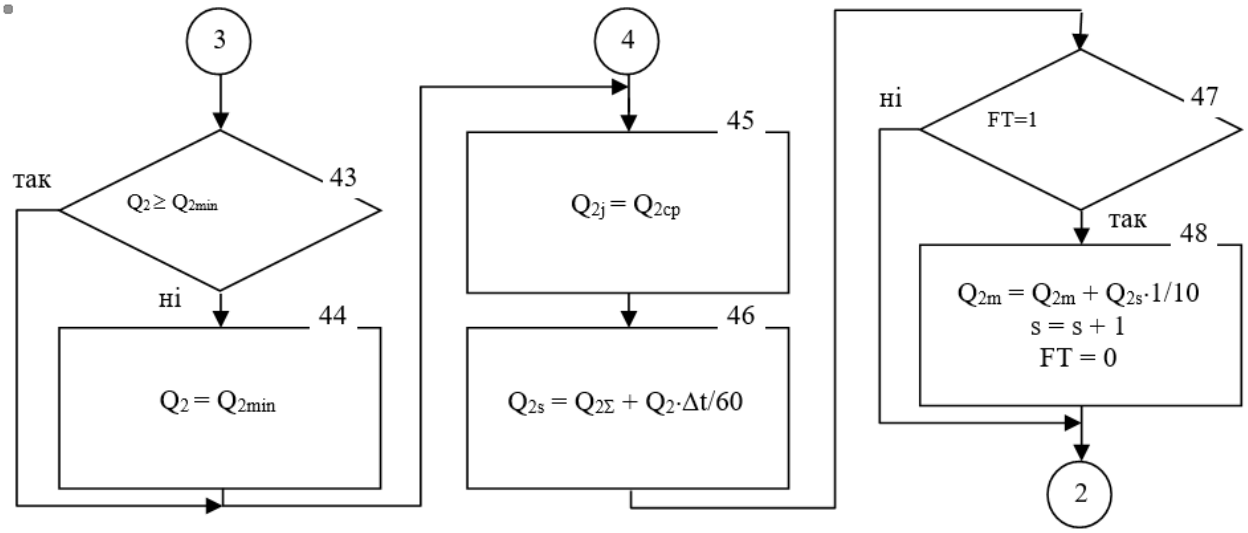


Рисунок 2.2 - Алгоритм визначення напору та розрахунку та обліку величини витрати речовини (закінчення)

Оскільки виконання розробленого алгоритму передбачається на контролері типу МікроДАТ, що не використовує функцію кореня квадратного, то обчислення кореня квадратного будемо виконувати в спеціальній підпрограмі, використовуючи розкладання даної функції в ряд. Також у спеціальній підпрограмі будемо виконувати обрахунки середнього значення величини. Алгоритми спеціальних підпрограм для обчислень середнього значення та кореня квадратного наведено на рисунках 2.3 та 2.4 [14, 15].

Під час розробки схеми алгоритмів, наведених на рис. 2.2-2.4, прийнято такі позначення:

$N$ - кількість циклів опитування, що будуть застосовуватись для розрахунку середніх значень;

$i$ - лічильник циклу опитування давачів;

$b_{\sum}, c_{\sum}, d_{\sum}$ - сумарні значення відхилень від першого за цикл значення, відповідно для зміни тиску, абсолютного тиску та температури речовини;

$X, X_1, X_{cp}, \Delta X_{\sum}$ - операнди спеціальної підпрограми обрахунку середнього значення ($X$ - чергове значення параметра, що вимірюється; $X_{cp}$ -

середнє значення параметра, що вимірюється; $X_1$ - перше в циклі значення параметра, що вимірюється; $\Delta X_{\sum}$ - сумарне значення відхилень параметра, що вимірюється від $X_1$);

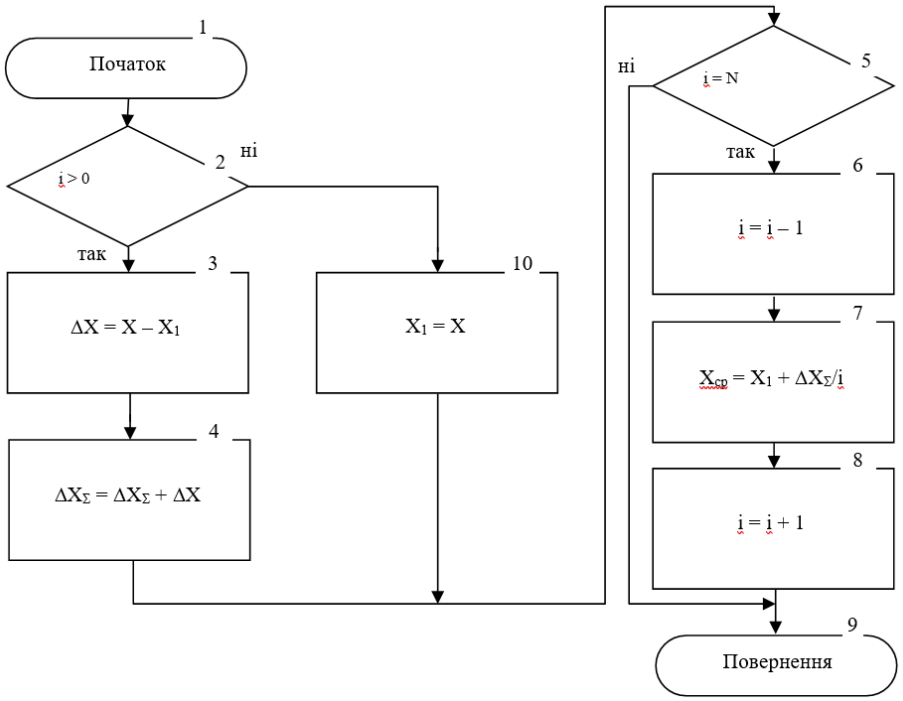


Рисунок 2.3 – Алгоритм спеціальної підпрограми обрахунку середнього значення

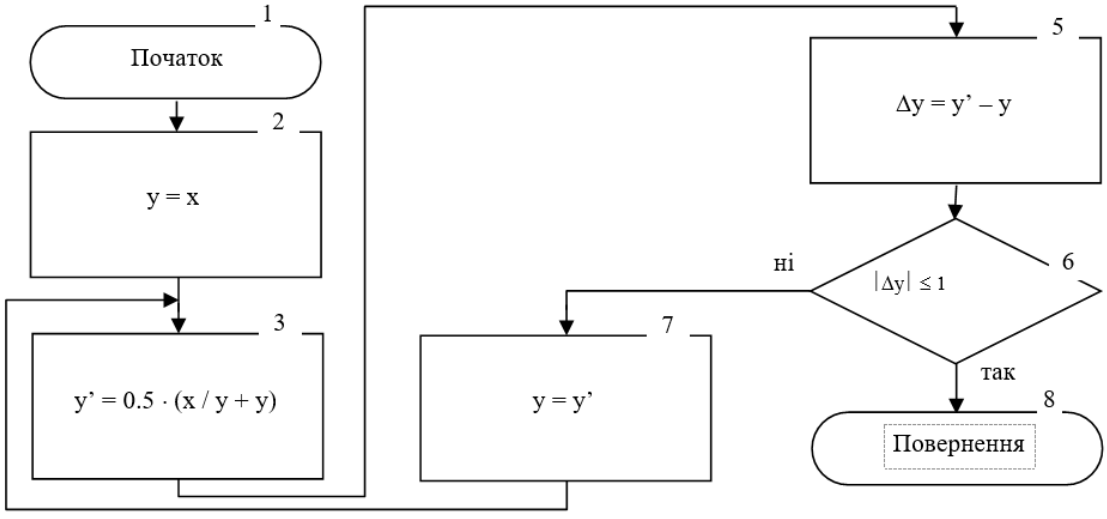


Рисунок 2.4 – Алгоритм спеціальної підпрограми обрахунку кореня квадратного

$\Delta P_{2i}, P_{2i}, T_{2i}$ - поміряне значення, відповідно, зміни тиску, абсолютного

тиску та температури речовини;

$\Delta P_{21}, P_{21}, T_{21}$ - перше в циклі значення параметра, що виміряється;

$\Delta P_{2cp}, P_{2cp}, T_{2cp}$ - середнє за цикл вимірювань значення параметру;

$x, y$ - операнди спеціальної підпрограми обчислення кореня квадратного, $x$ - вхідне значення, $y$ - вихідне значення;

$y_1, y_2, y_3$ - проміжні значення для обчислення величини витрати;

$Q_{2cp}$ - середнє за цикл вимірювання значення об'ємної величини витрати речовини;

$t_{j+1}$ - поточний час, що відповідає визначеному значенню $Q_{2cp}$;

$t_j$ - значення часу, що відповідає значенню величини витрати, яке є останнім зафіксованим;

$Q_{2j}$ - останнє зафіксоване значення величини витрати;

$Q_{2\min}$ - значення величини витрати речовини, що відповідає нижній границі;

$FQ$ - прапор мінімальної величини витрати;

$FT$ - прапор початку доби;

$S$ - лічильник доби.

Якщо з будь-яких причин тиск у мережі не буде підтримуватись на потрібному рівні, необхідна можливість переходу на ручне керування електроприводом насоса, не лише із регулюванням швидкості, а і без регулювання.

На підставі аналізу умов роботи НУ ми сформували наступні вимоги, що висуваються до системи керування [1, 2]:

1) програмне керування електроприводами насосів;

2) точна підтримка необхідного оптимального напору в мережі;

3) використання засобів дистанційного контролю та автоматичного керування параметрами мережі;

4) оперативний контроль, облік, звітність, протоколювання процесу та

діагностику працездатності технічних засобів САК.

Узагальнений алгоритм роботи НУ, розроблений базуючись на вимогах до системи керування НУ та до системи автоматизації, з урахуванням розробленої силової схеми, наведено на рисунку 2.5. Алгоритм складено відповідно до процесу подавання речовини споживачам.

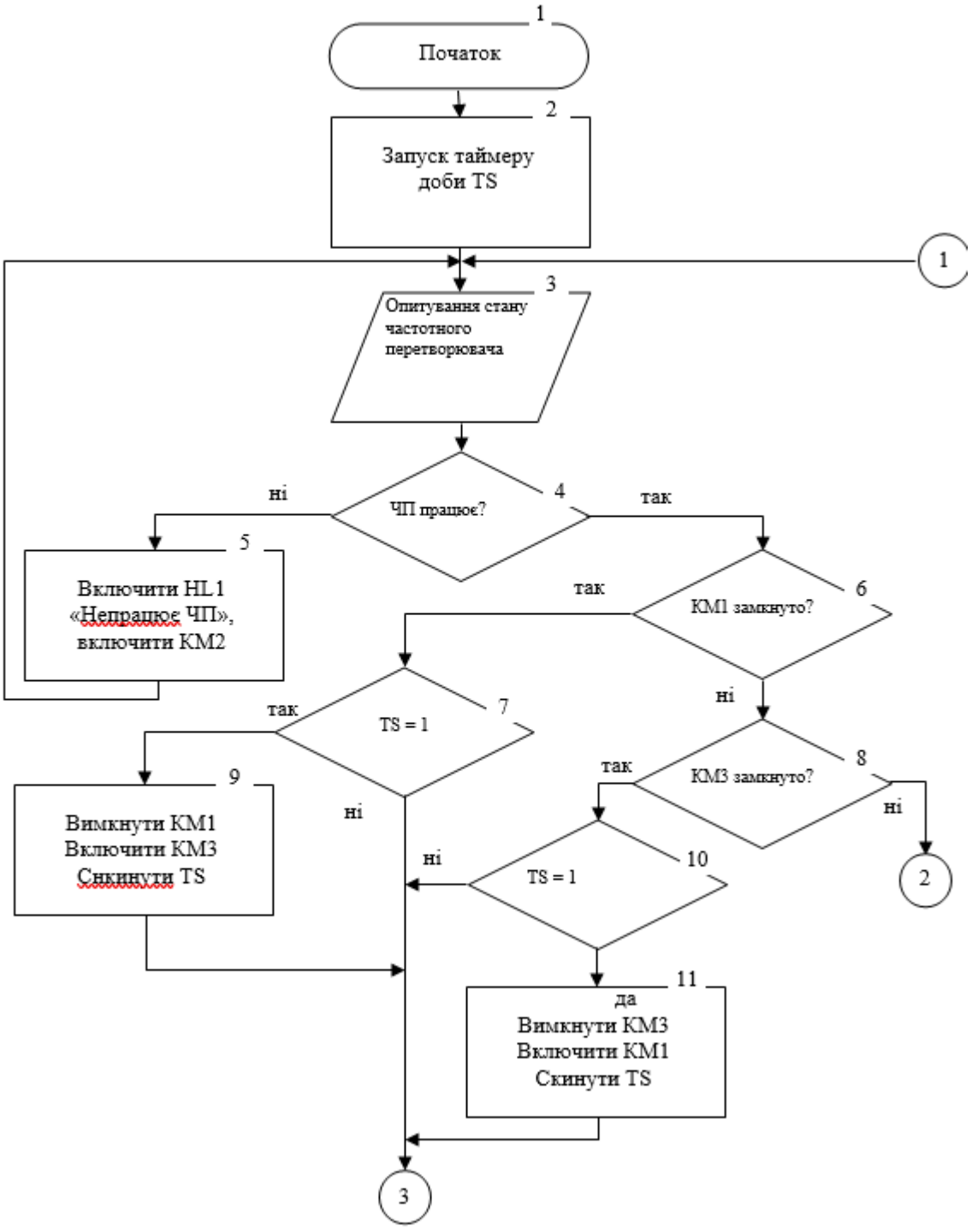


Рисунок 2.5 – Узагальнений алгоритм роботи НУ (початок)

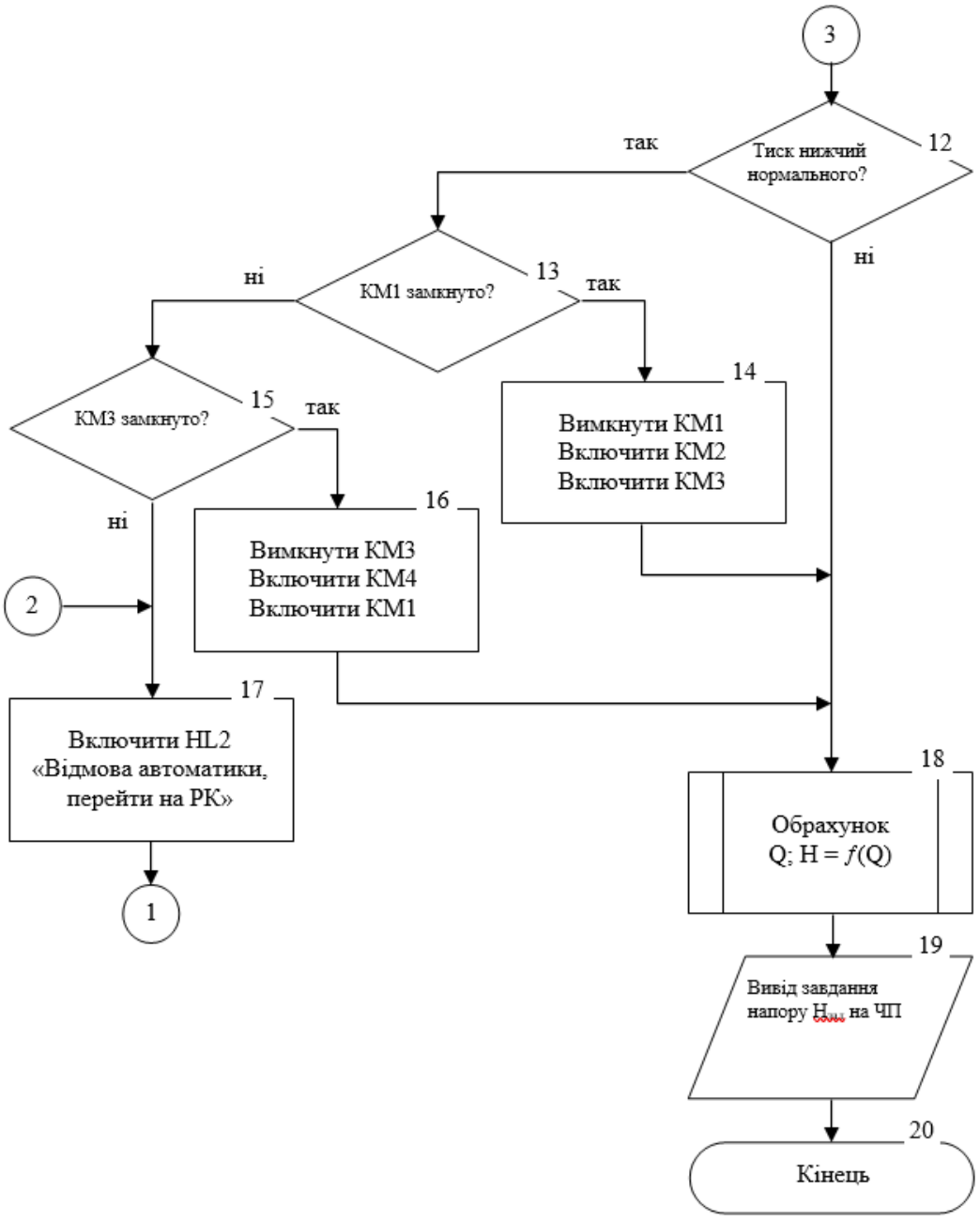


Рисунок 2.5 - Узагальнений алгоритм роботи НУ (закінчення)

Під час розробки алгоритму було використано позначення, які були використані при розробці принципової схеми.

## 2.3 Підбір апаратної частини обладнання для насосної установки

Для автоматизації роботи НУ, наприклад для системи гарячого водопостачання будемо використовувати контролер типу МікроДАТ. Ми

зупинились на даному типі контролера в зв'язку із його низькою ціною, простотою програмування і налаштування, широкою поширеністю, цілком достатнім набором інструкцій.

Мікроконтролер ГСП МікроДАТ МБ57.02 призначено для комплектування окремих вузлів достатньо гнучких виробничих систем або агрегатних верстатів із загальною кількістю входів-виходів до 64 шт. [14, 15].

Внутрішню будову контролеру може визначати сам розробник програми за картою замовлення виробника зі списку виробів, наприклад, наведеного нижче:

- джерело електроживлення МВ91.22;
- модуль мікропроцесорний МС59.07;
- каркас компонувальний МК10.13-02;
- модуль послідовного введення-виведення типу МС52.26;
- модуль введення дискретних сигналів постійного струму типу МС34.08-01 або МС34.08-03;
- модуль виведення дискретних сигналів постійного струму типу МС35.18-01;
- модуль виведення дискретних сигналів змінного струму типу МС35.25-01;
- модуль введення дискретних сигналів змінного струму типу МС34.09-01 або МС34.09-03;
- модуль виведення безперервних сигналів постійного струму типу МС32.09-01;
- модуль введення безперервних сигналів постійного струму типу МС34.14-01;
- розширювач інтерфейсу МС99.03-03.

Електричне живлення для контролера використовується від однофазної електричної мережі із напругою 220 В, частотою 50 Гц50, максимальна споживана потужність - 80 ВА [14, 15].

Мікроконтролер оснащений резервним джерело живлення типу

А-316 "Квант" (2шт.), для забезпечення зберігання інформації в ЕОЗП у разі зникнення електроживлення, час зберігання даних не менше 140 год.

Відповідно до створеного алгоритму для спроєктованої системи автоматики на базі контролера МікроДАТ вибираємо наступні типи модулів:

- модуль мікропроцесорний типу МС59.07 призначений для керування модулями вводу-виводу та опрацювання і зберігання інформації, технічні характеристики наступні:

а) вбудований обсяг пам'яті - 4К інструкцій;

б) час виконання будь-якої логічної операції - 7 мс/К інструкцій;

в) максимальна кількість дискретних каналів введення-виведення - 256;

г) діапазон обрахунку для таймерів та лічильників - 0-4095;

- модуль введення аналогових сигналів типу МС31.14, що оснащений вісьмома каналами, з діапазоном зміни вхідних сигналів 0-10 В, 0-20 мА;

- модулі введення дискретних сигналів типів МС34.08-03 та МС34.09-03 (технічні характеристики наведено в таблиці 2.1);

- модуль виведення аналогових сигналів типу МС32.09, що оснащений двома каналами, із діапазоном зміни вихідних сигналів 0-10 В, 0-20 мА;

- модуль виведення дискретних сигналів типу МС35.25-03 (технічні характеристики в табл. 2.1);

- модуль реального часу, що використовується для обробки процесів реального часу, для реалізації лічильника доби;

- узгоджувач інтерфейсів типу МС52.25, для обмінювання інформацією із ЕОМ керування [14, 15].

Таблиця 2.1 - Технічні характеристики модулів введення-виведення для дискретних сигналів [14, 15]

| Модуль | | Рід струму | Робоча напруга, В | Максимальна кількість каналів |
|---|---|---|---|---|
| Умовне познач. | Тип | | | |
| МС34.08-03 | Ввід | Постійний | 24 | 8 |
| МС34.09-03 | Ввід | Змінний | 220 | 8 |
| МС35.25-03 | Вивід | Змінний | 220 | 8 |

Для виконання необхідних перемикань у силовій частині дискретні вихідні сигнали контролера будуть подаватись на схему через проміжні реле типу РП-21МУХЛ4.

Для вимірювання потрібних параметрів ми обрали перетворювачі вимірювальні, що повинні забезпечити лінійну залежність між зміною вимірюваної величини та вихідного сигналу, які належать до виробів ГСП:

- для визначення різниці тисків Сапфір-22М-ДД модель 2440 із блоком вилучення кореня БИК-1;

- для визначення абсолютного тиску Сапфір-22М-ДА модель 2040;

- для визначення температури ТПХФ-Б-1.01Г-02.200.

## 2.4 Розробка функціональної схеми контролеру

Відповідно до обраного контролера, давачів та змінних модулів, розробимо функціональну схему контролера. Ця схема наведена на рисунку 2.6. Схему підключення контролера до пристроїв системи керування НУ буде зображено на схемі принципової електроприводу НУ [14, 15].

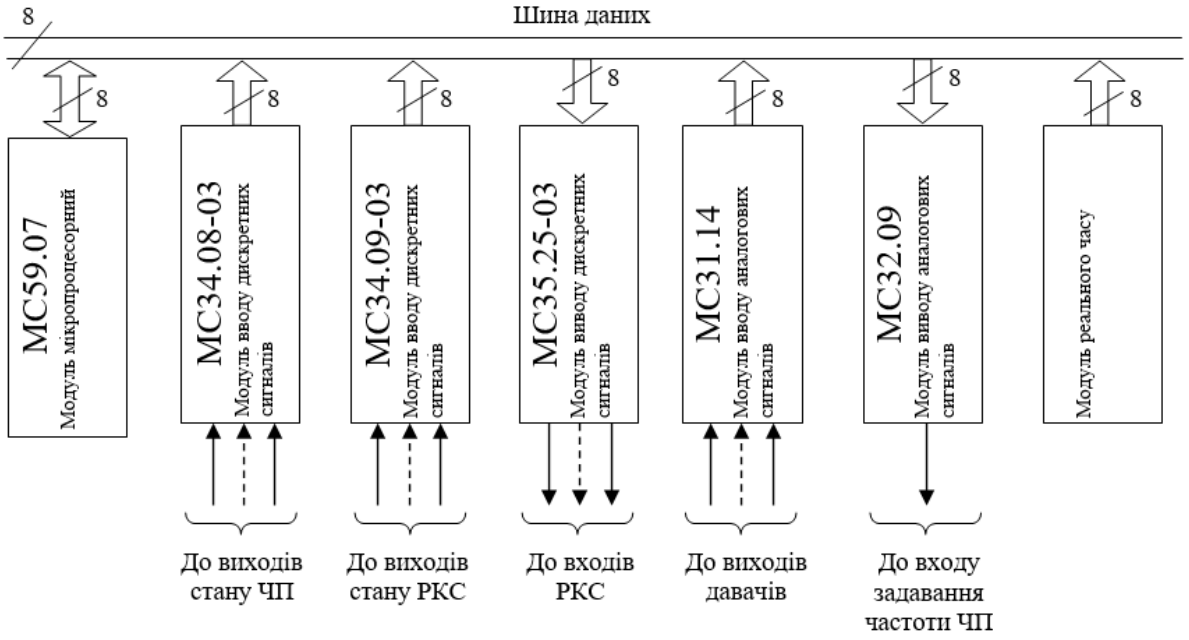


Рисунок 2.6 – Розроблена функціональна схема контролеру

## 2.5 Розробка програми керування насосною установкою

Відповідно до місця під'єднання блоків вводу-виводу до каркаса компонувального контролера, створеного алгоритму та обраних пристроїв, було створено та запропоновано програму керування НУ, яку написано на мові символічного кодування [16]. Текст програми та карта ідентифікаторів до неї наведені в додатках (див. додаток А). Ця програма дозволяє керувати релейно-контактною частиною схеми, розраховувати напругу завдання напору для частотного перетворювача в залежності від величини поточної витрати, а також виконувати статистичний облік водоспоживання (наприклад, середньогодинного, середньодобового або середньомісячного).

## 2.6 Конструктивна розробка пульта керування насосною установкою

Для забезпечення оперативної взаємодії людини-оператора із НУ нам необхідно передбачити пульт керування. Пульт керування повинен бути оснащений спеціальними органами впливу, за допомогою яких людина-оператор могла би керувати всім процесом роботи, а також містити індикатори для контролю загального стану НУ [1, 2].

Відповідно до створеної та запропонованої принципової схеми електроприводу НУ, пульт керування повинен бути оснащений перемикачами, кнопками та лампами світлової індикації.

За допомогою перемикачів буде змінюватись режим роботи НУ (тобто автоматичне або ручне керування), а в разі лише ручного керування - спосіб під'єднання двигуна (під'єднання до мережі живлення через частотний перетворювач або без). У випадку під'єднання двигуна до мережі живлення через частотний перетворювач керування параметрами частотного перетворювача буде виконуватись з панелі керування частотного перетворювача, що розташована в шафі керування (там же розташований і контролер).

Кнопки будуть застосовуватись для комутації під'єднання електродвигунів (частотний перетворювач чи мережа), пуску в разі прямого під'єднання до мережі та зупинки електродвигунів. Також на пульті керування повинна бути розташована кнопка "ПУСК" частотного перетворювача для запуску електродвигуна в режимі ручного керування через частотний перетворювач. Усі кнопки без можливості фіксації положення, кнопки "СТОП" – червоного кольору, кнопки"ПУСК" - чорного.

Світлова індикація буде виконуватись за допомогою ламп на номінальну напругу 220 В змінного струму. Лампи встановлено під кольоровими віконцями ("Аварія", "Ручне", "Нерег." – червоного, "Робота", "Авт.", "Рег.", мережа електроживлення - зеленого). Над лампами світлової індикації повинні бути розміщені написи. Лампи мають сигналізувати про стан двигунів електропривода насосів (ручне або автоматичне керування, через частотний перетворювач або пряме підключення до мережі), про наявність напруги живлення на керуючій та силовій частинах схеми, про стан релейно-контактної автоматики, частотного перетворювача та контролера.

Створений та запропонований відповідно до наведених раніше вимог пульт керування представлено на рисунку 2.7.

Висновки до розділу

Згідно поставленого завдання було створено схему автоматизації НУ, на основі якої було обрано необхідну кількість та тип обладнання. Розроблено алгоритм розрахунку та обліку витрати речовини та визначення напору, алгоритм спеціальної підпрограми для обрахунку кореня квадратного та алгоритм спеціальної підпрограми для обрахунку середнього значення. На основі яких було сформульовано необхідні вимоги до системи керування НУ та розроблено узагальнений алгоритм роботи всієї НУ.

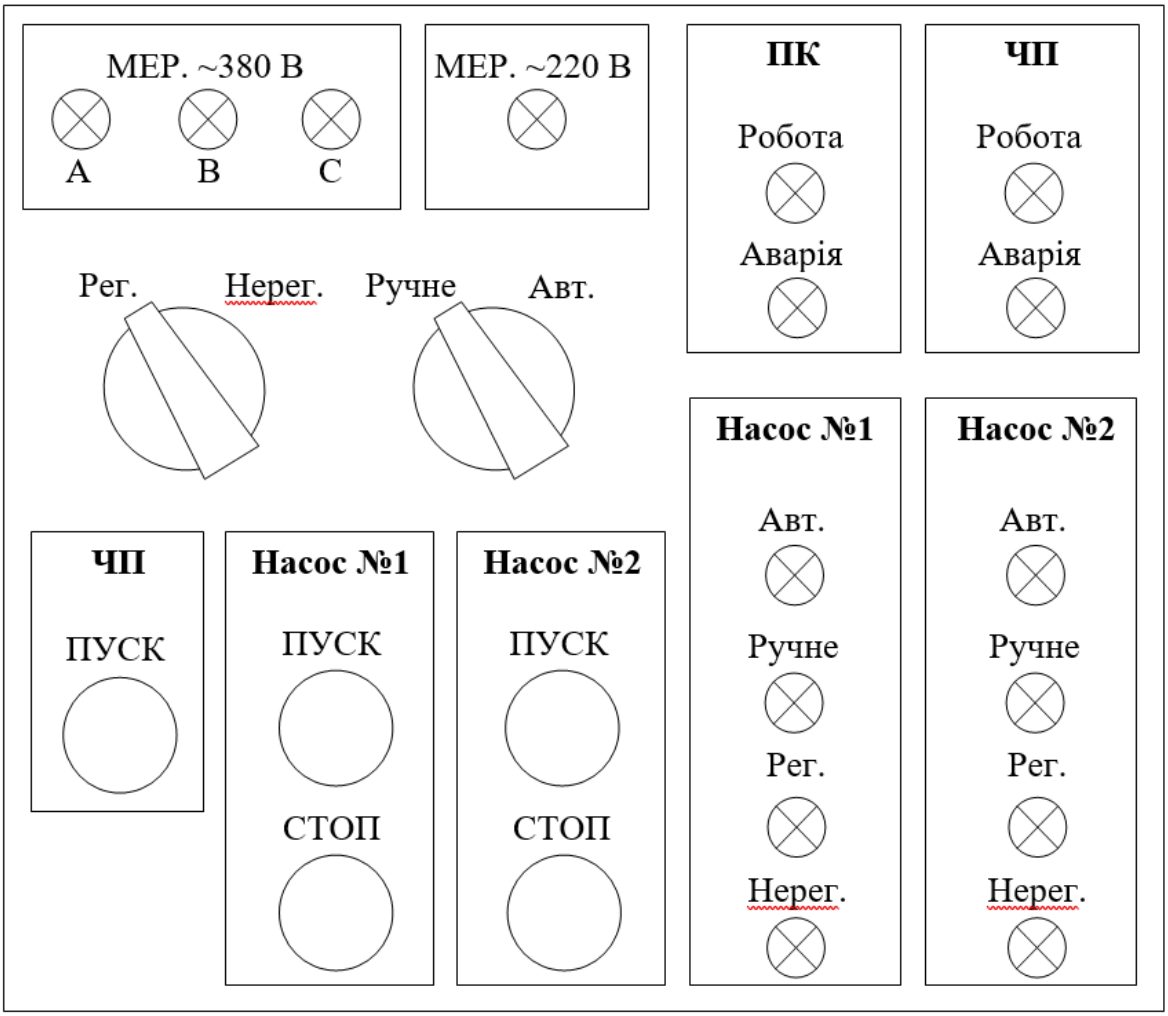


Рисунок 2.7 – Проєкт пульту керування насосною установкою

Підібрано необхідну апаратну частину обладнання, розроблено функціональну схему контролеру для підключення модулів та розроблено саму програму для керування НУ, запропоновано проєкт пульту керування НУ.

# 3 РОЗРАХУНКИ, ЩО ПІДТВЕРДЖУЮТЬ ПРАЦЕЗДАТНІСТЬ

## 3.1 Перевірка обраних електродвигунів за перевантажувальною здатністю та нагріванням

### 3.1.1 Побудова навантажувальних діаграм та уточнення потужностей електродвигунів

Базуючись на приблизному розподілі середньодобової витрати гарячої води за годинами доби можна побудувати графік водоспоживання, представлений на рисунку 3.1, вважаючи при цьому, що витрата гарячої води протягом кожної години є рівномірною [17].

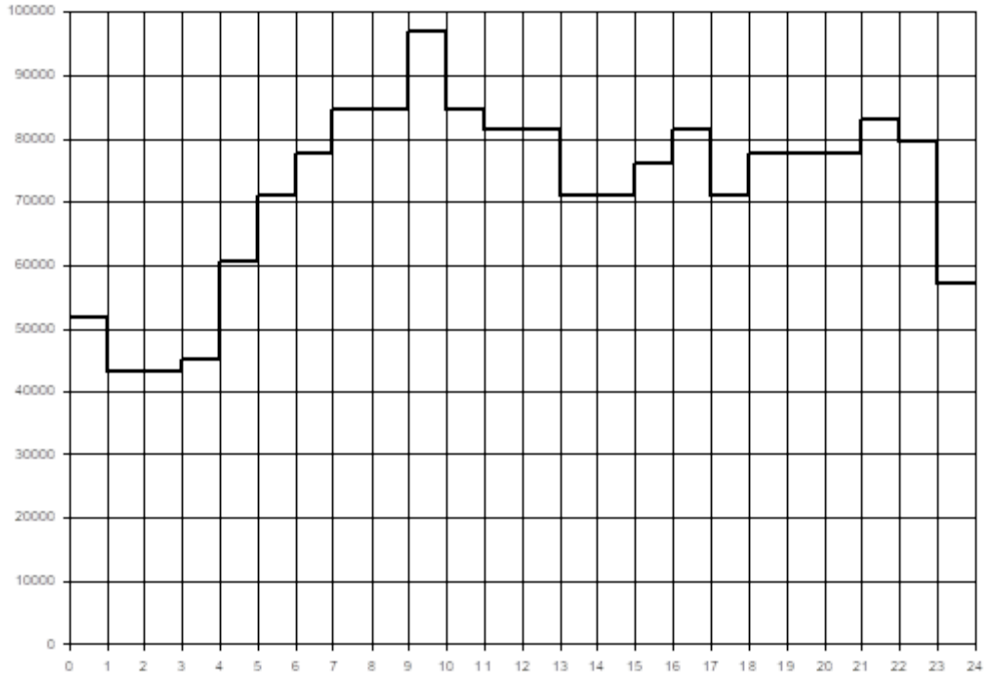


Рисунок 3.1 – Приблизний погодинний графік водоспоживання

Виходячи із графіка водоспоживання, ми можемо побудувати діаграми для моменту та швидкості насоса, і, звичайно, для всього двигуна, приймаючи, що подача рідини буде пропорційна швидкості, а момент турбомеханізму буде пропорційним квадрату швидкості насоса [1, 2, 5].

Коефіцієнт пропорційності для швидкості знайдемо з наступної формули:

$$Q_2 = Q_1 \cdot \left( \frac{n_2}{n_1} \right), \tag{3.1}$$

де $Q_2, Q_1$ - подача насоса, при швидкості насоса відповідно $n_2, n_1$.

Звідси, отримаємо:

$$Q_2 = k \cdot n_2 = \left( \frac{n_1}{Q_1} \right) \cdot n_2 \tag{3.2}$$

Підставивши в рівняння 3.2 номінальні (паспортні) дані насоса із таблиці 1.2 ми отримаємо, що коефіцієнт пропорційності $k = 2900/25 = 116$ л/(с · об/хв).

Момент насоса для відносної швидкості можна визначити з наступної формули:

$$M_{нас} = M_0 + 0,95 \cdot M_{нас} \cdot \omega^2, \tag{3.3}$$

де $M_{нас}$ - номінальний (паспортний) момент насоса, визначається із відношення $M_{нас} = P_{нас} / \omega_{нас}$, де $P_{нас}$, $\omega_{нас}$ - відповідно номінальні (паспортні) потужність та частота обертання насоса; $M_0$ - момент, що визначається силами тертя в механізмі, приймається приблизно 5% від номінального моменту насоса; $\omega^*$ - відносна швидкість насоса, $\omega^* = \omega / \omega_{ном}$.

Базуючись на формулах 3.2 - 3.3 та приблизному графіку водоспоживання рисунок 3.1 ми створимо навантажувальні діаграми механізму, наведені на рисунках 3.2 та 3.3.

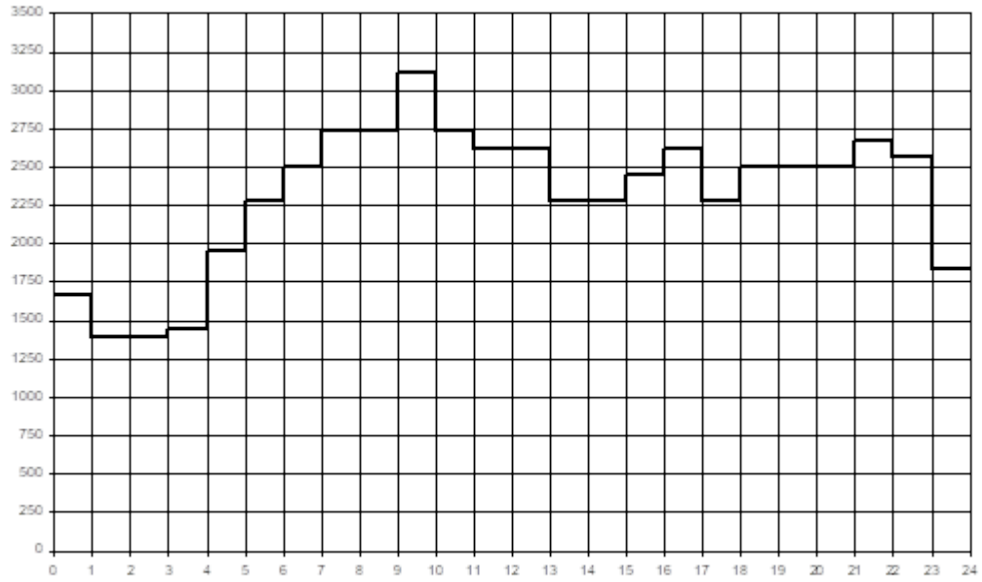


Рисунок 3.2 – Спроєктована діаграма швидкості насосу

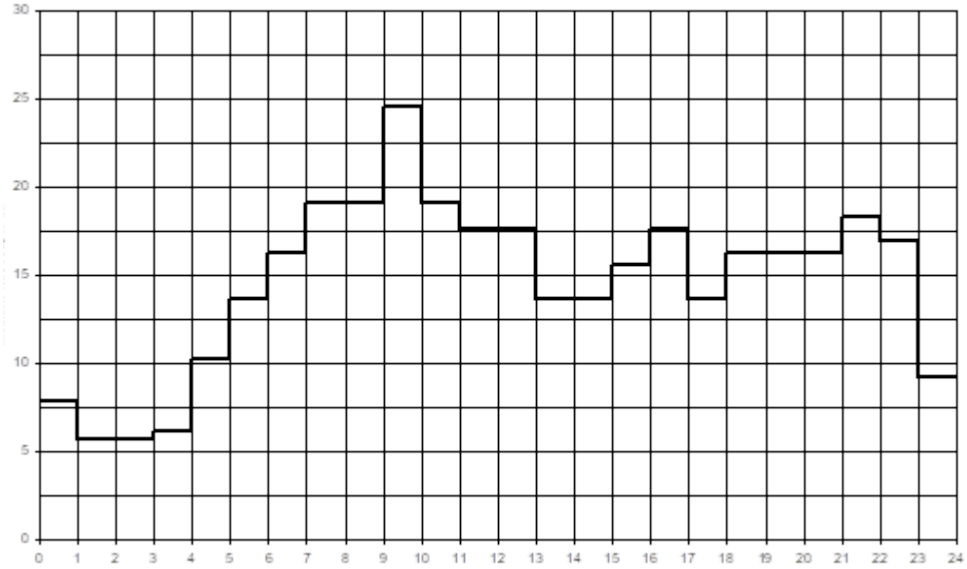


Рисунок 3.3 – Спроєктована діаграма моменту насосу

Як видно із діаграм (рис. 3.2 та 3.3) навантаження носить досить тривалий характер, отже, ми маємо тривалий режим роботи всієї насосної установки ($S_1$). Тому можливо здійснити перевірку обраного двигуна не враховуючи динамічні режими його роботи.

3.1.2 Розрахунок параметрів схеми заміщення, побудова природної механічної характеристики електродвигуна [11-13]

Виконаємо розрахунок природної статичної характеристики обраного електродвигуна. Для цього ми розрахуємо параметри схеми заміщення асинхронного електродвигуна відповідно його паспортним даним:

- розрахунок повного опору короткого замикання (КЗ):

$$Z_k = \frac{\mathrm{U}_{\Phi\mathrm{н}}}{\lambda_I \cdot I_н}, \tag{3.4}$$

де $\lambda_I = 7{,}5$ - кратність пускового струму; $\mathrm{U}_{\Phi\mathrm{н}} = 220$ В - номінальна фазна напруга; $I_н = P_н \big/ \left(3 \cdot U_{Фн} \cdot \eta_н \cdot \cos\varphi_н\right) = 14{,}7$ А - номінальний струм.

$$Z_k = \frac{220}{14{,}76 \cdot 7{,}5} = 1{,}99 \text{ (Ом)}.$$

- розрахунок пускового коефіцієнту потужності:

$$\cos\varphi_{\text{пуск}} = \cos\varphi_{\text{н}} \cdot \left( \frac{\lambda_п \cdot \eta_н}{\lambda_I \cdot \left(1 - s_н\right)} + \gamma_{ст}\left(1 - \eta_н\right) \right), \tag{3.5}$$

де $\gamma_{ст}$ - відношення втрат в обмотці статора до повних втрат при номінальному навантаженні, $\gamma_{ст}$=0,3; $\cos\varphi_{\text{н}}$ - номінальний коефіцієнт потужності, $\cos\varphi_{\text{н}} = 0{,}88$; $s_н$ - величина номінального ковзання, $s_н$=0,026; $\eta_н$ - номінальний ККД, $\eta_н = 0{,}875$; $\lambda_п$ - кратність пускового моменту, $\lambda_п = 2$.

$$\cos\varphi_{\text{пуск}} = 0{,}244.$$

- розрахунок активного пускового опору КЗ:

$$R_к = Z_к \cdot \cos\varphi_{пуск} = 0,486 \text{ Ом}. \quad (3.6)$$

- розрахунок індуктивного пускового опору КЗ:

$$X_к = \sqrt{Z_к^2 - R_к^2} = 3,65 \text{ Ом} \quad (3.7)$$

- розрахунок індуктивних опорів фаз ротора та статора [11-13], Ом:

$$X_1 = 0,864;\ X_2' = 2,087\ \text{X1} = 0,864;\ \text{X'2} = 2,087. \quad (3.8)$$

- розрахунок критичного ковзання: $s_k = 12\%$.

- приймаємо наведений активний опір фази ротора, Ом: $R_2' = 0,417$.

- приймаємо активний опір фази статора, Ом: $R_1 = 0,686$.

- розрахунок критичного моменту:

$$M_к = \frac{3 \cdot U_{фн}^2}{2 \cdot \omega_{0н} \cdot (R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_к^2})} = 53,95 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (3.9)$$

- розрахунок струму холостого ходу:

$$I_0 = I_н \cdot \left( \sin\varphi_н - \frac{s_н}{s_к} \cdot \cos\varphi_н \right) = 5,024 \text{ А}. \quad (3.10)$$

- розрахунок приведеного струму ротора:

$$I_2^{'} = \sqrt{\frac{M \cdot \omega_0 \cdot s}{3 \cdot R_2^{'}}}. \quad (3.11)$$

- розрахунок втрат на намагнічування:

$$\Delta P_{ст} = 0,02 \cdot \frac{P_{ном}}{\eta_{ном}} = 171,429 \text{ Вт}. \quad (3.12)$$

- розрахунок активного опору гілки намагнічування:

$$R_{\mu} = \frac{\Delta P_{ст}}{3 \cdot I_0^2} = 2,264 \text{ Ом}. \quad (3.13)$$

- розрахунок індуктивного опору гілки намагнічування:

$$X_{\mu} = 55,149 \text{ Ом}.$$

- розрахунок електромагнітної постійної часу для електродвигуна:

$$T_э = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot s_к} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 0,026} = 0,122 \text{ с}. \quad (3.14)$$

Для швидкості двигуна $\omega$ в границях від 0 до $\omega_{ном}$ з деяким заданим кроком $\Delta\omega$ виконаємо такі розрахунки:

- розрахуємо абсолютне ковзання:

$$s_a = 1 - \frac{\omega}{\omega_{ном}}, \quad (3.15)$$

- розраховуємо момент двигуна:

$$M = \frac{2M_к}{\frac{\alpha - \nu}{s_a} + \frac{s_a}{\alpha - \nu}}, \qquad (3.16)$$

Отримана під час виконання розрахунків механічна характеристика електродвигуна наведена на рисунку 3.4.

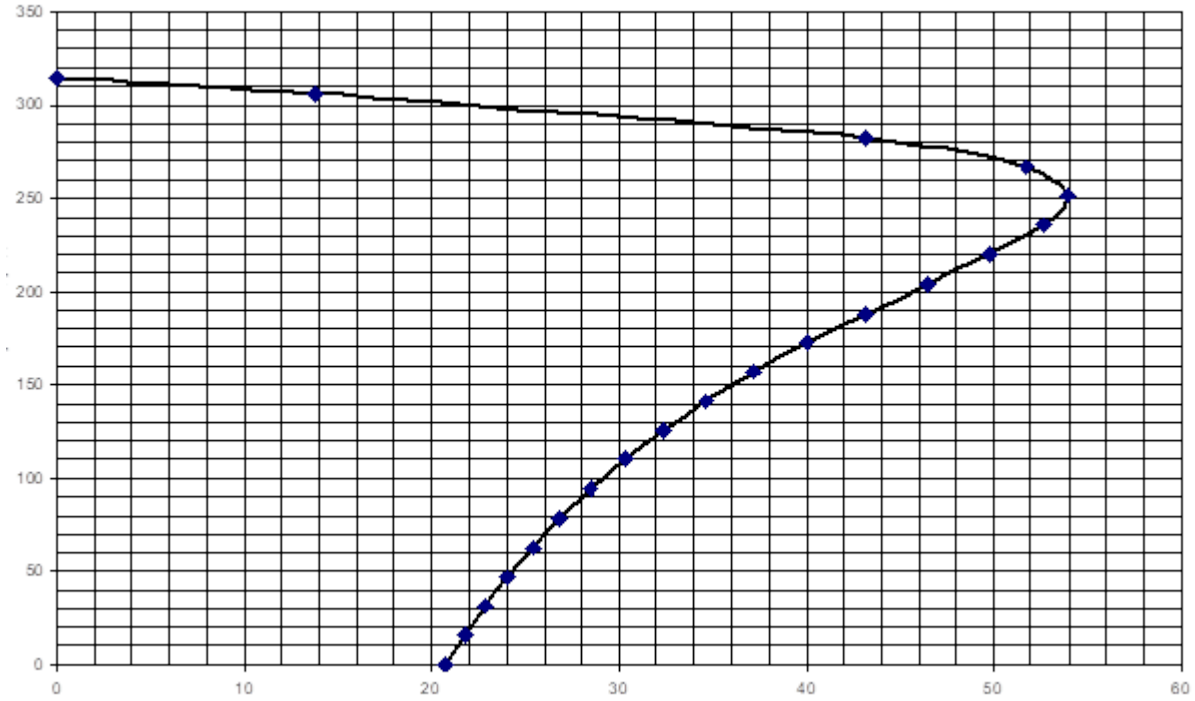


Рисунок 3.4 – Розрахована механічна характеристика електродвигуна

3.1.3 Перевірка електродвигуна за перегрівом та перевантажувальною здатністю [11-13]

Як було зазначено раніше, спроєктована НУ буде працювати в тривалому режимі, тому для перевірки електродвигуна достатньо перевірити три точки при відносної швидкості $\omega^* = \omega / \omega_{ном}$, що відповідно дорівнює $0,5; 0,75; 1$, із урахуванням погіршень умов охолодження під час пуску електродвигуна. Графічна залежність коефіцієнту погіршення умов охолодження від швидкості електродвигуна наведено на рисунку 3.5.

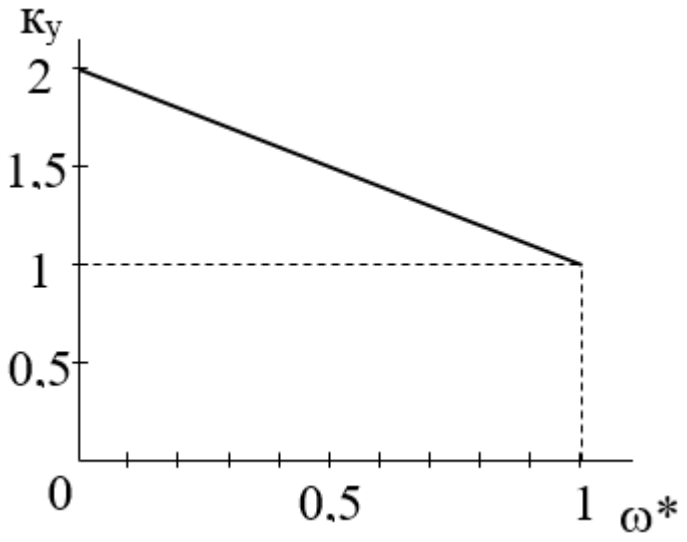


Рисунок 3.5 – Графічна залежність коефіцієнту погіршення умов охолодження від швидкості

Розрахуємо необхідні для перевірки електродвигуна величини за перевантажувальною здатністю та нагріванням [11-13].

- розрахуємо синхронну частоту обертання електродвигуна:

$$\omega_0 = \frac{\pi \cdot n_0}{30} = \frac{3{,}14 \cdot 3000}{30} = 314 \text{ рад/с}. \quad (3.17)$$

- розрахуємо номінальну частоту обертання електродвигуна:

$$\omega_н = \omega_0 \cdot (1 - s_н) = 314 \cdot (1 - 0{,}026) = 305{,}836 \text{ рад/с}. \quad (3.18)$$

- розрахуємо номінальний (паспортний) момент двигуна:

$$M_н = \frac{P_н}{\omega_н} = \frac{7500}{305{,}836} = 24{,}523 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (3.19)$$

Момент насоса для будь-якої відносної швидкості $\omega^*$ можна визначити з

наступної формули [11-13]:

$$M_{нас} = M_0 + 0{,}9 \cdot M_н \cdot \omega^{*2}, \tag{3.20}$$

де $M_н$ - номінальний момент насоса, визначається із відношення $M_{нас} = P_{нас} / \omega_{нас} = 6500/303{,}53 = 21{,}41$, де $P_{нас}, \omega_{нас}$ - відповідно номінальні потужність та частота обертання насоса; $M_0$ - момент, що визначається силами тертя в механізмі, згідно довідника дорівнює 5% від номінального моменту насоса.

Розрахунковий момент електродвигуна ми будемо визначати із урахуванням погіршення умов охолодження під час запуску електродвигуна, для врахування погіршення умов охолодження введемо коефіцієнт $k_y$, значення якого будемо приймати відповідно до графічної залежності 3.5.

Таким чином, формула для розрахункового моменту електродвигуна матиме наступний вигляд:

$$M_{розр} = k_y \cdot M_{нас}. \tag{3.21}$$

Базуючись на вищеописаних припущеннях для першого випадку ($\omega^* = 1$) отримаємо:

$$M_{нас} = 0{,}05 \cdot 21{,}41 + 0{,}95 \cdot 21{,}41 \cdot 1 = 21{,}41 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{розр} = 21{,}41 \cdot 1 = 21{,}41 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Для другого випадку ($\omega^* = 0{,}75$) розраховуємо:

$$M_{нас} = 0{,}05 \cdot 21{,}41 + 0{,}95 \cdot 21{,}41 \cdot 0{,}75^2 = 12{,}51 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{розр} = 12,51 \cdot 1,25 = 15,64 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Для третього випадку ($\omega^* = 0,5$) розрахуємо:

$$M_{нас} = 0,05 \cdot 21,41 + 0,95 \cdot 21,41 \cdot 0,5^2 = 6,16 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{розр} = 6,16 \cdot 1,5 = 9,23 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Оскільки для всіх трьох розрахованих випадків розрахунковий момент електродвигуна із урахуванням погіршення умов охолодження менший за номінальний (паспортний) момент електродвигуна ($M_{розр} < M_н$), отже, електродвигун відповідає як умовам перегріву, так і умовам перевантаження.

## 3.2 Проєктування та розрахунок силової схеми автоматизованого електроприводу

Для живлення електродвигунів приводу насосів, які попередньо обрано та перевірено за перевантаженням та нагріванням, ми будемо застосовувати частотний перетворювач типу РЕН (ЯВІЕ.435321.001) [5, 7, 18].

Даний частотний перетворювач використовується для частотного керування трифазними асинхронними електродвигунами потужністю до 30 кВт.

Сфера застосування частотного перетворювача: НС водо- та теплопостачання в ЖКГ, енергетиці, технологічні НУ в хімічній промисловості, станції оборотного водопостачання на підприємствах, наприклад, машинобудівної промисловості.

Приблизну спрощену схему силових кіл даного частотного перетворювача показано на рисунку 3.6. Усі елементи даної схеми розраховані та постачаються

виробником у складі частотного перетворювача [18, 19].

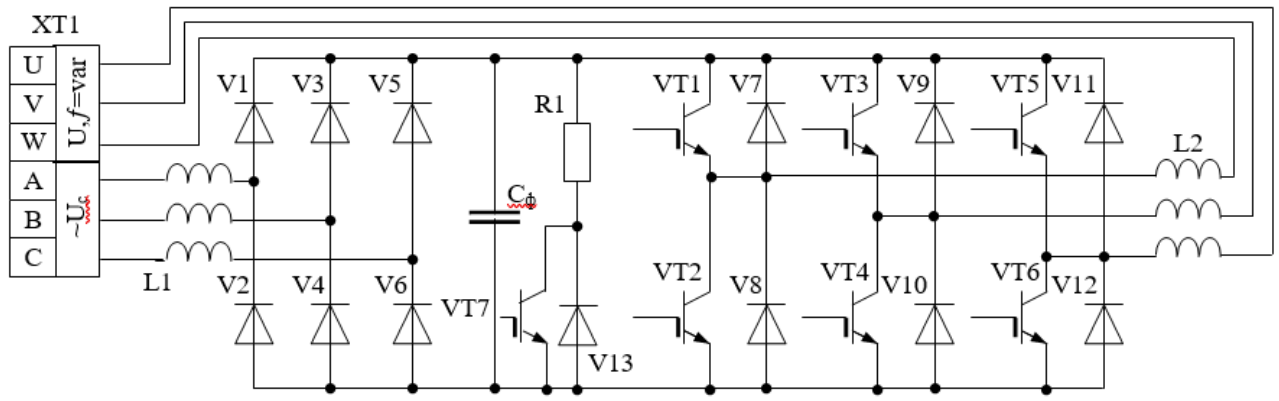


Рисунок 3.6 – Спрощена схема силових кіл частотного перетворювача

Основні параметри частотного перетворювача типу РЕН [18, 19]:

- номінальна напруга живлення приводного електродвигуна $3\times380$ В, 50 Гц;

- номінальна напруга мережі живлення $3\times330\pm10\%$ В, $50\pm1\%$ Гц;

- діапазон регулювання частот від 2,5 до 50 Гц;

- номінальна потужність приводного електродвигуна - не більше 7,5; 11; 15; 22; 30 кВт, в залежності від конструктивного виконання частотного перетворювача (приймаємо частотний перетворювач РЕН-2-02-УХЛ4, що розрахований на потужність приводного електродвигуна до 7,5 кВт);

- форма вихідної напруги - імпульсна, модульована відносно гармонійого закону, що забезпечує квазісинусоїдальну форму для струму в усьому діапазоні регулювання вихідної частоти;

- коефіцієнт корисної дії частотного перетворювача в номінальному режимі - не нижчу 0,9;

- коефіцієнт потужності частотного перетворювача - не нижче 0,95;

- навколишнє середовище повинне бути невибухонебезпечним і не містити агресивних газів та парів у концентраціях, що можуть призвести до руйнування металу чи ізоляції, а також не насичене струмопровідним пилом;

- частотний перетворювач збудований для роботи тільки в закритих

опалювальних приміщеннях у помірно кліматичних районах, кліматичне виконання УХЛ, категорія розташування 4 ГОСТ 15150;

- допустима відносна вологість повітря - до 100%, температура навколишнього середовища - 0 до +40°С;

- ступінь захисту шафи IP54.

Частотний перетворювач повинен забезпечувати [18, 19]:

- плавний запуск електродвигуна із заданою швидкістю;

- плавний самозапуск із тою самою швидкістю після відновлення напруги живлення;

- регулювання (відповідно до задаючого сигналу), наприклад, тиску, що створюється насосом у замкнутій системі керування тиском;

- роботу в нерегульованому режимі з ручним завданням частоти напруги живлення для електродвигуна;

- захист електродвигуна та частотного перетворювача від струмів перевантаження та КЗ;

- захист електродвигуна від неприпустимого зниження чи підвищення напруги у мережі живлення;

- створення сигналів для під'єднання до системи нерегульованого електродвигуна резервного насоса та вимкнення його в момент необхідності;

- частотний перетворювач повинен бути оснащений світловою сигналізацією наявності напруги живлення та ввімкненого стану для індикації частоти живлення електродвигуна та для спрацьовування каналів захисту.

Частотний перетворювач повинен забезпечувати роботу в наступних режимах [18, 19]:

- режим автоматичного регулювання частоти вихідної напруги відповідно до сигналу від давача зовнішньої технологічної координати: частота вихідної напруги буде обиратись автоматично в залежності від поточної величини сигналу, що буде надходити до системи керування від давача зовнішнього технологічного параметра (давача тиску);

- режим ручного керування із завданням частоти вихідної напруги від пульта керування: частоту задають перед під'єднанням ЧП до навантаження (електродвигуна); під час роботи ЧП розганяється до заданої частоти та працює на ній який завгодно довгий проміжок часу, у цьому режимі сигнал від давача зовнішньої технологічної координати не повинен мати вплив на роботу електропривода, під час увімкнення електропривода в замкнений контур регулювання за зовнішнім технологічним параметром цей режим роботи електропривода може бути використано як налагоджувальний.

Дросель для згладжування L1 ми обрали таким чином, щоб його індуктивність була якомога більшою, а падіння фазної напруги на дроселі не перевищувало 3%. Тоді вхідну потужність частотного перетворювача знайдемо із наступної формули [18, 19]:

$$P_{вх} = \frac{P_{дв}}{\eta_{дв} \cdot \eta_{чп}}, \tag{3.22}$$

де $P_{дв}$ - потужність приводного електродвигуна; $\eta_{дв}$ - ККД приводного електродвигуна; $\eta_{чп}$ - ККД частотного перетворювача.

Якщо врахувати параметри обраних електродвигуна та частотного перетворювача після розрахунків за формулою 3.22 ми отримуємо:

$$P_{вх} = \frac{7,5}{0,875 \cdot 0,9} = 9,524 \text{ кВт}.$$

Можна розрахувати вхідний струм фази частотного перетворювача:

$$I_{вх} = \frac{P_{вх}}{3 \cdot k_p \cdot U_{Фн}}, \tag{3.23}$$

де $U_{Фн}$ - фазна номінальна напруга мережі; $k_p$ - коефіцієнт потужності частотного перетворювача.

$$I_{вх} = \frac{9524}{3 \cdot 0,95 \cdot 220} = 15,2 \text{ А}.$$

Якщо обрати допустиме падінням фазної напруги на дроселі 3% від номінальної напруги, то можливо розрахувати реактивний опір дроселя:

$$X = \frac{\Delta U_{доп}}{I_{вх}}; \quad (3.24)$$

$$X = \frac{220 \cdot 3\%}{15,2} = 0,434 \text{ Ом}.$$

Знаючи індуктивний опір ми можемо легко знайти індуктивність дроселя:

$$L = \frac{X}{2\pi \cdot f}, \quad (3.25)$$

де $f$ - частота напруги живлення.

$$L = \frac{0,434}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,00138 \text{ Гн}.$$

Базуючись на наведених вище розрахунках, ми робимо припущення, що потрібно виготовити на замовлення дросель згладжування L1 із наступними параметрами:

- індуктивність котушки - $L = 1,38$ мГн;

- допустима потужність розсіювання - $P_{\sum} = 2\% \cdot P_{вх} = 190$ Вт.

Дросель для згладжування L2 повинен володіти такою індуктивністю, згідно з документацією на частотний перетворювач [18, 19], яка приблизно дорівнює індуктивності статора електродвигуна. Причому допустима потужність розсіювання дроселя для згладжування L2 не повинна перевищувати 2% від номінальної потужності електродвигуна. Таким чином, ми робимо припущення, що необхідно виготовити на замовлення дросель для згладжування L2 із наступними параметрами:

- індуктивність котушки - $L = 2$ мГн;

- допустима потужність розсіювання - $P_{\sum} = 2\% \cdot P_{дв} = 150$ Вт.

На підставі вимог, що ми сформулювали для електропривода та всієї системи автоматизації в цілому, а також обраної системи електропривода ми встановили, що існує потреба у роботі НУ як в автоматичному так і в ручному режимі із періодичною заміною резервного насоса та вмиканням, у разі потреби, додаткового насоса. З урахуванням зазначених вище перемикань ми розробили та запропонували принципову схему силових ланцюгів НУ. Розроблену принципову схему силових кіл НУ представлено на рисунку 3.7.

Схема силових кіл працює наступним чином. Приводні електродвигуни M1 та M2 за допомогою силових контактів контакторів KM1 та KM3 під'єднані через дросель для згладжування L2 до виходу частотного перетворювача (клеми U, V, W розніму XT1 ЧП), а силові контакти контакторів KM2 та KM4 під'єднують двигуни M1 та M2 безпосередньо до мережі із 380 В та 50 Гц. Захист двигунів від перевантажень виконується за допомогою теплових реле FR1 та FR2. Частотний перетворювач під'єднано до мережі через дросель для згладжування L1 (клеми A, B, C розніму XT1 ЧП).

Керування контакторами KM1-KM4 виконується за допомогою релейно-контактної схеми. Перемикач SA1 перемикає режими роботи НУ (ручне керування/автоматичний режим).

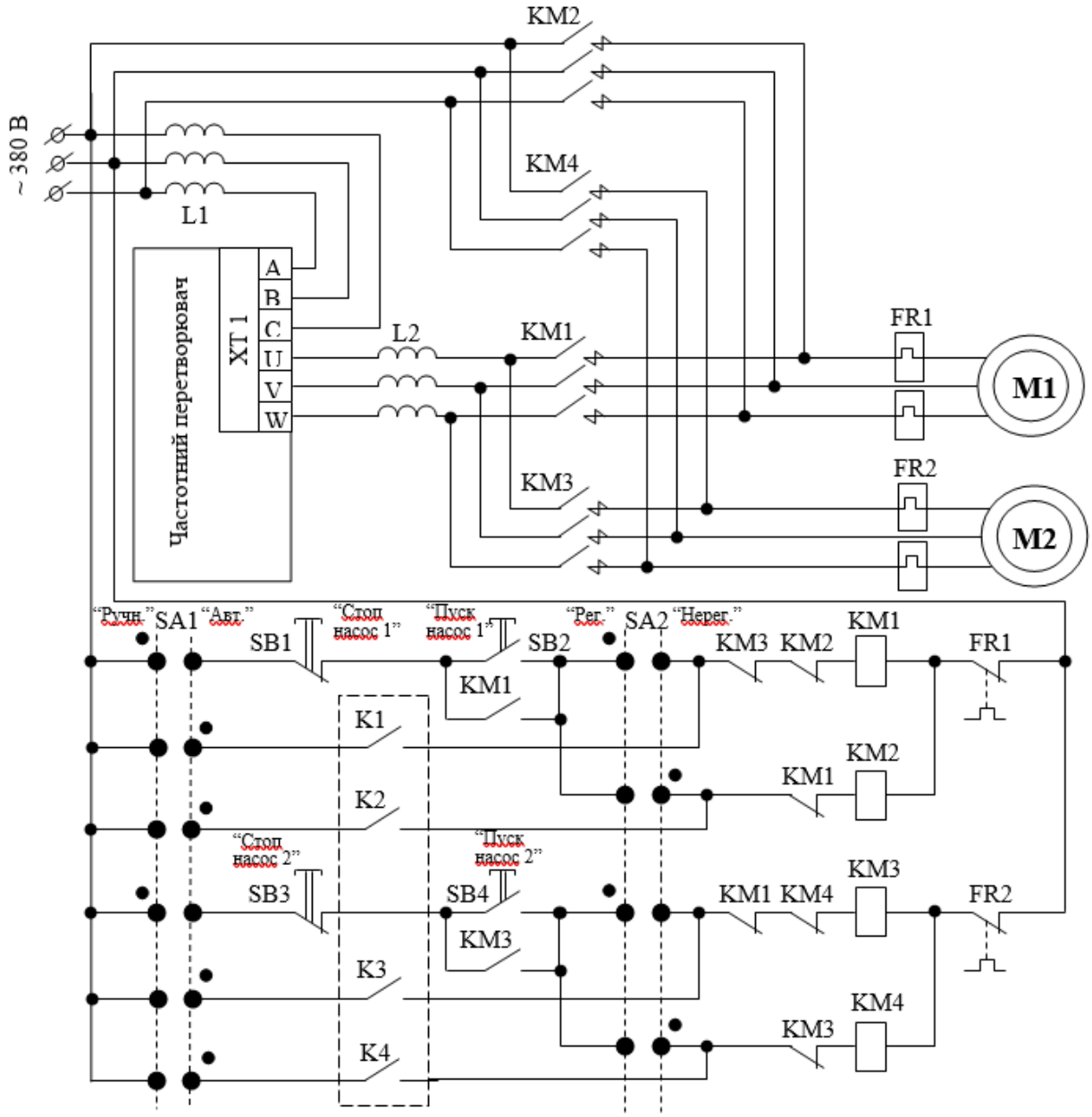


Рисунок 3.7 – Електрична принципова схема силових кіл НУ

При розташуванні перемикача SA1 в положенні "Авт" НУ буде робити в автоматичному режимі, водночас керування контакторами КМ1-КМ4 виконується за допомогою контактів реле К1-К4, які керуються за допомогою ПК. В залежності від команди з ПК (тобто від положення контактів К1-К4) можливо періодично виконувати зміну основного робочого та резервного електродвигунів, а також запуск, за необхідності, резервного електродвигуна від мережі живлення. Приводні електродвигуни можуть робити в наступному

порядку:

- М1 - основний електродвигун (підключений до частотного перетворювача), М2 - резервний (вимкнений);
- М1 - основний електродвигун (під'єднаний до частотного перетворювача), М2 - резервний (під'єднаний до мережі живлення безпосередньо);
- М2 - основний електродвигун (підключений до частотного перетворювача), М1 - резервний (вимкнений);
- М2 - основний електродвигун (під'єднаний до частотного перетворювача), М1 - резервний (під'єднаний до мережі живлення безпосередньо).

Якщо контакт К1 замкнутий (а контакти К2, К3 та К4 - розімкнуті), то електродвигун М1 буде отримувати живлення від частотного перетворювача через контактор КМ1 (тобто робота через замкнуту систему регулювання). У разі збільшення витрати в мережі транспортування до такої межі, що один насос не в змозі підтримувати необхідну величину напору, система буде робити в наступний спосіб (робимо припущення, що робив електродвигун М1): електродвигун М1, що керується за допомогою САР, розганяється до піку, потім ПК створює сигнал на перемикання приводів, контакт К1 розмикається, потім замикається контакт К2 (відповідно, вмикається контактор КМ2) та електродвигун М1 починає робити від мережі живлення на номінальній швидкості, далі замикається контакт К3 та електродвигун М2 починає робити від частотного перетворювача. У разі зменшення величини витрати в мережі транспортування до нормальної границі, розмикається контакт К2, та електродвигун М1 відключається від мережі живлення (розмикається контактор КМ2), а електродвигун М2 продовжує роботу від частотного перетворювача (під безпосереднім керуванням САК), тобто відбувається зміна основного (робочого) на резервний насоси. Така послідовність дій потрібна для того, щоб зменшити динамічний удар у мережі транспортування речовини.

Контактори КМ1 та КМ2, а також КМ3 та КМ4 оснащені взаємним блокуванням, щоб знешкодити можливість їхнього одночасного вмикання, оскільки в іншому разі вийде, що на вихід частотного перетворювача буде подаватись напруга мережі живлення, що є неприпустимим. Також необхідно передбачити блокування від одночасного вмикання електродвигунів М1 та М2 до виходу частотного перетворювача, воно виконується за допомогою допоміжних контактів контакторів КМ1 та КМ3.

Якщо ж перемикач SA1 розташовано в положенні "Ручний", то НУ повинне робити в режимі саме ручного керування. При цьому запуск та зупинка електродвигуна М1 виконується за допомогою кнопок SB2 та SB1 відповідно, а електродвигуна М2 - SB4 та SB3. У режимі ручного керування можливо використовувати два режими роботи САК, які обираються через зміну положення перемикача SA2:

- електродвигун отримує живлення від частотного перетворювача, а регулювання швидкості електродвигуна (або частоти перетворювача) виконується в ручному режимі за допомогою пульта керування частотним перетворювачем (SA2 знаходиться в положенні "Рег.");

- електродвигун безпосередньо під'єднаний до мережі живлення, швидкість електродвигуна не регулюється (SA2 знаходиться в положенні "Нерег.").

Базуючись на розробленій принциповій схемі силових ланцюгів НУ (див. рис. 3.7), з огляду на раніше вибрані складові (електродвигун та частотний перетворювач), перейдемо до підбору елементів силових ланцюгів.

Для виконання перемикань у силових колах ми візьмемо контактори серії КТ64 із комутацією без дуги, з наступними технічними характеристиками [21]:

- номінальна напруга головного кола 380 В, 50 Гц;

- номінальна напруга ланцюга керування 220 В, 50 Гц;

- номінальний струм в головному колі 100 А;

- кількість контактів головного ланцюга - 3 для замикання;

- кількість допоміжних контактів - 2 для розмикання, 2 для замикання.

Для захисту електродвигунів від перевантаження ми візьмемо двополюсні теплові реле серії РТЛ з номінальним (паспортним) струмом ланцюга керування 16 А, номінальною (паспортною) напругою ланцюга керування 380 В та 50 Гц, з границею регулювання уставок $(0{,}16\text{-}1)\cdot I_{ном}$ [21, 22].

Для виконання комутацій у схемі керування візьмемо пакетні перемикачі типу ПВМ-1 на струм 6,3 А, напругу 380 В, і кнопки типу КЕ-202 (для замикання) та КЕ-203 (для розмикання) [23].

## 3.3 Проєктування системи керування електроприводом та розрахунок основних параметрів

### 3.3.1 Функціональна схема електропривода

Базуючись на прийнятих раніше припущеннях про систему електроприводу та виконання її автоматизації ми розробили функціональну схему електроприводу, наведену на рисунку 3.8.

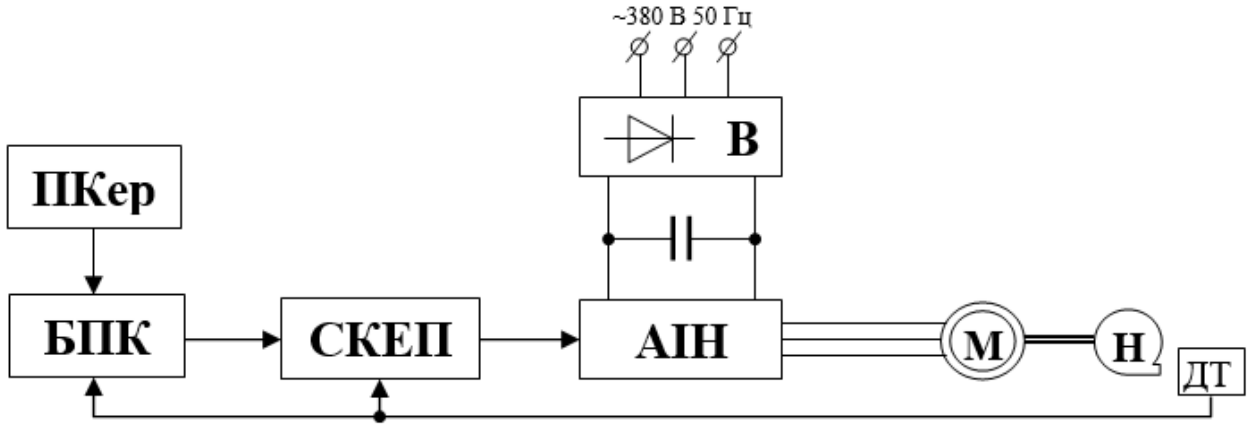


Рисунок 3.8 – Розроблена функціональна схема електроприводу насосу: ПКер – пульт керування; БПК – блок програмного керування; СКЕП – система керування електроприводом; АІН – автономний інвертор напруги; В – випрямляч; М – двигун асинхронний; Н – насос; ДТ – давач тиску в мережі трубопроводу

САК електроприводом насосу, зазвичай, складається із регулятора та об'єкта керування [24, 25]. Під об'єктом керування, як відомо, розуміють сукупність з перетворювача енергії, що живить електродвигун, електродвигуна та робочого органу, тобто нашому варіанті відцентрового насоса, з'єднаного із головним валом двигуна через муфту. Завдання з розрахунку САК даним типом електроприводу буде полягати у виборі, розрахунку та створені регулятора. Регульована величина в цій задачі лише одна - напір речовини в мережі транспортування. Регулятор буде реалізовано в комплектному перетворювачі, який ми обрали для живлення електродвигуна, тому наша задача тільки розрахувати та задати необхідні параметри та тип регулятора.

3.3.2 Математичний опис установки

Рівняння електроприводу при використанні механічної передачі моменту від електродвигуна до робочого органу через муфту матимуть наступний вигляд:

$$M - M_{o} = J_c \cdot \frac{d\omega}{dt}, \tag{3.26}$$

де $M, M_o$ - відповідно моменти електродвигуна та опору, Нм; $J_c$ - сумарний момент інерції електроприводу, кг/м$^2$, приймаємо таким, що дорівнює 1,6 від моменту інерції електродвигуна; $\omega$ - кутова швидкість валу двигуна, рад/с.

Розглянемо НУ для гарячого водопостачання з'єднану з мережею транспортування без статичного напору як об'єкт регулювання напору рідини.

Напір рідини в мережі транспортування визначається з наступного рівняння:

$$H_м = R \cdot Q^2, \tag{3.27}$$

де $H_м$ - напір речовини у мережі транспортування; $Q$ – величина витрата речовини; $R$ - опір у мережі транспортування (функція витрати речовини).

Напір, що створюється насосом у мережу транспортування, визначимо з формули:

$$H_н = H_0 \cdot \omega^{*2} - C \cdot Q^2, \tag{3.28}$$

де $H_0$ - напір речовини при закритій засувці; $\omega^*$ - відносна швидкість обертання валу насоса; $C$ - поправочний коефіцієнт; $Q$ - величина витрати речовини.

Регульованою величиною в мережі транспортування є напір речовини, який будуть регулювати шляхом збільшення величини подачі насоса. Мережу транспортування без статичного напору можна зобразити у вигляді аперіодичної ланки із передаточним коефіцієнтом, що рівний зворотному значенню опору мережі транспортування, і з відносно великою постійною часу (близько 0,5 с). Значить в якості вхідної величини запропонованої ланки (об'єкта) буде натиск у мережі транспортування, а вихідною - подача насоса в мережу транспортування.

### 3.3.3 Розробка структурної схеми та розрахунок необхідних параметрів

Структурна схема системи стабілізації величини напору речовини.

Використавши математичний опис технологічного об'єкту, ми можемо розробити структурну схему системи стабілізації напору, наведену на рисунку 3.9.

Блок СКЕП (система керування електроприводом) складається із двигуна та комплектного перетворювача. Дана структурна схема моделює математичний опис об'єкта керування (насоса, приєднаного до мережі транспортування речовини без статичної складової напору). Залежність $H_H(Q^2;\omega)$ матиме вигляд формули 3.28, а залежність $M(Q;\omega)$ буде визначено під час аналізу

навантажувальних діаграм. Постійну часу мережі $T_c$ буде прийнято рівним 0,5 с [1, 24, 25]. Аперіодична ланка, яка володіє постійною часу $T_0$ допоможе змоделювати різкі скачки тиску через нерівномірність викиду речовини насосом, тиму ми приймемо постійну часу $T_0 = 0,01$ с.

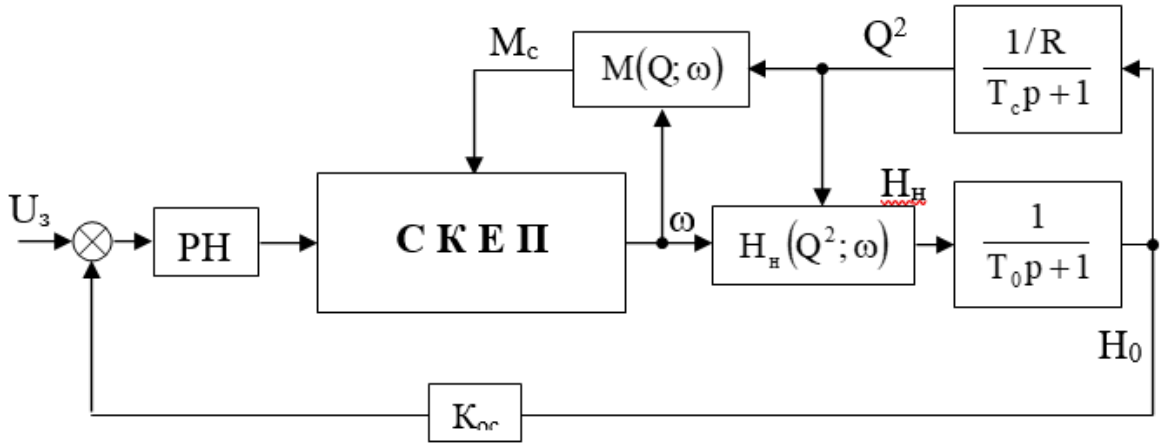


Рисунок 3.9 – Розроблена структурна схема системи стабілізації напору речовини

Коефіцієнт зворотного зв'язку за напором $K_{ос}$ будемо знаходити із формули [24, 25]:

$$K_{ос} = \frac{U_{з\max}}{H_{\max}}, \tag{3.29}$$

де $H_{\max}$ - максимальний напір у мережі транспортування речовини ($H_{\max} = 25$ м); $U_{з\max}$ - максимальна задаюча напруга, $U_{з\max} = 10$ В.

Звідки:

$$K_{ос} = \frac{10}{25} = 0,4 \ \frac{\text{м}}{\text{В}}.$$

Розробка структурної схеми системи керування електроприводом

Відповідно до базового рівняння всього електроприводу та розробленої функціональної схеми електропривода (див. рис. 3.9) створимо структурну схему системи керування всім електроприводом. Запропонована структурна схема наведена на рисунку 3.10.

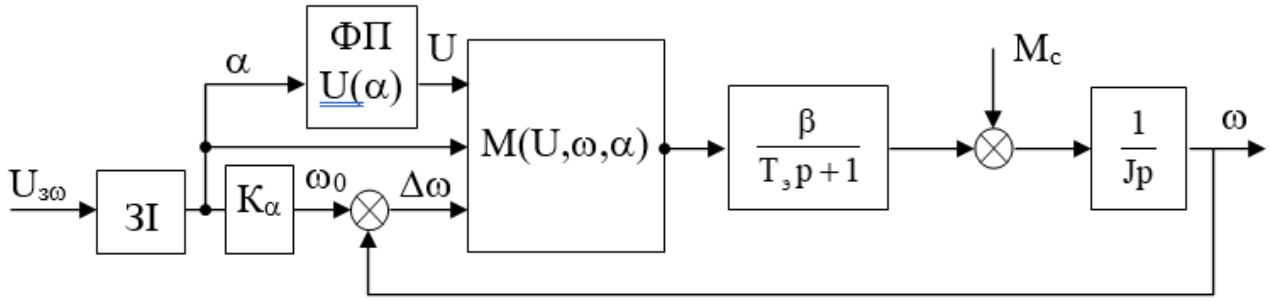


Рисунок 3.10 – Розроблена структурна схема керування електроприводом

Дана структурна схема моделює математичний опис системи керування електроприводом, побудованої за принципом ЧП-АД КЗР.

Задавач інтенсивності ЗІ моделюється за допомогою аперіодичної ланки із досить великою постійною часу $\tau_{ЗІ}$. Постійну часу $\tau_{ЗІ}$ із технологічних міркувань (для зниження гідравлічних ударів в мережі транспортування) будемо приймати на рівні $\tau_{ЗІ} = 10$ с [1, 24, 25].

Функціональний перетворювач ФП використовується для перетворення завдання відносної частоти $\alpha$ в напругу живлення $U$, із використанням заданої форми кривої розгону. Аналітично розрахуємо форму кривої розгону, базуючись на постійності перевантажувальної здатності в усьому діапазоні керування тому ми приймаємо перевантажувальну здатність $2{,}2$. Побудуємо суміщену графічну залежність природної механічної характеристики двигуна від механічної характеристики насоса не враховуючи перевантажувальну здатність, а потім з її урахуванням. Цю графічну залежність представлено на рисунку 3.11.

З графічної залежності (рис. 3.11) обираємо три точки на механічній характеристиці насоса із урахуванням перевантажувальної здатності, за якими будемо виконувати апроксимацію кривої прямими лініями. Для даних точок

знаходимо $M$ та $\omega$. Оскільки система керування електроприводом, реалізована саме в комплектному перетворювачі та може забезпечити програмне формування залежності $U(f)$, тоді при постійній частоті, а також за постійної напруги, механічні характеристики можливо буде апроксимувати за допомогою прямих ліній [11].

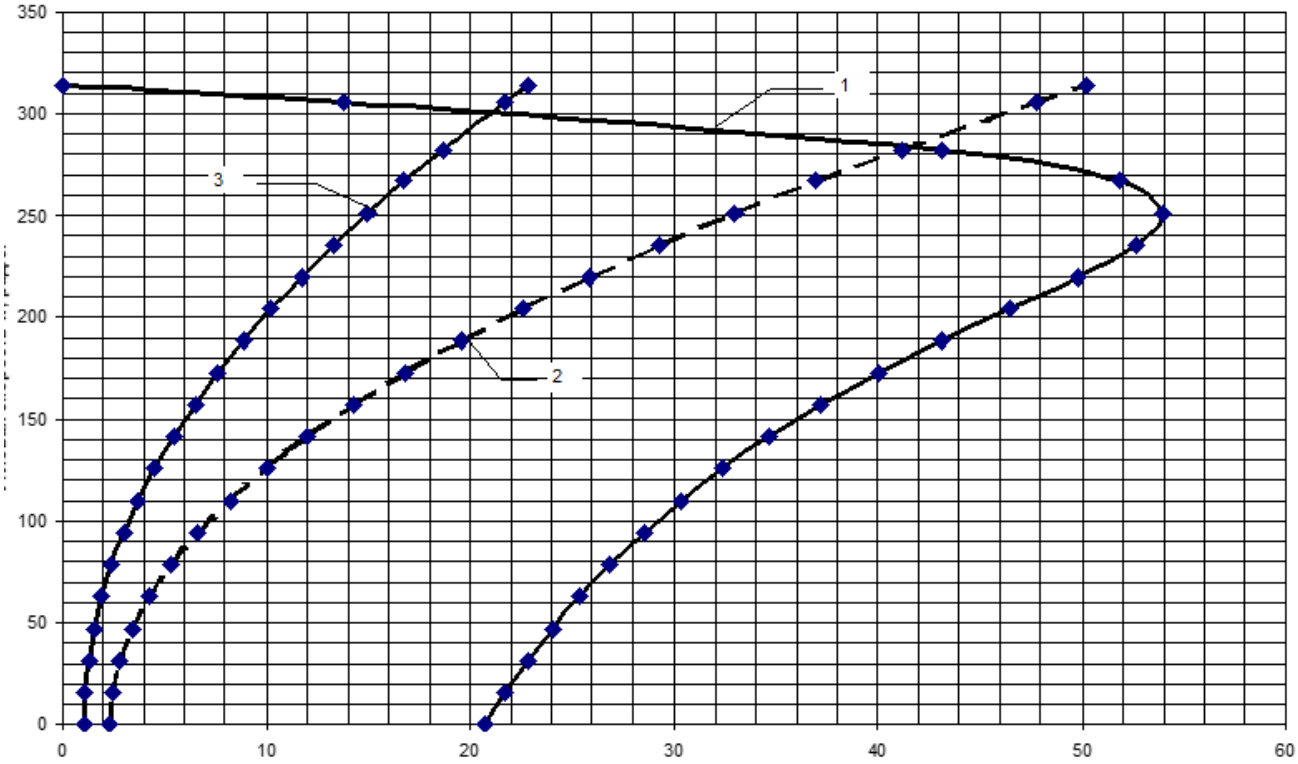


Рисунок 3.11 – Графічна залежність суміщених механічних характеристик електродвигуна та насоса:

1 – механічна характеристика електродвигуна; 2 – механічна характеристика насоса; 3 – механічна характеристика насоса, з врахуванням здатності до перевантаження, рівній $2,2$

Жорсткість характеристик у даному випадку розрахуємо за механічною характеристикою електродвигуна [11]:

$$\beta = \frac{M_{ном}}{\omega_{0н} \cdot s_н}, \tag{3.30}$$

де $M_{ном}$ - номінальний момент електродвигуна; $\omega_{0н}$ - синхронна частота обертання; $s_н$ - величина номінального ковзання. Знаючи момент та швидкість для будь-якої із обраних точок, застосовуючи розраховану жорсткість характеристик, можливо визначити синхронну частоту для характеристики електродвигуна, що проходить через обрану точку:

$$\omega_0 = \omega + \frac{M}{\beta}, \tag{3.31}$$

де $\omega, M$ – відповідно швидкість та момент за графічною залежністю (рис. 3.11).

$$\beta = \frac{24,523}{314 \cdot 0,026} = 3.$$

Для обраних точок ми визначимо напругу живлення електродвигуна, що буде відповідати розрахованим швидкостям та моментам. Напругу живлення знайдемо за наступною формулою:

$$U_Ф = \sqrt{\frac{M_k \cdot 2 \cdot \omega_0 \cdot \left(R_1 + \sqrt{R_1^2 + \alpha^2 \cdot X_k^2}\right)}{3}}, \tag{3.32}$$

де $M_k$ – крутний момент, що відповідає обраній точці, $\alpha$ - частота напруги живлення, яку можна знайти із наступної формули:

$$\alpha = \frac{\omega_0}{\omega_{0н}}, \tag{3.33}$$

де $\omega_0$ - синхронна частота, що відповідає механічній характеристиці

електродвигуна, яка проходить через обрану точку; $\omega_{0н}$ - номінальна (паспортна) синхронна частота електродвигуна.

Дані, визначені з графічної залежності (координати вибраних точок), а також розраховані відповідно до формул 3.30-3.31 представимо в табличному вигляді 3.1.

Таблиця 3.1 – Розрахункові дані для апроксимування кривих

| № точки | $\omega$, рад/с | $\omega_0$, рад/с | $M$, Н·м | $\alpha$, в.о. | $U_ф$, В |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 94,2 | 96,42 | 6,66 | 0,307 | 29,26 |
| 2 | 204,1 | 211,63 | 22,59 | 0,674 | 101,62 |
| 3 | 305,836 | 314 | 47,78 | 1 | 220 |

Побудована відповідно до табличних даних (табл. 3.1), крива розгону та її апроксимоване зображення наведене на рисунку 3.12. З рисунку зрозуміло, що крива розгону параболічної форми, тобто має місце саме квадратична залежність $U(f)$. Такий закон регулювання надасть можливість знизити втрати в статорі елетродвигуна, що в свою чергу дозволить знизити загальної витрати енергії. Апроксимована крива бере свій початок не з точки із координатами $0;0$, для того щоб підвищити пускову напругу, а значить, отримати вищий пусковий момент.

Блок $M(U,\omega,\alpha)$ виконує обрахунок моменту електродвигуна та суміжних величин (наприклад, критичного моменту та критичного ковзання) в залежності від напруги живлення електродвигуна, частоти напруги живлення та швидкості електродвигуна. Обчислення моменту виконується відповідно до формули Клосса (3.34), обчислення критичного моменту відповідно до формули 3.35, обрахунок критичного ковзання - за формулою 3.36 [24, 25].

$$M = \frac{2M_к(1+as_к)}{s/s_к + s_к/s + 2as_к}; \qquad (3.34)$$

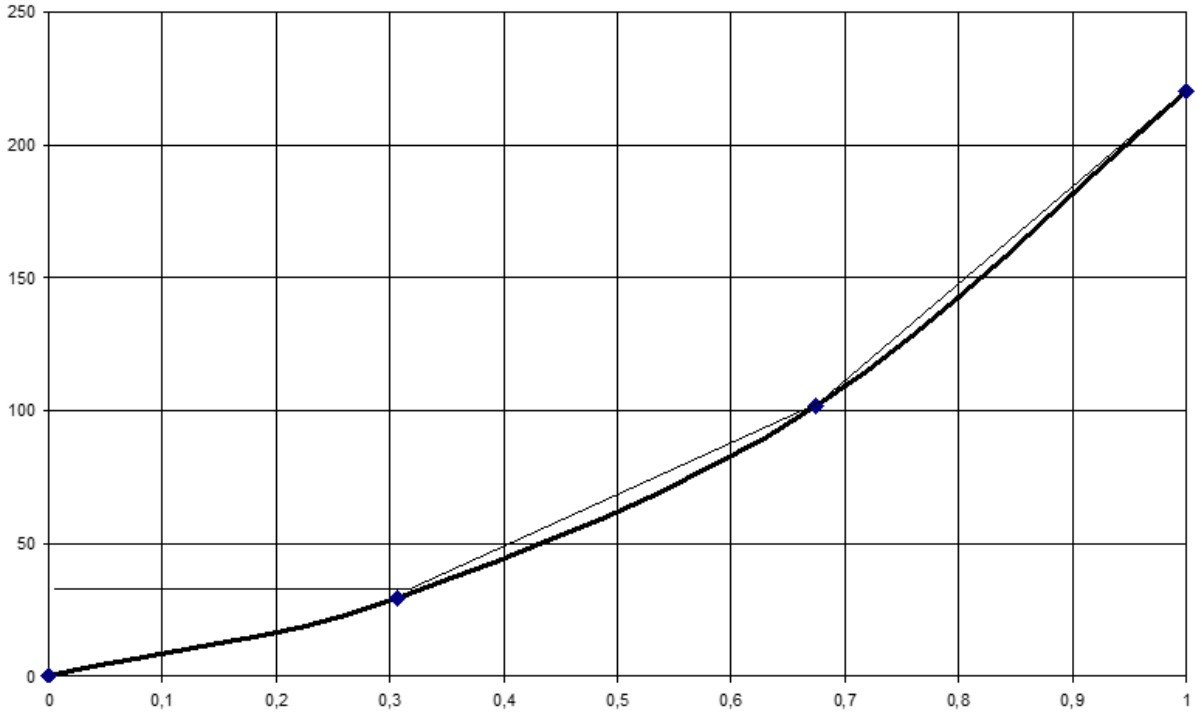


Рисунок 3.12 – Графічне зображення кривої розгону та її апроксимації

$$M_к = \frac{3U_ф^2}{2\omega_0\left(R_1^2 + \sqrt{R_1^2 + \alpha^2 X_к^2}\right)}; \tag{3.35}$$

$$s_к = \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + \alpha^2 X_к^2}}, \tag{3.36}$$

де $\omega_0$ - синхронна частота, яка визначається з наступної формули $\omega_0 = \alpha \cdot \omega_{0н}$; $\alpha$ - відносна частота; $a$ - коефіцієнт, який визначається з формули $a = R_1 / R_2'$.

Аперіодична ланка із постійною часу $T_e$ повинна враховувати електромагнітні властивості електродвигуна, величина рівна $T_e = 0{,}122$ с.

Лінеаризація структурної схеми та налаштування регулятора [24, 25].

Базуючись на структурних схемах системи стабілізації напору (див. рис. 3.9) і системи керування електроприводом (див. рис. 3.10) можливо побудувати

загальну дещо спрощену структурну схему електропривода, наведену на рис. 3.13.

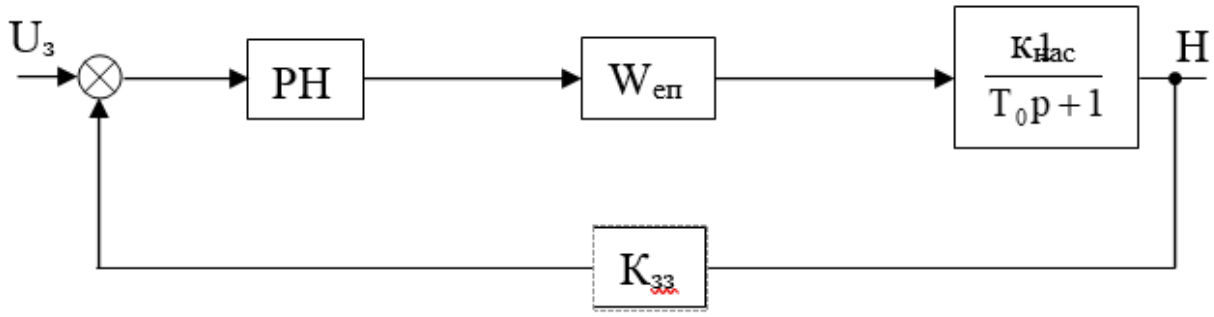


Рисунок 3.13 – Структурна схема електропривода (спрощена)

Коефіцієнт передачі $k_{нас}$ знайдемо згідно формули:

$$k_{нас} = \frac{H_н}{\omega_н}, \tag{3.37}$$

де $H_н$ - номінальний напір у мережі транспортування; $\omega_н$ - номінальна швидкість насоса.

$$k_{нас} = \frac{20}{303,53} = 0,0659.$$

Коефіцієнт зворотного зв'язку за напором $k_{зз}$ буде дорівнює $0,4$ м/В.

Передаточну функцію електропривода $W_{en}$, базуючись зі структурної схеми СКЕП, можливо описати у наступному вигляді:

$$W_{en} = \frac{k_{en}}{\tau_i p + 1}, \tag{3.38}$$

де $\tau_i$ - постійна часу задавача інтенсивності; $k_{en} = \omega_{\max} / U_{з\max} = 30,6$.

Дійсно, електромагнітна постійна часу електродвигуна $T_e = 0{,}122$ с є занадто малою порівняно із постійною часу задавача інтенсивності $\tau_i = 10$ с, і нею можливо знехтувати. Отже, нехтуючи електромагнітною постійною часу електродвигуна $T_e$, ми визначаємо, що запропонована структурна схема САК електроприводом містить лише одну аперіодичну ланку - задавач інтенсивності, а її постійна часу буде визначати інерційні властивості САК електроприводом.

Постійна ж часу мережі транспортування $T_0$, також занадто мала порівняно із $\tau_i$ (і приймається рівною $0{,}005$ с), отже нею також можливо знехтувати. Тому ми отримуємо контур регулювання, що складається із однієї аперіодичної ланки, з постійною часу, рівною постійній часу задавача інтенсивності $\tau_i = 10$ с.

Базовим регулятором для такого контуру регулювання є І-регулятор, виконаємо необхідні налаштування на технічний оптимум [24, 25]:

$$W_{РН} \cdot \kappa_{еп} \cdot \kappa_{нас} \cdot \kappa_{зз} = \frac{1}{2\tau_i p}; \tag{3.39}$$

$$W_{РН} = \frac{1}{2\tau_i p \cdot \kappa_{еп} \cdot \kappa_{нас} \cdot \kappa_{зз}}. \tag{3.40}$$

Підставивши у формулу 3.40 необхідні коефіцієнти, ми отримаємо $W_{РН} = \frac{1}{2\tau_i p}$. Таким чином регулятор величини напору представляє собою І-регулятор із постійною часу $T_{РН}$, що дорівнює двом постійним часу задавача інтенсивності $\tau_i$, або $T_{РН} = 20$ с.

## 3.4 Побудова статичних характеристик

Механічні характеристики для частотного керування асинхронним

електродвигуном згідно закону $U \sim f^2$ побудуємо за допомогою формули Клосса (3.34), одночасно визначаючи потрібні критичні момент та ковзання згідно формул 3.35 та 3.36. Формула Клосса для асинхронного електродвигуна із КЗР виконується лише для ковзань, які не є вищими за критичні, але якщо врахувати, що нижче за критичне ковзання знаходиться неробоча гілка механічної характеристики, ми виконаємо побудову характеристики, починаючи саме із критичного ковзання [24, 25].

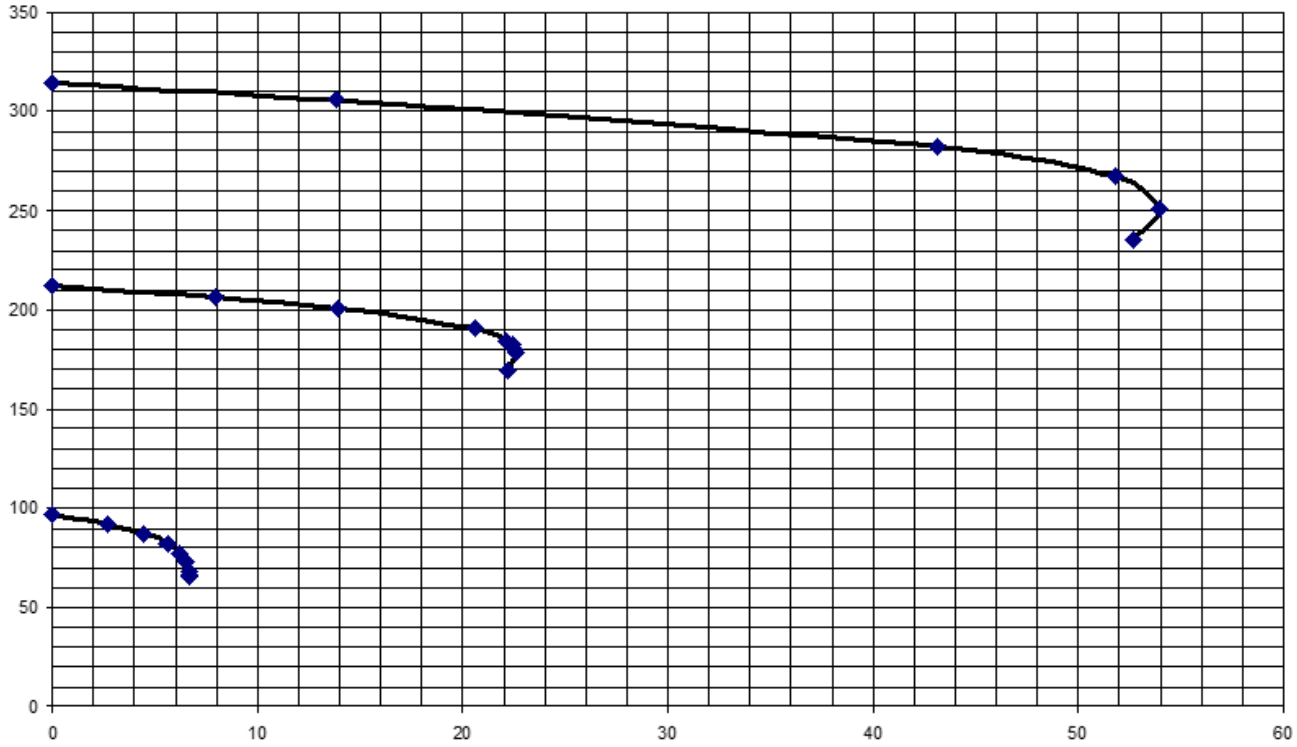


Рисунок 3.14 – Графічне зображення статичних характеристик електродвигуна

Як уже зазначалося, САК електроприводом, створена за допомогою комплектного перетворювача, що забезпечує програмне формування залежності напруги живлення електродвигуна від частоти напруги живлення, тому якщо частота є постійною, а значить, і напруга теж постійна, механічні характеристики електроприводу можуть бути апроксимовані з використанням прямих ліній. Отже, для уявлення про статичні характеристики цілком достатньо побудувати лише три характеристики – 1 природну та 2 штучні, що проходять через точки, наведені в табличних даних (див. табл. 3.1) [24, 25].

Розрахунок низки механічних характеристик електропривода, згідно з формулами 3.34-3.36 для ковзань, що не є вищими за критичні, виконаємо за допомогою пакету програм, а отримані в результаті розрахунку статичні характеристики наведено на рисунку 3.14.

## 3.5 Аналіз динамічних характеристик електропривода НУ

Для аналітичного аналізу динамічних характеристик САК електроприводом НУ використаємо математичне моделювання системи електроприводу на ЕОМ у програмному середовищі SIMULINK в пакеті MATLAB [26, 27].

Перш ніж розпочати аналітичні дослідження необхідно визначити головну мету нашого моделювання. Головною метою проведення моделювання є прогнозування динамічних характеристик реальної системи НУ, наприклад, для гарячого водопостачання за властивих системі зовнішніх впливів.

Базуючись на поставленому завдані, модель системи повинна враховувати або нехтувати деякими особливостями динаміки, які мають місце в реальній системі. Наприклад, ми будемо розглядати НУ як об'єкт регулювання величини напору речовини (не враховуючи величину зовнішніх впливів). Вибір вхідних задаючих впливів та початкових умов напряму буде залежати від призначення проєктованої системи та режимів її роботи, які будуть найчастіше застосовуватись.

Специфіка моделювання САК базується на тому, що будь-яка САК складається із різної кількості динамічних ланок, що взаємодіють одна з одною. До неї можуть бути прикладені зовнішні збурення, що є змінними в часі. Отже, може бути аналітично досліджено динамічний режим будь-якої САК, якщо є засоби, що моделюють динаміку імпульсних та безперервних, нелінійних та лінійних динамічних ланок, а також будь-яких довільних вхідних впливів.

Відповідно до структурної схеми нашої системи (див. рис. 3.9) ми

складемо математичну модель для програмного середовища SIMULINK пакету MATLAB, схема даної моделі буде наведена на рисунку 3.15 [26, 27].

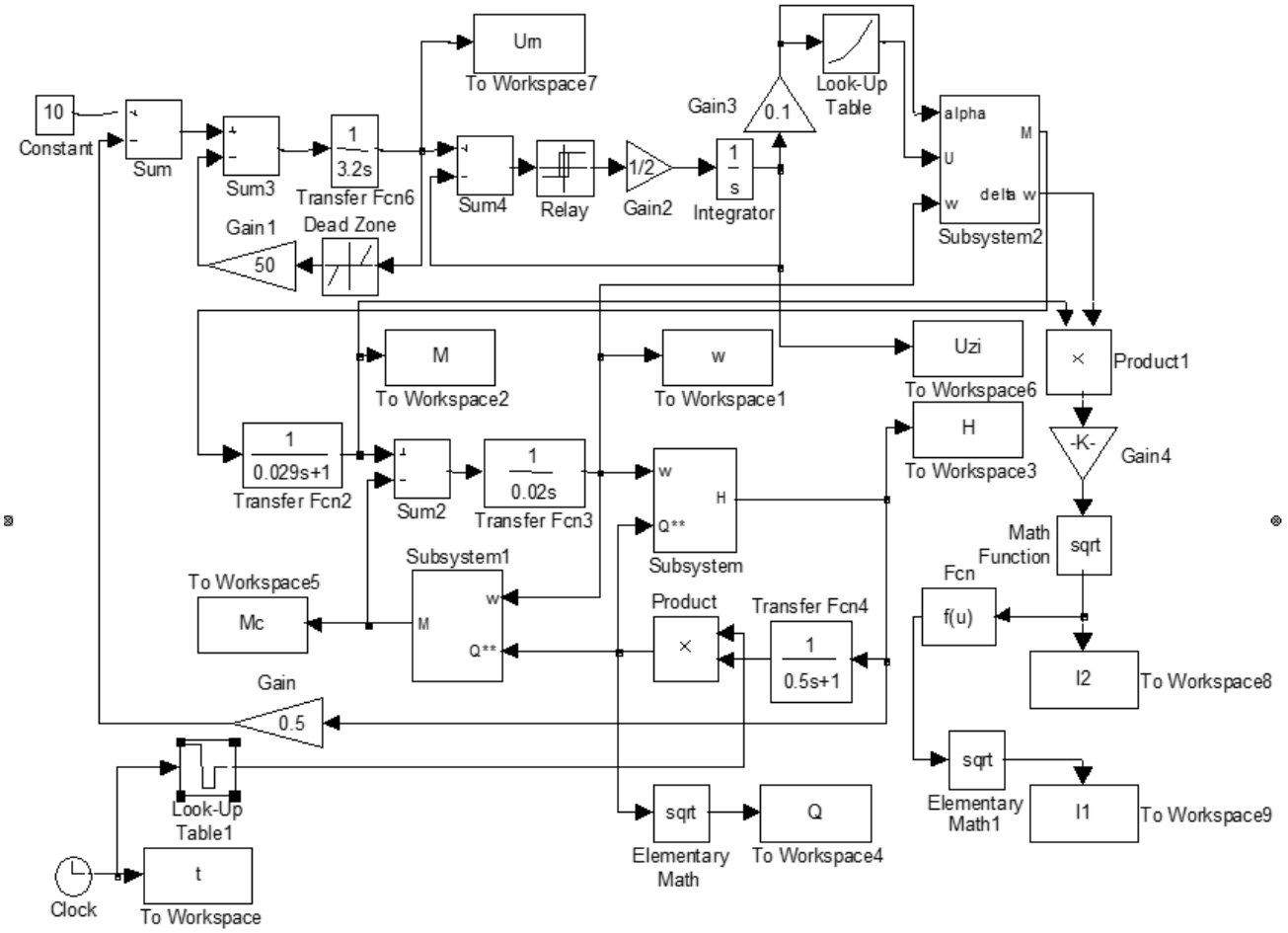


Рисунок 3.15 – Схема моделювання роботи електроприводу НУ

У результаті моделювання було отримано графічні залежності перехідних процесів вихідної напруги регулятора напору, задавача інтенсивності; струму статора двигуна та наведеного струму ротора; моменту та швидкості електродвигуна; моменту статичного; напору у мережі транспортування та величини витрати речовини через мережу транспортування. Дані графічні залежності перехідних процесів отримано для двох режимів роботи НУ - під час запуску НУ та під час налаштування величини напору за зміною споживання речовини із мережі транспортування. Отримані в результаті моделювання графічні залежності перехідних процесів наведено на рисунках 3.16 – 3.22 [26-27].

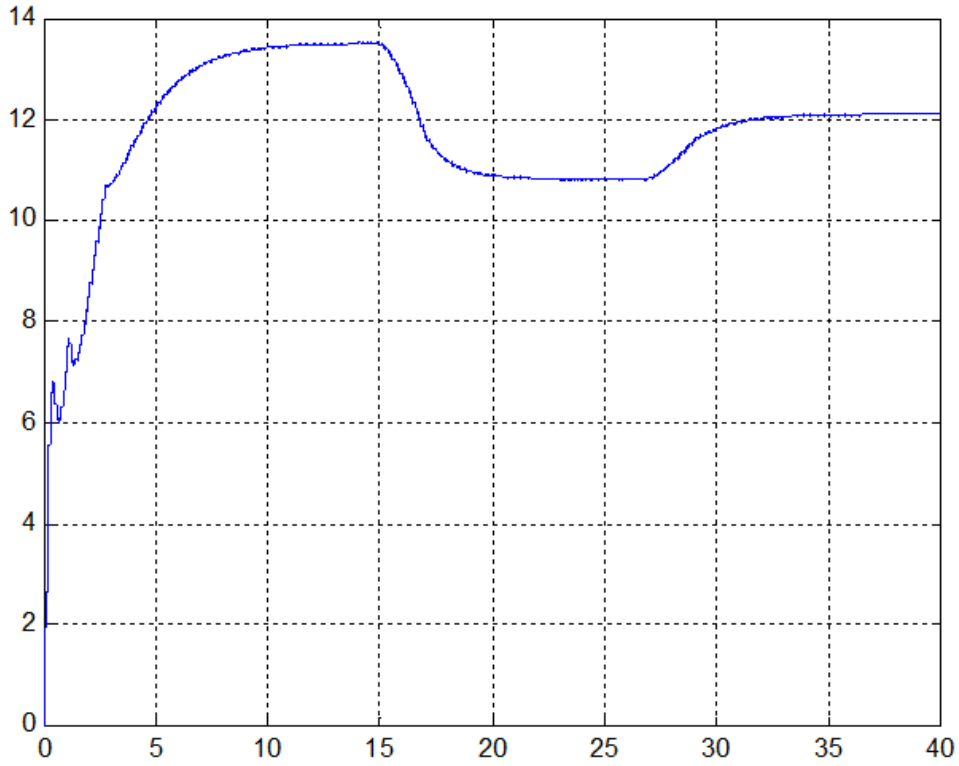


Рисунок 3.16 – Графічна залежність перехідного процесу струму на роторі електродвигуна

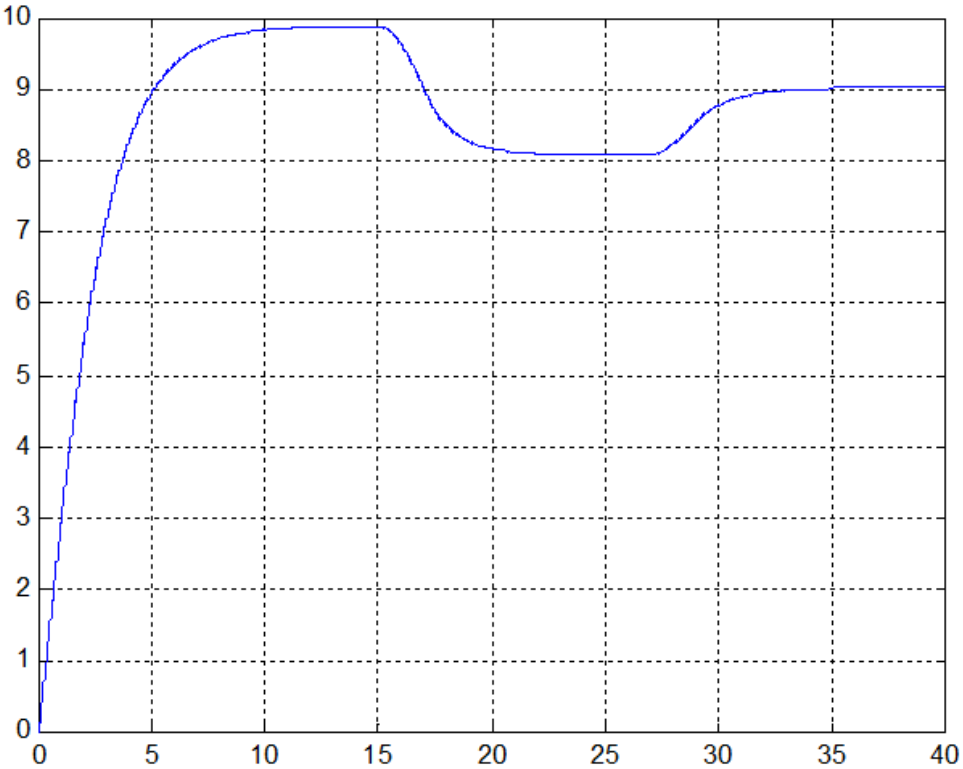


Рисунок 3.17 – Графічна залежність перехідного процесу напруги задавача інтенсивності

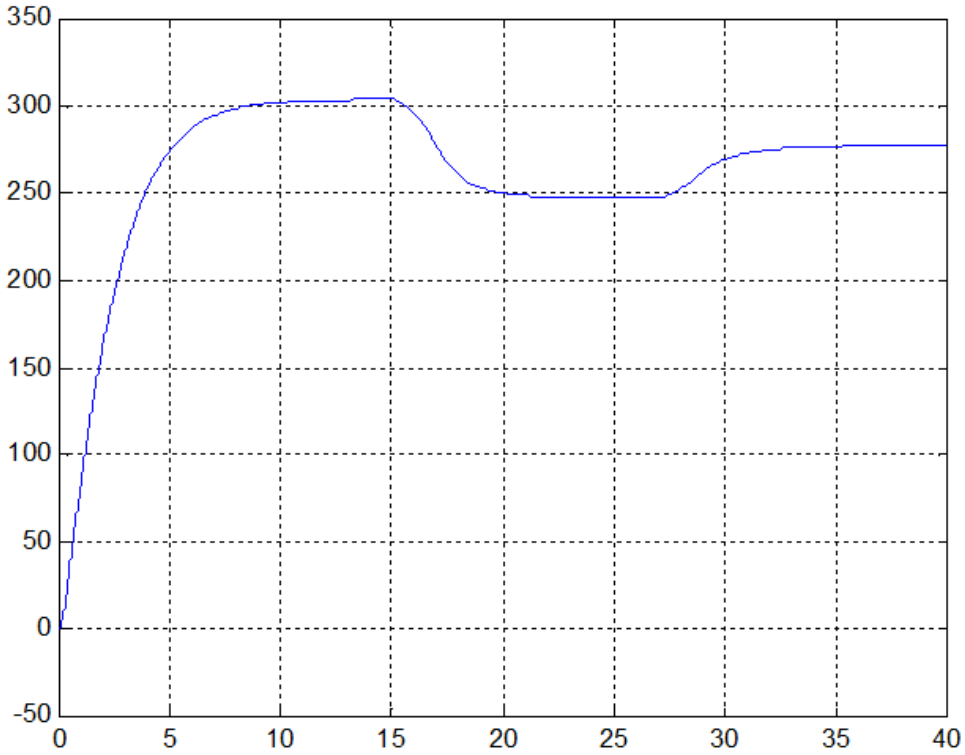


Рисунок 3.18 – Графічна залежність перехідного процесу швидкості електродвигуна

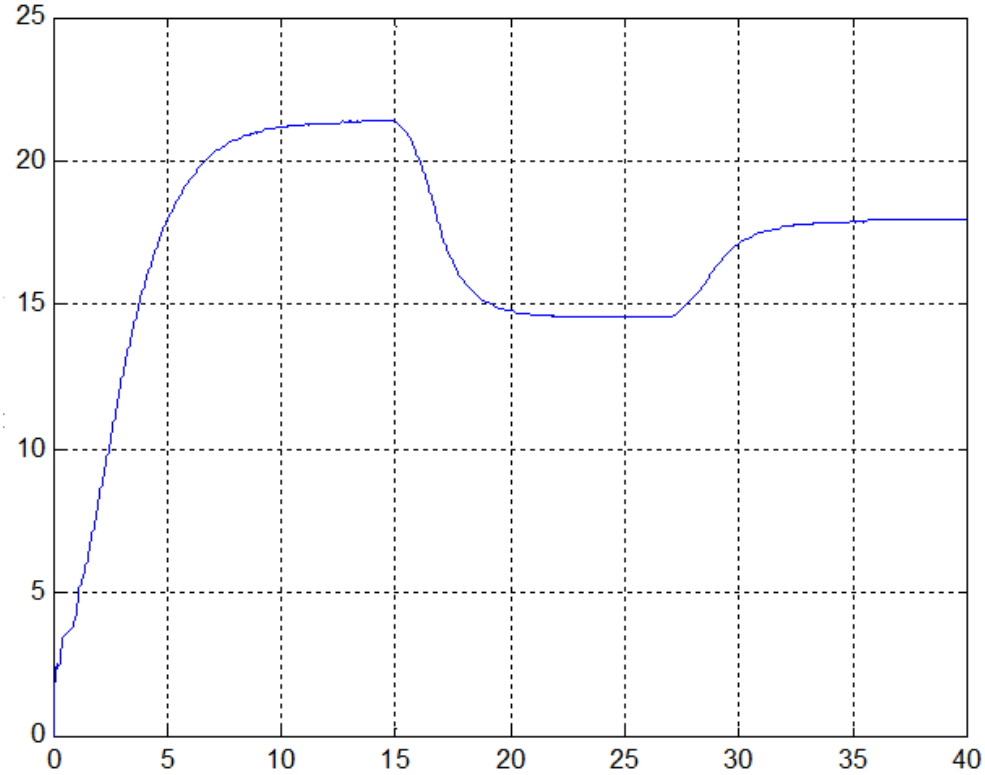


Рисунок 3.19 – Графічна залежність перехідного процесу моменту електродвигуна

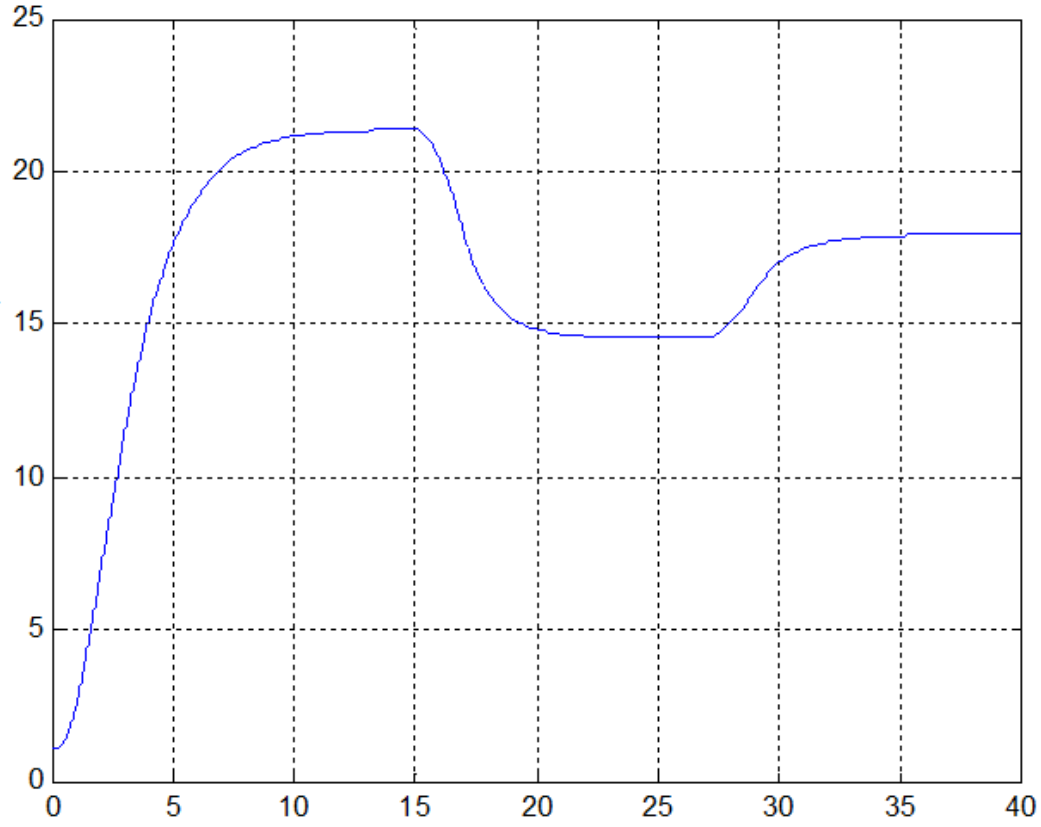


Рисунок 3.20 – Графічна залежність перехідного процесу статичного моменту електродвигуна

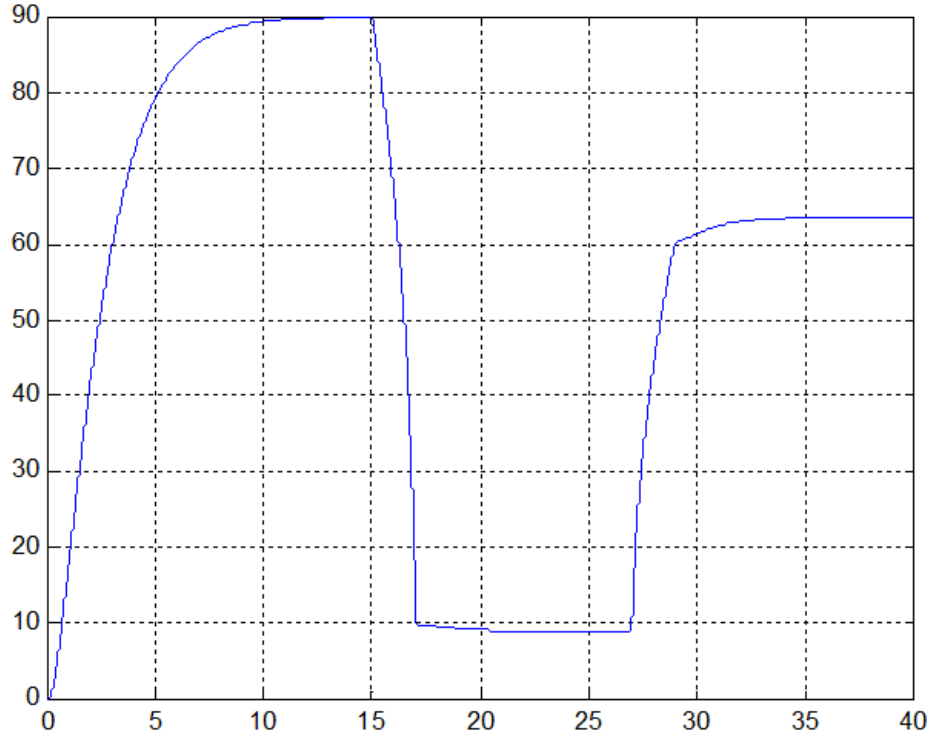


Рисунок 3.21 – Графічна залежність перехідного процесу величини розходу речовини

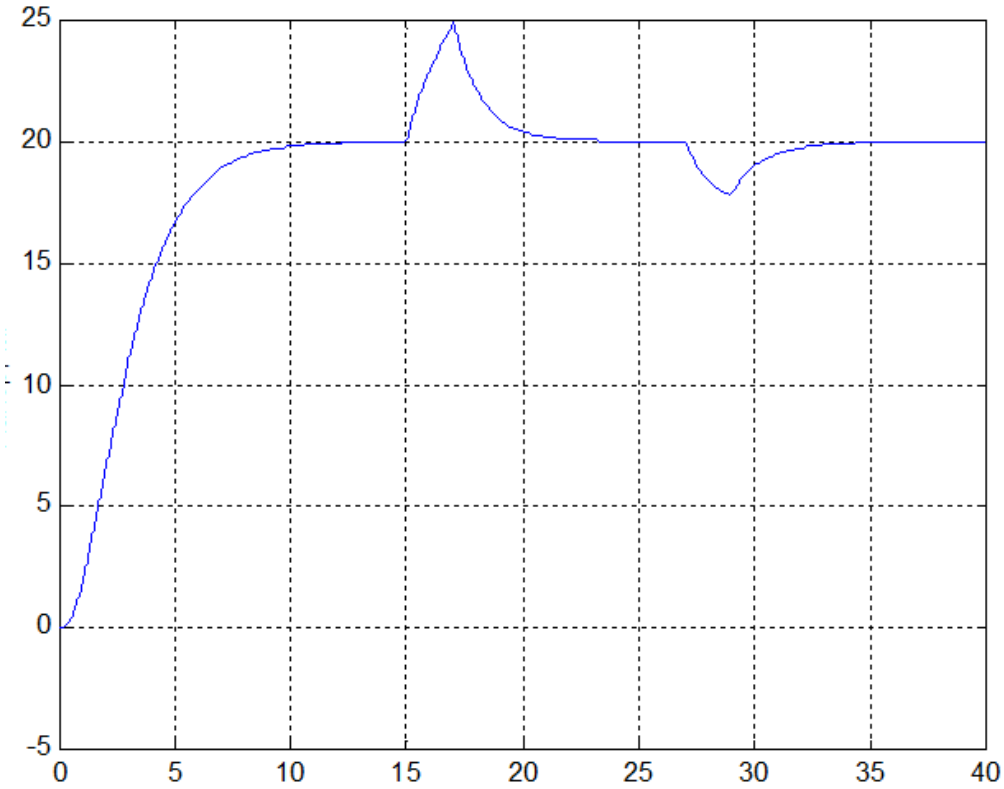


Рисунок 3.22 – Графічна залежність перехідного процесу величини напору речовини в мережі

Аналіз графічних залежностей перехідних процесів (рис. 3.16-3.22) показує, що запропонована САК електроприводом НУ повністю відповідає сформульованим у першому розділі вимогам. Час установлення необхідного тиску в системі, наприклад гарячого водопостачання, становитиме не більше 10 с.

## 3.6 Проєктування схеми електропостачання та захисту НУ

### 3.6.1 Проєктування схеми електропостачання та захисту НУ

Установка буде отримувати електроенергією від центрального розподільного щита трансформаторної підстанції (ТП). Повітряна або кабельна лінія від центрального розподільного щита ТП буде приходити на силовий розподільний щит НУ, до якого за допомогою автоматичних вимикачів під'єднано силові агрегати НУ. Схема електропостачання проєктованої НУ

представлена на рисунку 3.23 [28].

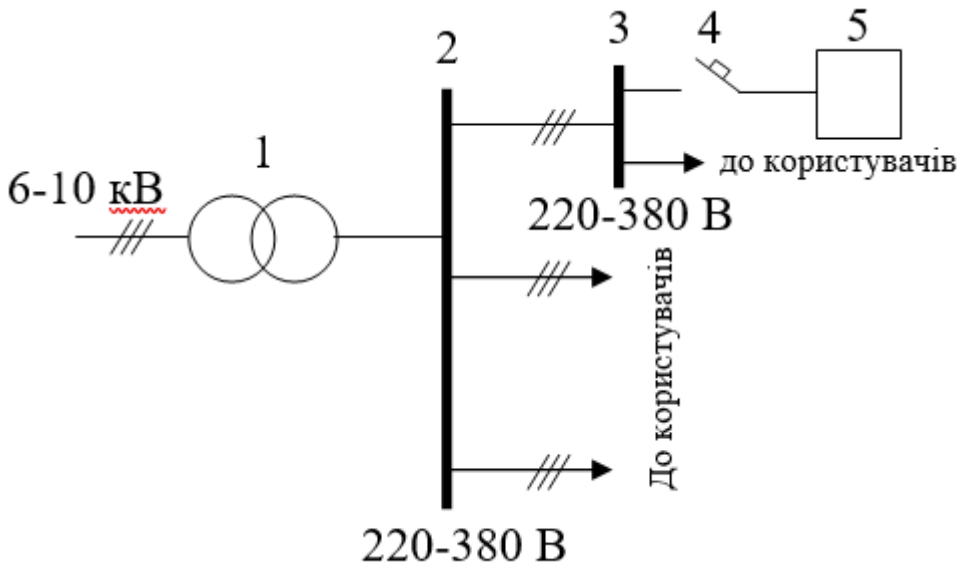


Рисунок 3.23 – Запропонована схема електропостачання НУ:
1 – трансформаторна підстанція (ТП); 2 – центральний розподільчий щит ТП;
3 – силовий розподільчий щит; 4 – автоматичний вимикач; 5 - НУ

3.6.2 Підбір апаратного устаткування та кабелів

Вибір автоматичного вимикача та кабелю для живлення виконаємо відповідно до стандартної методики [28]. Необхідно визначити номінальні струми для розмикачів автоматичних вимикачів та правильно підібрати переріз дротів та кабелю згідно із умовами нагрівання та у відповідності до струмів розмикачів.

Для автоматичного вимикача, що захищає НУ від перевантаження, або нагрівального елемента теплового реле магнітного пускача номінальний струм теплового розмикання завжди обирають тільки відповідно до тривалого розрахункового струму лінії $I_{довг}$ [28]:

$$I_{тр} > I_{довг}, \tag{3.41}$$

де $I_{довг} = I_{н\ дв} = 15$ А ($I_{н\ дв}$ - номінальний струм електродвигуна).

Вибираємо автоматичний вимикач із комбінованим розмикакчем типу А3710Б на 40А .

Номінальний струм електромагнітного $I_{ел}$ або комбінованого розмикача автоматичних вимикачів також підбирають саме за тривалим розрахунковим струмом лінії за наступною формулою:

$$I_{ел} > I_{довг}, \tag{3.42}$$

Вибираємо розмикач із номінальним струмом 25 А .

Струм спрацьовування (відсічення) електромагнітного або комбінованого розмикача $I_{ср.ел}$ необхідно перевірити за максимальним короткочасним струмом лінії $I_{кор}$ :

$$I_{ср.ел} > 1,25 I_{кор}. \tag{3.43}$$

Для відгалуження до одиночно встановленого електродвигуна максимальний короткочасний струм лінії повинен дорівнювати пусковому струму електродвигуна $I_{п} = 112,5$ А , тоді:

$$I_{ср.ел} > 1,25 \cdot 112,5 = 140,6 \text{ А}. \tag{3.44}$$

Вибираємо розмикач із струмом миттєвого спрацьовування 150 А та номінальним струмом 25 А .

Необхідно встановити неможливість спрацьовування автомата під час запуску електродвигуна за формулою (3.44): $150 > 140,6$ .

Для того, щоб відбувався захист НУ, потрібно, щоб час спрацьовування автоматичного вимикача був значно нижчим за час протікання максимального (пікового) струму через частотний перетворювач [28].

Отже, ми підбираємо автоматичний вимикач типу А3710Б на 40А , з

комбінованим розмикачем на струм миттєвого спрацьовування 150 А та номінальний струм 25 А, а час спрацьовування захисту не повинен перевищувати 0,05 с.

Перетин жил кабелю, що використовується для живлення НУ, розраховуємо, виходячи із економічної щільності струму $j = 4$ А/мм$^2$, за формулою:

$$S = \frac{I_{н.дв}}{j}, \tag{3.45}$$

звідки

$$S = \frac{15}{4} = 3,75 \text{ мм}^2.$$

Отже, підбираємо трижильний кабель із паперовою просоченою ізоляцією із алюмінієвими жилами, наступної марки - ААШВ із перетином жили 6 мм$^2$, що може прокладатись в трубі.

Перевірку обраної марки проводу виконаємо відносно тривалого струму навантаження $I_{дов}$, виходячи з наступної умови:

$$I_{доп} > \frac{I_{дов}}{k_т \cdot k_п}, \tag{3.46}$$

де $k_п$ - поправочний коефіцієнт, що враховує кількість спільно прокладених кабелів; $k_т$ - коефіцієнт, що враховує температуру навколишнього середовища.

Так як в більшості випадків температура повітря в приміщенні дорівнює $20^\circ C$, то поправочний коефіцієнт за температурою приймається - $k_т = 0,88$.

Так як в трубу ми прокладемо лише один кабель, то поправочний коефіцієнт дорівнюватиме $k_n = 1$, тоді умова (3.46) набуде наступного вигляду:

$$I_{доп} > \frac{I_{дов}}{k_m}, \tag{3.47}$$

отже, $I_{доп} > \frac{15}{0,88} = 17$ А.

Для обраного раніше кабелю ААШВ із перетином жили 6 мм$^2$, допустиме струмове навантаження буде рівним 55 А [28].

3.6.3 Налаштування та діагностика електроприводу НУ

Налаштування (пусконалагоджувальні роботи) - це комплекс робіт із запуску, випробування та доведення засобів автоматизації та обладнання до режиму нормальної роботи системи. Такі види роботи повинні забезпечити безперебійну та безумовно надійну дію САК під час виконання ними функцій контролю, керування та регулювання об'єктів керування в режимах, які задані або проєктом або відповідними службами експлуатації підприємства [29, 30].

Як відомо експлуатація - це сукупність підготовки та застосування САК за призначенням, технічного обслуговування, відповідного зберігання та, за необхідності, транспортування.

Підготовку та експлуатацію засобів, приладів та всієї САК в цілому, слід починати одночасно із монтажними роботами зі встановлення цих засобів згідно з технічним проєктом. Загальне спостереження за ходом та якістю виконання монтажних робіт та їх приймання повинні бути доручені представникам служби експлуатації підприємства. Така спільна робота працівників служби експлуатації з монтажниками сприяє підвищенню якості монтажних робіт і скороченню обсягу пусконалагоджувальних робіт.

Загально відомо, що проведення робіт по налаштуванню складається з

наступних етапів [29, 30]:

- аналізу технічної документації;
- визначення характеристик установленого обладнання;
- стендової перевірки засобів автоматичного регулювання;
- налагодження регуляторів;
- складання технічного звіту [30].

Аналіз технічної документації на установку та відповідні засоби автоматизації виконують із метою ознайомлення з параметрами об'єктів керування та всієї системи загалом, з прийнятою проєктом схемою автоматизації, а також для оцінки правильності вибору засобів, що будуть забезпечувати автоматизацію. У процесі аналізу уточнюються завдання автоматичного регулювання. Особливу увагу слід звернути на відповідність проєктної схеми автоматизації технологічним вимогам об'єкта керування [29, 30].

Характеристики обладнання (насосів, вентиляторів, компресорів, водонагрівачів тощо) визначають у процесі натурного обстеження за табличками та бирками, наявними на обладнанні, які порівнюють із даними з технічного проєкту. Крім того, визначається наявність, достатність і правильність установки КВПіА (контрольно-вимірювальних приладів і апаратури).

За результатами аналізу технічної документації та натурного обстеження робиться висновок про можливість проведення робіт по налаштуванню. За необхідності розписуються та виконуються заходи щодо доопрацювання схеми автоматизації [29].

Налаштування електроприводу НУ полягає в налаштуванні частотного перетворювача (параметруванні регуляторів тощо) та програмованого контролера, перевірці працездатності електродвигунів та відповідної комутаційної апаратури. Спочатку виконується стендова перевірка обладнання. Налаштування електроприводу виконується саме в режимі ручного керування, налаштування ж САК - спочатку виконується окремо від електроприводу. Після

монтажу всієї НУ необхідно перевірити правильність встановлення обладнання (силової частини та електродвигунів, автоматики), а також працездатність НУ в цілому. У разі виникнення несправностей необхідно користуватися відповідною технічною документацією на частотний перетворювач та програмований контролер.

У таблиці Б.1 (див. додаток Б) представлено список можливих несправностей та відповідних повідомлень, що виводяться на основний та допоміжний індикатори частотного перетворювача, а також можливі способи їх усунення.

Налаштування та діагностика САК зводиться до візуального огляду релейно-контактної частини схеми та ПК. Під час переведення ПК в режим РОБ протягом 3-5 с виконується автоматична перевірка працездатності. У разі, якщо виявлено будь-яку несправність чи помилку відбувається блокування видавання сигналу ГОТ. Якщо в початковому запуску будь-яких несправностей не виявлено, формується сигнал ГОТ, та ПК переходить у режим РОБ. У разі виникнення будь-яких несправностей, помилок чи збоїв, що виявляються внутрішніми системами контролю, сигнал ГОТ знімається, а відмови фіксують в області діагностики відмов та збоїв. Інформація про характер несправності чи помилки виводиться на індикатори, розташовані на процесорі та модулях введення-виведення. Методика усунення несправностей зводиться до пошуку несправного модуля та простої його заміни. Можливі несправності та їхні причини наведено в таблиці Б.2 (див. додаток Б).

Висновки до розділу

Виконано перевірку обраних електродвигунів за перевантажувальною здатністю та нагріванням, а саме побудовано навантажувальні діаграми та уточнено потужності обраних електродвигунів, розраховано параметри схеми заміщення, побудовано природну механічну характеристику обраного

електродвигуна. Спроєктовано та розраховано силову схему автоматизованого електроприводу.

Спроєктовано систему керування електроприводом та розраховано її основні параметри, розроблено структурну схему та побудовано статичні характеристики. Для аналітичного аналізу динамічних характеристик САК електроприводом НУ використаємо математичне моделювання системи електроприводу на ЕОМ у програмному середовищі SIMULINK в пакеті MATLAB.

Виконано аналіз динамічних характеристик, проведено налаштування та діагностика електроприводу НУ, підібрано апаратне устаткування та кабелі, спроєктовано схеми електропостачання та захисту НУ.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Визначили, що доцільно використовувати в якості приводного двигуна НУ саме асинхронний двигун із короткозамкненим ротором, а живлення електродвигуна виконувати через частотний перетворювач саме із векторним керуванням.

Відповідно до вимог, що висуваються до всієї системи автоматизації, обраної системи електроприводу та обраного електродвигуна, для живлення електродвигуна попередньо обираємо частотний перетворювач РЕН-2-02-УХЛ4 ( ЯВІЕ.435321.001), а для керування НУ використаємо програмований логічний контролер.

Відповідно до поставленого завдання було створено схему автоматизації НУ, на основі якої було обрано необхідну кількість та тип обладнання. Розроблено алгоритм розрахунку та обліку витрати речовини та визначення напору, алгоритм спеціальної підпрограми для обрахунку кореня квадратного та алгоритм спеціальної підпрограми для обрахунку середнього значення. На основі яких було сформульовано необхідні вимоги до системи керування НУ та розроблено узагальнений алгоритм роботи всієї НУ.

Підібрано необхідну апаратну частину обладнання, розроблено функціональну схему контролеру для підключення модулів та розроблено саму програму для керування НУ, запропоновано проєкт пульту керування НУ.

Виконано перевірку обраних електродвигунів за перевантажувальною здатністю та нагріванням, а саме побудовано навантажувальні діаграми та уточнено потужності обраних електродвигунів, розраховано параметри схеми заміщення, побудовано природну механічну характеристику обраного електродвигуна. Спроєктовано та розраховано силову схему автоматизованого електроприводу.

Спроєктовано систему керування електроприводом та розраховано її основні параметри, розроблено структурну схему та побудовано статичні

характеристики. Для аналітичного аналізу динамічних характеристик САК електроприводом НУ використаємо математичне моделювання системи електроприводу на ЕОМ у програмному середовищі SIMULINK в пакеті MATLAB.

Виконано аналіз динамічних характеристик, проведено налаштування та діагностика електроприводу НУ, підібрано апаратне устаткування та кабелі, спроєктовано схеми електропостачання та захисту НУ.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Насосні станції : інтерактивний комплекс навчально-методичного забезпечення. – Рівне: НУВГП, 2008. – 125 с.

2. Насосні та повітродувні станції : навч. посібник / Т. О. Шевченко, Ю. В. Ярошенко, М. М. Яковенко, В. М. Бєляєва ; Харків. нац. ун-т міськ. гос-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ, 2014. – 195 с.

3. Колотило М. І. Насоси, повітродувки, компресори : навч. посібник для вузів / М. І. Колотило – Харків : ХДТУБА, 1997. – 128 с.

4. Насос К90/20. Технічні характеристики. – Режим доступу: https://konsolnik.com.ua/uk/nasosy-konsolni-k-km/nasos-k90-20/

5. Проєктування систем водяного опалення : посібник для проєктувальників, інженерів та студентів технічних ВНЗ / О.П. Любарець, О.М. Зайцев, В.О. Любарець. – Відень-Київ-Сімферополь: 2010. – 201 с.

6. Теплові насоси: основи теорії і розрахунку : навчальний посібник / В. М. Арсеньєв, С. С. Мелейчук. – Суми : Сумський державний університет, 2018. – 364 с. ISBN 978-966-657-740-8.

7. Інженерне обладнання будівель : підруч. для студ. вищ. навч. закл. / В.С. Кравченко, Л.А. Саблій, В.І. Давидчук, Н.В. Кравченко ; [за ред. В.С. Кравченко]. - К.: Видав. дім «Професіонал», 2008 - 480 с.

8. Підконтрольна експлуатація обладнання насосних станцій : навчальний посібник / В. О. Панченко, В. Ф. Герман, О. В. Івченко та ін. ; за загальною редакцією В. О. Панченка. – Суми : Сумський державний університет, 2020. – 270 с. ISBN 978-966-657-824-5.

9. Підконтрольна експлуатація обладнання насосних станцій : конспект лекцій / укладачі: В. О. Панченко, В. Ф. Герман. – Суми : Сумський державний університет, 2020. – 264 с.

10. Частотно-регулируемый электропривод насосных установок. — М.: Машиностроение, 2013. — 176 с., ил. ISBN 978-5-94275-688-8.

11. Васюра А.С. Електромашинні елементи та пристрої систем управління і автоматики [Електронний посібник] – Вінниця. ВНТУ 2013. – 287с.

12. Електричні машини: навч. посіб. для студ. вищ. навч. закладів /Л. Я. Бєлікова, В. П. Шевченко. – Одеса.: Наука і техніка, 2012. – 480 с.

13. Електропривод: підручник / Ю.М. Лавріненко, О.С. Марченко, П.І. Савченко, О.Ю. Синявський, Д.Г. Войтюк, В.П. Лисенко; за ред. Ю.М. Лавріненка. – К.: «Ліра-К», 2009. – 504 с.

14. КОНТРОЛЛЕРЫ МИКРОДАТ МБ57.01, МБ57.02, МБ57.03, МУ58.01, МУ58.02 - Режим доступу:

http://plc.co.ua/mb57.htm

15. Микропроцессорный модуль КМС59.07 для ПЛК (PLC) МикроДАТ - Режим доступу:

http://ao-constar.com.ua/kms59-07.php

16. Finlayson, Ian; Davis, Brandon; Gavin, Peter; Uh, Gang-Ryung; Whalley, David; Själander, Magnus; Tyson, Gary (2013). "Improving processor efficiency by statically pipelining instructions". Proceedings of the 14th ACM SIGPLAN/SIGBED conference on Languages, compilers and tools for embedded systems. pp. 33–44.

17. ДБН В.2.5 – 74:2013 Водопостачання. Зовнішні мережі та споруди. Основні положення проектування: «УкрНДІводоканалпроект», розробники: О. Оглобля, Г. Пархомович, О. Буланий та інш. – Київ : Мінрегіон України, 2013. – 280 с.

18. Функціональні можливості перетворювача частоти - Режим доступу:

https://owen.ua/ua/pryvidna-tehnika/funkcionalni-mozhlyvosti-pchv

19. Перетворювач частоти. Інструкція з експлуатації | UA. – 31 с.

20. Контактор КТ-6023 БУЗ 220/380в - Режим доступу:

http://promservis.cn.ua/ua/kontaktor-kt-6023-kt-6013.html ¶

21. Реле РТЛ-1022 О*4 - Режим доступу:

https://etal.ua/ru/product/rele-rtl-1022-o4/

22. Реле теплові РТ РТЛ – Режим доступу:

https://strumok.kiev.ua/ustatkuvannya-zakhystu-ta-kontrolyu/rele/rele-teplovye-serii-rt-rtl.html

23. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни "Промислова електроніка та електричні апарати" для студентів спеціальності 7.(8) 05070107 «Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії» (Розділ "Електричні апарати") / Упорядник: А.А. Колб. – Дніпро: Державний ВНЗ «НГУ», – 2016. – 37 с.

24. Теорія автоматичного керування : Підручник / Попович М. Г., Ковальчук О. В. — 2-ге вид., перероб. і доп. — К.: Либідь, 2007. — 656 с.

25. Навчальний посібник з дисципліни "Теорія автоматичного керування" : у 2 ч. Ч. 1 / А. П. Гуров, С. І. Ольшевський, О. О. Черно, Л. І. Бугрім. – Миколаїв : НУК, 2018. – 111 с.

26. Азарсков В.М., Гаєв Є.О. Сучасне програмування для інженерів, Ч. 1, "Програмування та математика з MATLAB". Навч. посібник, вид. 2. К.: НАУ, 2019. – 300 с.

27. Гаєв Є.О., Азарсков В.М. Сучасне програмування, Ч. 2, "Складні типи даних та алгоритми, інтелектуальні програми". Навч. посібник. К.: НАУ, 2016. – 196 с.

28. Основи електропостачання: підруч. / Козирський В.В., Волошин С.М., – К.: Компринт, 2021. – 497с.

29. Камені В.Н. Пусконаладки для монтажу електроприладів. Освітній посібник для підвищення кваліфікації. Профтехтування. – М.: Вища школа, 1981. – 352 с.

30. Обсяг, зміст та порядок виконання пусконалагоджувальних робіт в електроустановках - Режим доступу:

https://elearn.nubip.edu.ua/mod/book/view.php?id=280560&chapterid=95069

Додатки

Додаток А

Програма керування насосною установкою для контролера МікроДАТ мовою символічного кодування та карта ідентифікаторів до неї

**ТЕКСТ ПРОГРАММЫ**

```
]   ПРОГРАММА РАСЧТА НАПОРА И УЧЕТА РАСХОДА
]================================================================================
]$ НЗО   О3300;
]$ НРП   О3500;
]$ ВРЦ   К377;
]$ МАСКА  -XXY----;
]$- 000 255 Д0;
]$ (0000) Д0 Д1 Д2 Д3 Д4 Д5 Д6 Д7 Д8 Д9 Д10 Д16 Д255 Д60 Д48 Д1440;
]$ КОДЫ_НЗ Д0 Д1 Д2 Д3 Д4 Д5 Д6 Д7 Д8 Д9 Д10 Д16 Д255 Д60 Д48 Д1440;
]$ ВР_ФОРМ_ТР Д30;
]$- ДИАГ_ИМ1 8 К377377;
]$- НАЧ_Ф_ВР 32 Д0;
]$- НАЧ_Ф_ДИАГН 32 Д11;
]$- НАЧ_Ф_СОСТ 32 Д1;
]$- РАБ_ЯЧ_ИНД 3 Д0;
]$- РАБ_ЯЧ_ПРЕР 3 К377377;
]$  К_РАСХ1 Д2 Д2 Д2 Д2 Д2;
]================================================================================
НСТ 00
]================================================================================
НБЛ 00                  {НАЧАЛЬНЫЕ УСТАВКИ И ТЕСТ}
==С НАЧ_УСТ  {}
СБС ЗАДЕРЖ
СБС НОМЕР_АГР
СБС МАСКА1
СБС МАСКА2
СБС УПРАВЛЕНИЕ
==С МАСКА1.00
==С ДО16
==Р ПОСЛЕ16
СБС СЧ_ПФФ
ПФФ СЧ_ПФФ
ПРС КОДЫ_НЗ
ПРС (0000)
ПРК 0015
ПРК 0015
СБС СЧ_ПФФ
СБС ФЛАГИ
СБС ТАИМ_ИМ
СБС СЧ_ПФФ
==С РАБОТА
ОСТ 01
ОСТ 02
ПБЛ ЗАДЕРЖ_КММ
]--------------------------------------------------------------------------------
НБЛ ЗАДЕРЖ_КММ
=/= ЗАДЕРЖ.16
ТНД ЗАДЕРЖ
ПРК 0010
=== ЗАДЕРЖ.16
СБС ЗАДЕРЖ
ПБЛ ЧТ_РАБ_ОБЛ
]--------------------------------------------------------------------------------
НБЛ ЧТ_РАБ_ОБЛ  {ЧТЕНИЕ УСТАВОК В РАБ ОБЛАСТЬ}
ЧТС НОМЕР_АГР
ЗПС СЧ_ПФФ
ЧСФ СЧ_ПФФ        {ЧТЕНИЕ СЛОВА СОСТОЯНИЯ АГРЕГАТА}
ПРС НАЧ_Ф_СОСТ
ПРС СОСТ_АГР
ПРК 0032
ЧТС НОМЕР_АГР
```

```
ЗПС СЧ_ПФФ
ЧСФ СЧ_ПФФ        {ЧТЕНИЕ ВРЕМЕНИ РАБОТЫ В ТЕКУШЕМ РЕЖИМЕ}
ПРС НАЧ_Ф_ВР
ПРС ВРЕМЯ_ПУСКА
ПРК 0032
ЧТС НОМЕР_АГР
ЗПС СЧ_ПФФ
ЧСФ СЧ_ПФФ
ПРС НАЧ_Ф_ПОД
ПРС Т_НАЧ
ПРК 0032
ЧТС НОМЕР_АГР
ЗПС СЧ_ПФФ
ЧСФ СЧ_ПФФ        {ЧТЕНИЕ СЧ ТРЕНДА }
ПРС НАЧ_Ф_СЧ_ТР
ПРС СЧ_ТР
ПРК 0032
РВН СЧ_ТР
ПРК 0000
ЧТС (0001)
ЗПС СЧ_ТР
=== РАБОТА
ЧТС НОМЕР_АГР
УАС (0004)             {ВЫЧИСЛЕНИЕ СМЕШЕНИЯ В ФАИЛЕ}
ЗПС СЧ_ПФФ
ЧСФ СЧ_ПФФ          {ЧТЕНИЕ УСТАВОК ВР_ВЫД, ВР_ПОД, ВР_ИЗОТ, ТЕМП_ИЗОТ}
ПРС НАЧ_Ф_УСТ
ПРС ВР_ВЫД
ПРК 0128
==Р СЧ_ПФФ.17
ЧСФ СЧ_ПФФ          {ЧТЕНИЕ УСТАВОК ВР_ПОД,ВР_ИЗОТ,ТЕМП_ИЗОТ}
ПРС НАЧ_Ф_УСТ
ПРС ВР_ПОД
ПРК 0128
==Р СЧ_ПФФ.17
ЧСФ СЧ_ПФФ          {ЧТЕНИЕ УСТАВОК ВР_ИЗОТ, ТЕМП_ИЗОТ}
ПРС НАЧ_Ф_УСТ
ПРС ВР_ИЗОТ
ПРК 0128
==Р СЧ_ПФФ.17
ЧСФ СЧ_ПФФ          {ЧТЕНИЕ УСТАВОК ТЕМП_ИЗОТ}
ПРС НАЧ_Ф_УСТ
ПРС ТЕМП_ИЗОТ
ПРК 0128
ЧТС ВРЕМЯ
ВАС ВРЕМЯ_ПУСКА
ЗПС РАБ_ЯЧ
=== РАБ_ЯЧ.14
ЧТС (1440)
ВАС ВРЕМЯ_ПУСКА
САС ВРЕМЯ
ЗПС РАБ_ЯЧ
=== РАБОТА
ЧТС РАБ_ЯЧ
ЗПС ВРЕМЯ_РАБОТЫ
СБС УСТ_ТЕМП
ПБЛ БЛ_ЧТ_ТЕМП
]----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------
НБЛ БЛ_ЧТ_ТЕМП  {БЛОК ЧТЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ И ТЕМПЕРАТУРЫ}
=/= СЧ_ТЕМП.16
==Р СЧ_ТЕМП.15
СЧС СЧ_ТЕМП
ПРК 0008
```

```
ЧТР РЕГ_ТЕМП
ЗПС СЛ_ТЕМП
ЧТС СЛ_ТЕМП
ПУС (000377)
САС СУМ_ТЕМП
ЗПС СУМ_ТЕМП
=== СЧ_ТЕМП.16
СБС СЧ_ТЕМП
ЧТС СУМ_ТЕМП
ДАС (0008)
ПУС (000377)
ЗПС ТЕМП
СБС СУМ_ТЕМП
ПБЛ ДИАГНОСТИКА
]----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------
НБЛ ДИАГНОСТИКА  {БЛОК ДИАГНОСТИКИ И ЗАПИСИ ЗНАЧЕНИЙ}
==С АВАР_ИК1
ПРН ТЕМП
ПРК 0150
ПРК 0001
==Р АВАР_ИК1
=== АВАР_ИК1
=() ИНД_АВ_ИК
=/= АВАР_ИК1
==Р АВАР_ИК2
==Р АВАР_ИК3
=== АВАР_ИК3
=== АВАР_ИК1
==С АВАР_ИК
=== АВАР_ИК2
=== АВАР_ИК1
==С АВАР_ИК3
=== АВАР_ИК1
==С АВАР_ИК2
==Р АВАР_ИК1
=== АВАР_ЗАКР
+
=== АВАР_ОТКР
=() ИНД_АВ_ИМ
=== АВАР_ИК
=/= ЦКЛ_ПР
ПБЛ БЛ_ПРЕР
=== РАБОТА
ПБЛ БЛ_РЕГ
]----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------
НБЛ БЛ_РЕГ          {БЛОК РЕГУЛИРОВАНИЯ}
БЛШ УСТ_ТЕМП
ПРС ТЕМП_ИЗОТ
ЧТС ТЕМП_ИЗОТ
ЗПС УСТ_ТЕМП
=== РАБОТА
СБС РАЗНИЦА
==Р АВАР_ТЕМП
БЛШ ТЕМП
ПРС УСТ_ТЕМП
ЧТС ТЕМП
ВАС УСТ_ТЕМП
ЗПС РАЗНИЦА
==С РАЗНИЦА.17     {ПРЕВЫШЕНИЕ}
БЛШ УСТ_ТЕМП
ПРС ТЕМП
ЧТС УСТ_ТЕМП
ВАС ТЕМП
```

```
ЗПС РАЗНИЦА
БЛШ РАЗНИЦА
ПРК 0005
==С АВАР_ТЕМП
=== РАЗНИЦА.17        {ПРЕВЫШЕНИЕ}
БЛШ РАЗНИЦА
ПРК 0002
=/= ОС_ЗАКР
ПБЛ БЛ_ЗАКР
=/= РАЗНИЦА.17
БЛШ РАЗНИЦА
ПРК 0006
==Р ИМП
СБС ТАИМ_ИМ
ПБЛ БЛ_ОТКР
=/= РАЗНИЦА.17         {ЗАНИЖЕНИЕ НА 3...6 ГРАД}
БЛШ РАЗНИЦА
ПРК 0002
==С ИМП
СБС ТАИМ_ИМ
ПБЛ БЛ_ОТКР
=== РАБОТА
ПБЛ ЗАП_РАБ_ОБЛ
]----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------
НБЛ ЗАП_РАБ_ОБЛ     {БЛОК ЗАПИСИ РАБОЧЕИ ОБЛАСТИ В ФАИЛЫ}
ЧТС НОМЕР_АГР
ЗПС СЧ_ПФФ
ЗСФ СЧ_ПФФ            {ЗАПИСЬ СЛОВА СОСТОЯНИЯ АГРЕГАТА}
ПРС НАЧ_Ф_СОСТ
ПРС СОСТ_АГР
ПРК 0032
ЧТС НОМЕР_АГР
ЗПС СЧ_ПФФ
ЗСФ СЧ_ПФФ             {ЗАПИСЬ ВРЕМЕНИ СТАРТА}
ПРС НАЧ_Ф_ВР
ПРС ВРЕМЯ_ПУСКА
ПРК 0032
ЧТС СМЕШЕНИЕ
ЗПС СЧ_ПФФ
ЧБМ УСТ_ТЕМП
ЗБС РАБ_ЯЧ
ЧБМ ТЕМП
ЗБМ РАБ_ЯЧ
ЗСФ СЧ_ПФФ
ПРС НАЧ_Ф_ТЕМП
ПРС РАБ_ЯЧ
ПРК 0032
=== ДО16
(
=== АВАР_ОТКР
+
=== АВАР_ЗАКР
)
ЧТС МАСКА1
ПСС (0000)
ПУС ДИАГ_ИМ1
ЗПС ДИАГ_ИМ1
=== ПОСЛЕ16
(
=== АВАР_ОТКР
+
=== АВАР_ЗАКР
)
```

```
ЧТС МАСКА2
ПСС (0000)
ПУС ДИАГ_ИМ2
ЗПС ДИАГ_ИМ2
=== ДО16
=== АВАР_ИК
ЧТС МАСКА1
ПСС (0000)
ПУС ДИАГ_ИК1
ЗПС ДИАГ_ИК1
=== ПОСЛЕ16
=== АВАР_ИК
ЧТС МАСКА2
ПСС (0000)
ПУС ДИАГ_ИК2
ЗПС ДИАГ_ИК2
=== РАБОТА
ПБЛ БЛ_ЗАП_ТР
]----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------
НБЛ БЛ_ЗАП_ТР              {БЛОК ЗАПИСИ В ТРЕНД}
БЛШ СЧ_ТР
ПРК 0031
ЧТС (0010)
УАС (0003)
САС (0001)
ЗПС СЧ_ТР
=== ВЫКЛЮЧЕН
ПБЛ БЛ_ИНДИК
=== РАБОТА
ЧТС СЧ_ТР
УАС ВР_ФОРМ_ТР
ЗПС РАБ_ЯЧ
МНШ РАБ_ЯЧ
ПРС ВРЕМЯ_РАБОТЫ
=/= ВЫКЛЮЧЕН
ЧТС УСТ_ТЕМП
ПУС (000377)
ЗПС РАБ_ЯЧ
ПББ РАБ_ЯЧ
ЗПС РАБ_ЯЧ
ЧБМ ТЕМП
ЗБМ РАБ_ЯЧ
ЧТС СМЕШЕНИЕ
УАС (0016)
УАС (0002)
САС СЧ_ТР
ЗПС СЧ_ПФФ
ЗСФ СЧ_ПФФ
ПРС НАЧ_ТРЕНДОВ
ПРС РАБ_ЯЧ
ПРК 1030
==Р СЧ_ТР.15
СЧС СЧ_ТР
ПРК 0040
=== РАБОТА
ЧТС НОМЕР_АГР
ЗПС СЧ_ПФФ
ЗСФ СЧ_ПФФ
ПРС НАЧ_Ф_СЧ_ТР
ПРС СЧ_ТР
ПРК 0033
ПБЛ БЛ_ИНДИК
]----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------
```

```
НБЛ БЛ_КММ_АГР            {КММ НОВОГО АГРЕГАТА}
=== РАБОТА
==Р НОМЕР_АГР.15
СЧС НОМЕР_АГР
ПРК 0100
БЛШ НОМЕР_АГР
ПРК 0023
СБС НОМЕР_АГР
БЛШ НОМЕР_АГР
ПРК 0000
МНШ НОМЕР_АГР
ПРК 0016
==С ДО16
==Р ПОСЛЕ16
СЦС МАСКА1
МНШ НОМЕР_АГР
ПРК 0032
БЛШ НОМЕР_АГР
ПРК 0016
==Р ДО16
==С ПОСЛЕ16
СЦС МАСКА2
РВН НОМЕР_АГР
ПРК 0000
СБС МАСКА1
СБС МАСКА2
==С ДО16
==Р ПОСЛЕ16
==С МАСКА1.00
РВН НОМЕР_АГР
ПРК 0016
СБС МАСКА1
СБС МАСКА2
==Р ДО16
==С ПОСЛЕ16
==С МАСКА2.00
=== РАБОТА
ПБЛ ЗАДЕРЖ_КММ
]=============================================================================
]  СЕГМЕНТ ЧТЕНИЯ ТЕКУЩЕГО ВРЕМЕНИ
]=============================================================================
НСТ 01
НБЛ 00
=== РАБОТА
ЧТР РЕГ_СЕК
ПУС (000377)
ЗПС СЕК
ЧТР РЕГ_МИН
ПУС (000377)
ЗПС МИН
ЧТР РЕГ_ЧАС
ПУС (000377)
ЗПС ЧАС
ЧТР РЕГ_ДЕНЬ
ЗПС РАБ_ЯЧ
ПББ РАБ_ЯЧ
ЧТС РАБ_ЯЧ
ПУС (000377)
ЗПС ДЕНЬ
ЧТР РЕГ_МЕСЯЦ
ПУС (000377)
ЗПС МЕСЯЦ
ЧТР РЕГ_ГОД
```

```
ЗПС РАБ_ЯЧ
ПББ РАБ_ЯЧ
ЧТС РАБ_ЯЧ
ПУС (000377)
ЗПС ГОД
ЧТС ЧАС
УАС (0060)
САС МИН
ЗПС ВРЕМЯ
ЧТР 105
ЗПС ИНД_РЕГ_АВ
ЧТР 106
ЗПС ИНД_РЕГ_СД
]=========================================================================
]  СЕГМЕНТ РАСХОДА
]=========================================================================
НСТ 02
]-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------
НБЛ 00                  {ПРОВЕРКА  ПРОШЛО ЛИ ВРЕМЯ ДЛЯ НОВОГО РАСЧЕТА}
ЧТС ВРЕМЯ
ВАС ВР_ВЫЧ_РАСХ
ЗПС РАБ_ЯЧ_РАСХ
БЛШ РАБ_ЯЧ_РАСХ
ПРК 0001
ЧТС ВРЕМЯ
ЗПС ВР_ВЫЧ_РАСХ
ПБЛ 10
]-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------
НБЛ 10                  {ВЫЧ МГНОВЕННОГО РАСХОДА}
ЧТР РЕГ_РАСХ1
ЗПС РАБ_ЯЧ_РАСХ
ПББ РАБ_ЯЧ_РАСХ
ЧТС РАБ_ЯЧ_РАСХ
ПУС (000377)
САС (0001)
ЗПС ДАВЛ1
ЧТР РЕГ_РАСХ1
ПУС (000377)
УАС ДАВЛ1
ЗПС ЧИСЛО
ЗПС ЧИСЛО1
ЗПС КОРЕНЬ
==Р КОРЕНЬ_ЕСТЬ
=/= КОРЕНЬ_ЕСТЬ
ВПП 00        {ВЫЧИСЛЕНИЕ КОРНЯ}
=== КОРЕНЬ_ЕСТЬ
ЧТС КОРЕНЬ
УАС К_РАСХ1
ЗПС М_РАСХ1
==Р СЧ_РАСХ.15
СЧС СЧ_РАСХ
ПРК 0010
=== КОРЕНЬ_ЕСТЬ
=== СЧ_РАСХ.16
ПБЛ 02
=== КОРЕНЬ_ЕСТЬ
=/= СЧ_РАСХ.16
ПБЛ 00
]-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------
НБЛ 02          {ВЫЧИСЛЕНИЕ ИНТЕГРАЛЬНОГО РАСХОДА}
ЧТС М_РАСХ1
САС ИНТ_РАСХ1
ЗПС ИНТ_РАСХ1
```

```
БЛШ ИНТ_РАСХ1
ПРК 1000
ЧТС ИНТ_РАСХ1
ДАС (0010)
ДАС (0010)
ДАС (0010)
ЗПС РАБ_ЯЧ_РАСХ
ЧТС ИР12
САС РАБ_ЯЧ_РАСХ
ЗПС ИР12
ЧТС РАБ_ЯЧ_РАСХ
УАС (0010)
УАС (0010)
УАС (0010)
ЗПС РАБ_ЯЧ_РАСХ
ЧТС ИНТ_РАСХ1
ВАС РАБ_ЯЧ_РАСХ
ЗПС ИНТ_РАСХ1
БЛШ ИР12
ПРК 1000
==Р ИР13.15
СЧС ИР13
ПРК 4000
ЧТС (0010)
УАС (0010)
УАС (0010)
ЗПС РАБ_ЯЧ_РАСХ
ЧТС ИР12
ВАС РАБ_ЯЧ_РАСХ
ЗПС ИР12
=== НАЧ_УСТ
СБС СЧ_РАСХ
ПБЛ 03
]----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------
НБЛ 03              {ЗАПИСЬ МГНОВЕННОГО РАСХОДА В ТРЕНД}
ЧТС ЧАС
ЗПС СЧ_ПФФ
ЗСФ СЧ_ПФФ
ПРС ТРЕНД_РАСХ1
ПРС М_РАСХ1
ПРК 0024
ЧТС ЧАС
ЗПС СЧ_ПФФ
ЗСФ СЧ_ПФФ
ПРС ТРЕНД_РАСХ2
ПРС М_РАСХ2
ПРК 0024
ЧТС ЧАС
ЗПС СЧ_ПФФ
ЗСФ СЧ_ПФФ
ПРС ТРЕНД_РАСХ3
ПРС М_РАСХ3
ПРК 0024
ЧТС ЧАС
ЗПС СЧ_ПФФ
ЗСФ СЧ_ПФФ
ПРС ТРЕНД_РАСХ4
ПРС М_РАСХ4
ПРК 0024
ЧТС ЧАС
ЗПС СЧ_ПФФ
ЗСФ СЧ_ПФФ
ПРС ТРЕНД_РАСХ5
```

```
ПРС M_РАСХ5
ПРК 0024
ПБЛ 00
]----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------
НСТ 77
]======================================================================================
]  ПОДПРОГРАММА ИЗВЛЕЧЕНИЯ КОРНЯ  КОРЕНЬ=SQRT(ЧИСЛО)
]  X=ЧИСЛО      Yn=ЧИСЛО1       Yn+1=КОРЕНЬ
]======================================================================================
НПП 00
РВН КОРЕНЬ
ПРК 0000
==С КОРЕНЬ_ЕСТЬ
БЛШ КОРЕНЬ
ПРК 0000
ЧТС ЧИСЛО
ДАС ЧИСЛО1
САС ЧИСЛО1
ДАС (0002)
ЗПС КОРЕНЬ
ЧТС КОРЕНЬ
ВАС ЧИСЛО1
ПУС (000377)
ЗПС РАБ_ЯЧ_РАСХ
ЧТС КОРЕНЬ
ЗПС ЧИСЛО1
==Р КОРЕНЬ_ЕСТЬ
МНШ РАБ_ЯЧ_РАСХ
ПРК 0002
==С КОРЕНЬ_ЕСТЬ
НБЛ 77
НПП 77
```

## А.2 Карта ідентифікаторів

| | | |
|---|---|---|
| 000.00 | РАБОТА | . |
| 000.01 | НАЧ_УСТ | . |
| 000.10 | АВАР_ДАВЛ | . |
| 000.15 | X | . |
| 000.16 | X | . |
| 000.17 | X | . |
| 000 | X | S |
| 001 | МАСКА1 | S |
| 002 | МАСКА2 | S |
| 003 | ИНД1 | S |
| 004 | ИНД2 | S |
| 005 | УПРАВЛЕНИЕ | S |
| 005.02 | ИНД_АВ_ИМ | . |
| 005.03 | ИНД_АВ_ИК | . |
| 005.04 | ЗАКР_ИМ | . |
| 005.05 | ИМ | . |
| 010 | СЕК | S |
| 011 | МИН | S |
| 012 | ЧАС | S |
| 013 | ДЕНЬ | S |
| 014 | МЕСЯЦ | S |
| 015 | ГОД | S |
| 016 | ФЛАГИ | S |
| 016.00 | ДО16 | . |
| 016.01 | ПОСЛЕ16 | . |
| 016.02 | КОРРЕКЦИЯ | . |
| 016.03 | МИГАНИЕ | . |
| 016.04 | ФЛАГ | . |
| 016.05 | ИМП | . |
| 016.06 | КОРЕНЬ_ЕСТЬ | . |
| 000 | X | S |
| 017 | СЧ_ПФФ | S |
| 020 | РАБ_ЯЧ | S |
| 021 | НОМЕР_АГР | S |
| 021 | СМЕШЕНИЕ | S |
| 022 | СЧ_ТЕМП | S |
| 023 | СУМ_ТЕМП | S |
| 024 | СУМ_ДАВЛ | S |
| 025 | РАЗНИЦА | S |
| 026 | ТАИМ_ИМ | S |
| 027 | ЗАДЕРЖ | S |
| 030 | СЛ_ТЕМП | S |
| 031 | ДИАГ_ИК1 | S |
| 032 | ДИАГ_ИК2 | S |
| 033 | ДИАГ_ИМ1 | S |
| 034 | ДИАГ_ИМ2 | S |
| 035 | СЧ_УСТ_ПОД | S |
| 036 | ЯЧ_ПОД1 | S |
| 040 | ЯЧ_ПОД2 | S |
| 041 | ЯЧ_ПОД3 | S |
| 042 | ТАИМ_ИМПУЛЬС | S |
| 000 | x | S |
| 100 | X | S |
| 105.12 | ТУМБЛЕР | . |
| 105.10 | ОС_ОТКР | . |
| 105.11 | ОС_ЗАКР | . |
| 000 | X | S |
| 110 | ИНД_РЕГ_АВ | S |
| 111 | ИНД_РЕГ_СД | S |
| 124 | ВР_ФОРМ_ТР | S |
| 125 | СЧ_ОЧИСТ | S |
| 126 | ВР_ОПРОСА | S |
| 127 | РАБ_ЯЧ_ИНД | S |
| 130 | ЯЧ_ИНД1 | S |
| 131 | ЯЧ_ИНД2 | S |
| 132 | РАБ_ЯЧ_ПРЕР | S |
| 133 | ЯЧ_ИНД_ПР1 | S |
| 134 | ЯЧ_ИНД_ПР2 | S |
| 000 | x | S |
| 160 | СОСТ_АГР | S |
| 160.00 | ВЫКЛЮЧЕН | . |
| 160.01 | ВЫДЕРЖКА | . |
| 160.02 | РАЗГОН | . |
| 160.03 | ИЗОТ | . |
| 160.04 | ЦКЛ_ОК | . |
| 160.05 | ЦКЛ_ПР | . |
| 160.06 | x | . |
| 160.07 | x | . |
| 160.10 | АВАР_ИК | . |
| 160.11 | АВАР_ЗАКР | . |
| 160.12 | АВАР_ОТКР | . |
| 160.13 | X | . |
| 160.14 | АВАР_ТЕМП | . |
| 160.15 | АВАР_ИК1 | . |
| 160.16 | АВАР_ИК2 | . |
| 160.17 | АВАР_ИК3 | . |
| 161 | ВРЕМЯ_РАБОТЫ | S |
| 162 | ВРЕМЯ_ПУСКА | S |
| 163 | ВРЕМЯ | S |
| 164 | УСТ_ТЕМП | S |
| 165 | ТЕМП | S |
| 166 | СЧ_ТР | S |
| 167 | ВР_ВЫД | S |
| 170 | ВР_ПОД | S |
| 171 | ВР_ИЗОТ | S |
| 172 | ТЕМП_ИЗОТ | S |
| 173 | Т_НАЧ | S |
| 175 | УСТ_ВЫД | S |
| 176 | X | S |
| 177 | X | S |

| | | |
|---|---|---|
| 0200 | НАЧ_Ф_ВР | U |
| 200 | ВР_АГР1 | S |
| 201 | ВР_АГР2 | S |
| 202 | ВР_АГР3 | S |
| 203 | ВР_АГР4 | S |
| 204 | ВР_АГР5 | S |
| 205 | ВР_АГР6 | S |
| 206 | ВР_АГР7 | S |
| 207 | ВР_АГР8 | S |
| 210 | ВР_АГР9 | S |
| 211 | ВР_АГР10 | S |
| 212 | ВР_АГР11 | S |
| 213 | ВР_АГР12 | S |
| 240 | М_РАСХ1 | S |
| 241 | М_РАСХ2 | S |
| 242 | М_РАСХ3 | S |
| 243 | М_РАСХ4 | S |
| 244 | М_РАСХ5 | S |
| 245 | ДАВЛ1 | S |
| 246 | ДАВЛ2 | S |
| 247 | ДАВЛ3 | S |
| 250 | ДАВЛ4 | S |
| 251 | ДАВЛ5 | S |
| 252 | ДАТА_РАСХ | S |
| 253 | ВРЕМЯ_РАСХ | S |
| 254 | ИНТ_РАСХ1 | S |
| 255 | ИР12 | S |
| 256 | ИР13 | S |
| 257 | ИНТ_РАСХ2 | S |
| 260 | ИР22 | S |
| 261 | ИР23 | S |
| 262 | ИНТ_РАСХ3 | S |
| 263 | ИР32 | S |
| 264 | ИР33 | S |
| 265 | ИНТ_РАСХ4 | S |
| 266 | ИР42 | S |
| 267 | ИР43 | S |
| 270 | ИНТ_РАСХ5 | S |
| 271 | ИР52 | S |
| 272 | ИР53 | S |
| 273 | ВР_ВЫЧ_РАСХ | S |
| 274 | СЧ_РАСХ | S |
| 275 | ЧИСЛО1 | S |
| 276 | ЧИСЛО | S |
| 277 | КОРЕНЬ | S |
| 300 | (0000) | S |
| 301 | (0001) | S |
| 302 | (0002) | S |
| 303 | (0003) | S |
| 304 | (0004) | S |
| 305 | (0005) | S |
| 306 | (0006) | S |
| 307 | (0007) | S |
| 310 | (0008) | S |
| 311 | (0009) | S |
| 312 | (0010) | S |
| 313 | (0016) | S |
| 314 | (0255) | S |
| 314 | (000377) | S |
| 315 | (0060) | S |
| 316 | (0048) | S |
| 317 | (1440) | S |
| 320 | К_РАСХ1 | S |
| 321 | К_РАСХ2 | S |
| 322 | К_РАСХ3 | S |
| 323 | К_РАСХ4 | S |
| 324 | К_РАСХ5 | S |
| 325 | СЧ_ПФФ2 | S |
| 326 | РАБ_ЯЧ_РАСХ | S |
| 327 | Х | S |
| 0440 | НАЧ_Ф_ПОД | U |
| 0500 | НАЧ_Ф_СОСТ | U |
| 0540 | НАЧ_Ф_ДИАГН | U |
| 0600 | НАЧ_Ф_УСТ | U |
| 1000 | НАЧ_Ф_СЧ_ТР | U |
| 1040 | НАЧ_Ф_ТЕМП | U |
| 1100 | НАЧ_ТРЕНДОВ | U |
| 3100 | Х | U |
| 3100 | ТРЕНД_РАСХ1 | U |
| 3130 | ТРЕНД_РАСХ2 | U |
| 3160 | ТРЕНД_РАСХ3 | U |
| 3210 | ТРЕНД_РАСХ4 | U |
| 3240 | ТРЕНД_РАСХ5 | U |
| 3300 | Х | U |
| 000 | Х | S |
| 3321 | КОДЫ_НЗ | U |
| 3500 | Х | U |
| 002 | РЕГ_ТЕМП | R |
| 007 | РЕГ_РАСХ1 | R |
| 000 | РЕГ_РАСХ2 | R |
| 000 | РЕГ_РАСХ3 | R |
| 007 | РЕГ_РАСХ4 | R |
| 000 | РЕГ_РАСХ5 | R |
| 000 | х | S |
| 100 | РЕГ_СЕК | R |
| 101 | РЕГ_МИН | R |
| 102 | РЕГ_ЧАС | R |
| 103 | РЕГ_ДЕНЬ | R |
| 104 | РЕГ_МЕСЯЦ | R |
| 104 | РЕГ_ГОД | R |
| 01 | Х | B |
| 76 | БЛ_КММ_АГР | B |
| 75 | ЗАДЕРЖ_КММ | B |
| 74 | ЧТ_РАБ_ОБЛ | B |
| 73 | БЛ_ЧТ_ТЕМП | B |
| 72 | ДИАГНОСТИКА | B |
| 71 | ЗАП_РАБ_ОБЛ | B |
| 70 | БЛ_РЕГ | B |
| 67 | БЛ_ЗАП_ТР | B |

Додаток Б

Таблиця Б.1 – Можливі несправності ЧП та способи їх усунення

| Показ ВИ | Показ ОИ | Характер аварії | Дії користувача |
|---|---|---|---|
| E | ПЗУ | Помилка ПЗУ | Замінити ПЗУ |
| E | ОЗУ | Помилка ОЗУ | Перевірити напругу літієвої батарейки на платі керування (не нижче 1,5 В) |
| – | EE3 | Аварія клавіатури | Перевірити надійність приєднання клавіатури ПУ та плати керування гнучким кабелем |
| U | LD | Напруга в мережі нижча за мінімально допустиму | |
| U | HI | Напруга в мережі вища за максимально допустиму | |
| A | або | Аварія першого транзисторного модуля | Можливе КЗ в навантаженні |
| A | або | Аварія другого транзисторного модуля | Можливе КЗ в навантаженні |
| A | або | Аварія третього транзисторного модуля | Можливе КЗ в навантаженні |
| A | | Перевантаження по струму | Перевірити відповідність потужності електродвигуна паспортним даним на частотний перетворювач. Переконатися у відсутності заклинювання насоса |
| A | U | Аварія системи живлення власних потреб | Перезапустити привід, у разі повторення - перевірити блок живлення власних потреб |
| – | СБР | Скидання таймеру | Перезапустити привід |
| U | СБР | Зникнення живлення власних потреб 12 В | Перезапустити привід, у разі повторення - перевірити блок живлення власних потреб |

Таблиця Б.2 - Можливі несправності контролера та їхні ймовірні причини

| Можливі несправності, зовнішні прояви та додаткові ознаки | Можлива причина |
|---|---|
| 1. Відсутнє світіння індикаторів МЕРЕЖА, УСТ, «+5 В», «+12 В», «-5 В» джерела МВ91.22 | Несправна вставка плавка на лицьовій стороні джерела МВ91.22 |
| 2. Відсутнє світіння одного з індикаторів МВ91.22<br>«+5 В»<br>«+12 В»<br><br>«-5 В» | <br>Несправний канал «+5 В» джерела живлення;<br>Несправний канал «+12 В», вийшов з ладу запобіжник каналу «+12 В»;<br>Несправний канал «-5 В» |
| 3. Постійне світіння індикатора «УСТ» | Несправні канали «+5 В», «+12 В», «-5 В», несправний один із компараторів «УСТ +5 В», «УСТ +12 В», «УСТ -5 В» |
| 4. Постійне світіння індикатора «ПР», «РІ» модуля мікропроцесорного | Недостатня напруга резервного джерела живлення в модулі мікропроцесорному |
| 5. Постійне світіння індикатора «ПР», «ПМ» | Несправне ОЗП у модулі мікропроцесорному |
| 6. Постійне світіння індикатора «ПР», відсутність світіння індикатора «ГОТ» | Інформація про причину несправності міститься у словах 7714 і 7715 |
| 7. Постійне світіння індикатора «ПР», «ВВ» | Інформація про причину несправності міститься у слові 3716 |
| 8. Постійне світіння індикатора «ОМ» модуля введення або виведення | Несправна вставка плавка в модулі МС35.25, перевантаження за струмом в одному з каналів модуля МС35.18, підвищення напруги на вході в каналах МС34.08, МС 34.09 |