

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя
Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
Кафедра електричної інженерії

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи

магістр

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему: **«РОЗРОБКА АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ
ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ДЛЯ ПОСТАЧАННЯ ВОДИ
ПРИВАТНИМ ЖИТЛОВИМ ГОСПОДАРСТВАМ»**

Виконав: студент VI курсу, групи ЕЕм-61,
спеціальності

141 – Електроенергетика, електротехніка
та електромеханіка

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Сарняк Ігор Михайлович

(прізвище та ініціали)

Керівник Оробчук Б.Я.

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль Вакуленко О.О.

(прізвище та ініціали)

Рецензент _____

(прізвище та ініціали)

Тернопіль – 2020 рік

Міністерство освіти і науки України

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії

Кафедра Електричної інженерії

Освітньо-кваліфікаційний рівень - магістр

Галузь знань 14 – «Електрична інженерія»

Спеціальність 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
Електричної інженерії
д.т.н., проф. Тарасенко М.Г.

“ 07 ” вересня 2020 року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Сарняку Ігорю Миколайовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: «Розробка автоматизованої системи управління електроприводом для постачання води приватним житловим господарством»

керівник роботи Оробчук Богдан Ярославович, к.т.н., доцент

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від 1 вересня 2020 р. № 4/7-619

2. Строк подання студентом роботи - грудень 2020 року

3. Вихідні дані до роботи: Виконати дослідження та аналіз існуючих автоматизованих систем управління електроприводом для подачі води; виконати вибір елементів для компонування системи автоматизованого управління; виконати математичне моделювання та провести аналіз динамічних і статичних характеристик розробленої системи автоматизованого управління на ЕОМ в заданому прикладному програмному середовищі.

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

1. Аналітичний розділ

2. Проектно-конструкторський розділ

3. Розрахунково-дослідницький розділ

4. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях

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

1. Актуальність теми, предмет і об'єкт дослідження, поставленні задачі та шляхи їх розв'язку

2. Схема системи водопостачання і автоматичного управління

3. Функціональна схема системи автоматизованого управління

4. Вибір устаткування для реалізації системи автоматизованого управління

5. Дослідження моделі з врахуванням і без врахування обмежень

6. Дослідження перехідних процесів з врахуванням і без врахування обмежень

7. Загальні висновки до дипломної роботи

6. Консультанти розділів роботи

| Розділ | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата | |
|--|---|----------------|------------------|
| | | завдання видав | завдання прийняв |
| <i>Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях</i> | <i>Гурик О.Я., к.т.н., доцент</i> | | |
| | <i>Клепчик В.М., ст. викладач</i> | | |
| <i>Нормоконтроль</i> | <i>Вакуленко О.О., ст. викладач</i> | | |

7. Дата видачі завдання - вересень 2020 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів дипломного проекту (роботи) | Строк виконання етапів проекту (роботи) | Примітка |
|-------|--|---|----------|
| 1 | <i>Аналітичний розділ</i> | | |
| 2 | <i>Проектно-конструкторський розділ</i> | | |
| 3 | <i>Розрахунково-дослідницький розділ</i> | | |
| 4 | <i>Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях</i> | | |
| 5 | <i>Оформлення пояснювальної записки</i> | | |
| 6 | <i>Оформлення графічної частини</i> | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |

Студент

_____ Сарняк І. М.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

_____ Оробчук Б. Я.
(підпис) (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Сарняк І.М. Розробка автоматизованої системи управління електроприводом для постачання води приватним житловим господарствам, 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка; Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії. Кафедра електричної інженерії, група ЕЕМ-61. – Тернопіль: ТНТУ, 2012

Стор. - 72; рис. - 34; табл. - 6; плакатів - 7; джерел – 39.

У даній кваліфікаційній роботі виконано теоретичну розробку автоматичної системи управління насосною установкою, яка здійснює подачу води до приватних житлових поселень.

Основним критерієм вибору при проектуванні системи автоматичного управління і її елементної бази є доступність складових частин електроприводу - можливість безпосередньої їх купівлі в Україні, доступність технічної документації та умови гарантійного обслуговування.

Опираючись на результати проведених розрахунків та вибрану елементну базу було розроблено структурну схему системи автоматичного управління, на основі якої було виконано моделювання динамічних режимів системи автоматичного управління на персональному комп'ютері.

Ключові слова: асинхронний електродвигун, електричний привід, транзисторний перетворювач частоти, ПД-регулятор тиску, датчик тиску, IGBT-транзистори, математичне моделювання, автоматична система управління, Matlab, Simulink, насосна установка, водопровідна мережа.

ABSTRACT

Sarnayk Ihor. Development of an automated control system for electric drives for water supply to private housing. 141 - Electrical Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics. Ternopil Ivan Puluj National Technical University. Faculty of Applied Information Technologies and Electrical Engineering. Chair of Electrical Engineering, group EEM-61. – Ternopil: TNTU, 2010

Page – 72; Illustrations – 34; Tables – 6; Blueprints – 7; Sources – 39.

In this qualification work the theoretical development of the automatic control system of the pump installation which carries out water supply to private housing estates.

The main criterion for selection in the design of the automatic control system and its element base is the availability of components of the electric drive - the possibility of their direct purchase in Ukraine, the availability of technical documentation and warranty conditions.

Based on the results of the calculations and the selected element base, the structural scheme of the automatic control system was developed, on the basis of which the modeling of the dynamic modes of the automatic control system on a personal computer was performed.

Key words: asynchronous motor, electric drive, transistor frequency converter, PID pressure regulator, pressure sensor, IGBT transistors, mathematical modeling, automatic control system, Matlab, Simulink, pump installation, water supply network

ЗМІСТ

| | |
|--|----|
| ВСТУП | 6 |
| 1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ..... | 10 |
| 1.1 Насосні установки і частотні перетворювачі для систем водопостачання . | 10 |
| 1.2 Частотне регулювання швидкості асинхронних електроприводів | 15 |
| 1.3 Система підпорядкованого регулювання | 21 |
| 1.4 Висновки до розділу | 23 |
| 2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ..... | 24 |
| 2.1 Конструкція промислової установки та задача автоматизації | 24 |
| 2.2 Вибір електродвигуна для системи водопостачання..... | 27 |
| 2.3 Вибір частотного перетворювача | 31 |
| 2.4 Вибір давача тиску системи водопостачання..... | 38 |
| 2.5 Вибір захисного обладнання | 42 |
| 2.6 Висновки до розділу | 46 |
| 3 РОЗРАХУНКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ..... | 47 |
| 3.1 Аналітичне дослідження системи автоматичного керування | 47 |
| 3.2 Розрахунок ПІД-регулятора для автоматичної системи управління | 51 |
| 3.3 Дослідження моделі лінійної системи без обмежень | 53 |
| 3.4 Дослідження моделі лінійної системи з урахуванням обмежень | 55 |
| 3.5 Дослідження системи автоматизованого управління..... | 58 |
| 3.6 Висновки до розділу | 61 |
| 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ | 62 |
| 4.1 Заходи безпеки при обслуговуванні автоматичної системи керування насосною установкою | 62 |
| 4.2 Вимоги пожежної безпеки при роботі з автоматичною системою керування насосною установкою | 65 |
| ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ | 68 |
| ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ..... | 69 |

ВСТУП

Актуальність теми. Уже протягом тривалого часу відцентрові насоси створюють комфортні умови в життєдіяльності суспільства, приймають участь в значній кількості виробничих процесів. Проведені дослідження свідчать, що майже 27% всієї виробленої на земній кулі електроенергії витрачається на роботу електричного приводу відцентрових механізмів, а основна доля цієї енергії припадає на відцентрові насоси. Більшість електроприводів вказаних механізмів на даний час є нерегульованими [1].

Класичні методи регулювання подачі води в насосних установках полягають у дроселюванні напірних ліній та зміні повної кількості робочих агрегатів. Зазначені методи регулювання дозволяють вирішити технологічні задачі але на практиці не враховують енергетичних проблем подачі води [2].

В більшості випадків електротехнічне та гідравлічне обладнання при проектуванні систем насосних станцій розраховують за максимальними технічними характеристиками (подача, напір води і ін.) водопостачання та водовідведення. Але на практиці, при введенні в експлуатацію таких насосних установок, виявляється, що вони можуть вийти на проектні режими тільки за декілька років. Відповідно, діючі насосні станції дуже часто працюють в режимах, які не відповідають розрахунковим. Варто також врахувати сезонні, тижневі та добові нерівномірні графіки витрат і напорів, що характеризуються непостійним водоспоживанням, в наслідок чого робочі режими насосів виходять поза межі робочих параметрів їх характеристик [3].

Передумовою для створення принципово нової технології подачі води з плавним регулюванням робочих характеристик насосної установки з відсутністю непродуктивних витрат електричної енергії та з значними можливостями зростання точності і ефективності технологічних параметрів роботи систем подачі стала поява на ринку надійного регульованого електроприводу.

Сучасний електропривод складається з електричного двигуна, перетворювача електричної енергії (зазвичай, це перетворювач частоти) та системи керування. На даний час у промисловості та побуті найбільше застосування отримали двигуни змінного і постійного струму. До цього часу в

більшості випадків для регулювання швидкості обертання мало місце використання двигунів постійного струму, а простий і дешевий перетворювач при цьому виконував тільки регулювання напруги. Але двигуни постійного струму є відносно дорогими, маю критичний під час експлуатації щітковий апарат та досить складну конструкцію. Асинхронні двигуни, на відміну від двигунів постійного струму, набули більшого поширення, є відносно недорогими та досить надійними, володіють хорошою експлуатаційною якістю. До недоліків цих двигунів можна віднести регулятори швидкості їх обертання, які у минулому столітті були досить дорогими через складну систему електронного регулювання частоти напруги живлення та і не володіли якістю, необхідною для широкого застосування у промислове виробництво [4].

Регулювання швидкості обертання асинхронних двигунів в широких межах стало можливим внаслідок швидкого розвитку сучасної електроніки та застосуванню дешевих перетворювачів частоти. Це дало поштовх до швидкого росту ринку перетворювачів частоти для асинхронних двигунів внаслідок появи нової елементної бази, зокрема, силових модулів на базі біполярних транзисторів з ізольованим затвором (IGBT-транзистори - Insulated Gate Bipolar Transistor), які працюють на струмах до декількох кілоампер та напругах до декількох кіловольт і розраховані на частоту комутації вище 30 кГц [5].

Використання методу регулювання частоти обертання для зміни витрати води у порівнянні з методом дроселювання дозволило досягнути суттєвого потенціалу енергозбереження. Зараз цей метод отримав широке застосування в турбокомпресорах, насосах і вентиляторах з асинхронними двигунами, живлення яких здійснюється від перетворювачів частоти [6].

Мета і завдання досліджень. Метою цієї кваліфікаційної роботи є розробка системи електроприводу відцентрового насоса із застосуванням сучасної елементної бази. Такий підхід дозволить виконати наступні вимоги:

- зекономити електричну енергію;
- створити умови для гнучкого налаштування електричного приводу при змінних режимах роботи.

Для досягнення мети були поставлені та вирішені такі завдання:

- виконано ознайомлення з процесом та технологією транспортування води;
- виконано аналітичний огляд за цією проблематикою технічної літератури;
- виконано технічне обґрунтування запропонованого принципу управління;
- проведено вибір елементної бази електричного привода з метою забезпечення працездатності системи;
- розроблено функціональну схему системи автоматичного управління;
- виконано математичний опис досліджуваного об'єкта та розробленої системи управління;
- проведено віртуальне моделювання та дослідження системи автоматичного управління в з урахуванням обмежень і без урахування обмежень на ЕОМ.

Об'єктом дослідження є процеси керування електричним приводом насосної станції.

Предметом дослідження є система автоматичного управління енергоощадним електричним приводом насосної станції із забезпеченням мінімального споживання потужності.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в перспективності практичного впровадження запропонованої в кваліфікаційній роботі математичної моделі, процедури прийняття рішень та методики автоматизованого енергозберігаючого керування режимом роботи насосної станції, функціональної структури автоматичної системи технологічним обладнанням насосної станції, які підтверджена приведеними в роботі результатами імітаційного моделювання.

Практичне значення одержаних результатів роботи. Практична цінність запропонованої системи управління полягає у впровадженні асинхронних двигунів із перетворювачем частоти в технологічний процес, що дозволить суттєво знизити витрати електричної енергії та значно підвищити рівень управління процесом водопостачання в комунальному і побутовому секторах. Використання отриманих результатів дозволить скоротити терміни проектування і реалізації подібних систем автоматичного управління та може позитивно позначитися на загальній ефективності їх функціонування.

Апробація результатів магістерської роботи.

Основні положення роботи і її результати доповідалися на VII Міжнародній науково-технічній конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій», 25-26 листопада 20120 р. (м. Тернопіль)

Публікації.

За результатами виконаних досліджень опубліковано 1 тезу доповідей «Математична модель системи управління насосної установки». Актуальні задачі сучасних технологій: зб. тез доповідей міжнар. наук.-техн. конф. молодих учених та студентів, (Тернопіль, 25–26 лист. 2020) // М-во освіти і науки України, Терн. націон. техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін.]: ТНТУ, 2020 – Т.2, С. 129-130.

Структура роботи.

Робота складається зі вступу, 4 розділів, висновків, переліку посилань (39 найменувань).

Загальний обсяг текстової частини: 72 сторінки, 6 таблиць, 34 рисунки.

1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1 Насосні установки і частотні перетворювачі для систем водопостачання

В кваліфікаційній роботі до розгляду приймаємо асинхронний електропривод з відцентровим насосом. Головними елементами такої системи є: насос, електричний двигун, давач тиску, пристрій регулювання. Основну увагу в роботі буде приділено пристрою регулювання швидкості обертання електричного двигуна.

При побудові насосних станцій зазвичай проектують відцентрові насоси. На водопровідних станціях в більшості випадків використовують насоси загального призначення, які можуть перекачувати воду з температурою до плюс 85 з твердими включеннями до 3 грам на літр води і розміром 0,1-0,2 мм. На таких станціях, в основному, монтують горизонтальні насоси типу Д (двосторонній вхід), а при швидкості подачі води 0,08 м³/с - типу К (консольні) [7].

На насосних станціях, які здійснюють підйом води і побудова яких є важкою із-зі близького знаходження ґрунтових вод, знайшли застосування насоси типу В (вертикальні відцентрові). В цьому випадку можна зменшити розмір машинного залу, зекономити на будівництві і підвищити ефективність експлуатації електричних двигунів.

При швидкостях подачі води вище 1 м³/с та тиску до 25 метрів використовують осьові насоси. В системах перекачування побутових відходів зазвичай використовують стічні динамічні (тип СД) або вертикальні (тип СДВ) насоси. Важливим параметром насосної установки є частота обертання його робочого валу та напруга електродвигуна приводу [8].

Основні параметри цих насосів залежать від подачі води, а графіки таких залежностей є характеристиками насоса. Насоси відцентрового і осьового типу автоматично спрацьовують на зміну подачі, тобто відповідно змінюючи тиск. Характеристики всіх насосів будують за результатами експериментальних випробувань, зокрема для певної частоти обертання робочого валу. Точка характеристики, яка рівна максимальному значенню коефіцієнта корисної дії

є оптимальною режимною точкою, відповідно її подача і тиск є оптимальними параметрами насоса, що відображаються в позначенні насоса.

Точка дійсного режиму роботи насоса є його робочою точкою, але не завжди відповідає оптимальній, хоча має бути близькою до неї. Враховуючи допустиме зменшення коефіцієнта корисної дії, на характеристиках зазвичай позначають робочу частину, де повинні знаходитися робочі точки насоса.

На даний час при спорудженні насосних станцій використовують наступні типи насосів [9]:

1) *відцентрові консольні насоси* (тип *K* - без двигуна, з'єднується з двигуном пружною муфтою і тип *KM* - моноблочне виконання). Ці насоси є горизонтальними, одноступінчатими, з однобічним вхідним робочим колесом та консольним розташуванням на кінці валу насоса;

2) *відцентрові насоси з двостороннім підведенням води до робочого колеса*. Насоси типу *D* є горизонтальними, одноступінчастими, з напівспіральною подачею води. Вертикальні відцентрові насоси типу *B* за своєю конструкцією є подібними до консольних і розташовуються вертикально. Двигуни приводів насосів встановлюються над насосами на балках для зменшення робочої площі машинного залу;

3) *динамічні насоси для перекачування стічних рідин* (тип *СД*) – представляють собою відцентрові насоси з робочим колесом одностороннього входу і поділяються на горизонтальні і вертикальні одноступінчаті, напівзанурювальні та двоступеневі;

4) *грунтові насоси* - при потребі їх можна встановлювати в насосних станціях систем відведення побутових рідин. Насоси типу *Гр* є відцентровими консольними одноступінчатими, подібними до насосів типу *K* і призначені для перекачування гідросумішей з твердими домішками частинок ґрунту. Насоси типу *ГрУ* мають збільшений прохідний перетином та нижчі динамічні характеристики, ніж насоси типу *Гр*.

Схема установки подачі питної води за допомогою насосів, що приведена на рис. 1.1, передбачає наявність накопичувальної ємності, яку встановлюють на підвищенні. Водонапірні вежі або резервуари дозволяють

створити в водопровідній мережі потрібний тиск та запас води, щоб регулювати роботу насосів [10].

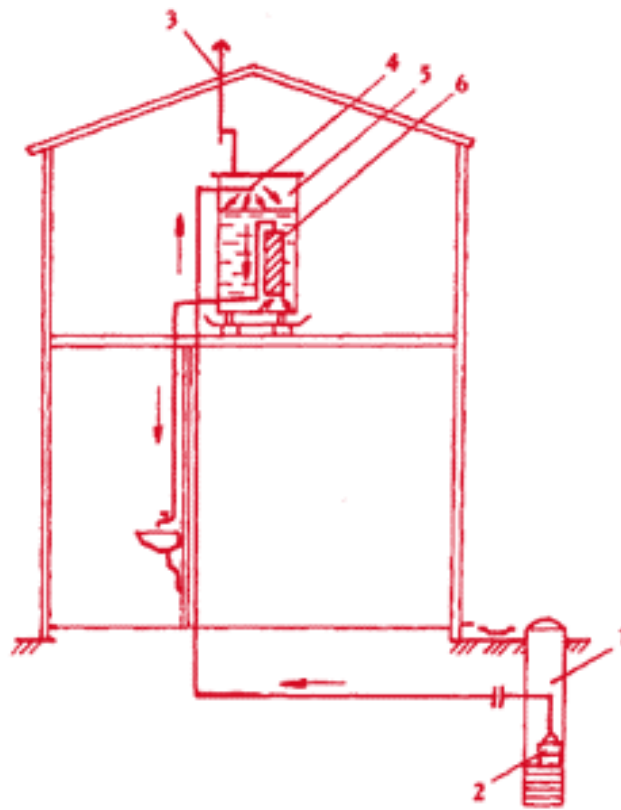


Рисунок 1.1 – Схема установки накопичувальної ємності:
1 - свердловина; 2 - насос; 3 - труба витяжна; 4 - розподільчач;
5 - бак накопичувальний; 6 - фільтр

Так як для водопостачання одного будинку встановлювати водонапірний бак є економічно не вигідно, то його встановлюють для групи будинків. Водонапірна вежа має в своєму складі бак для води, каркас вежі, накриття та систему трубопроводів для подачі і відведення води. Каркас вежі виготовляють з монолітного залізобетону, цегляної кладки, металу або деревини. В даний час розповсюджені металеві вежі промислового виробництва (типу Рожновського). Їх монтують на залізобетонному фундаменті, баки виготовляють круглої металевої форми. Розмір бака залежить від умов роботи насосної установки, характеру і режиму водоспоживання. Розмір бака повинен бути таким, щоб в години малого навантаження зібрати надлишок води, поданої насосом, а в години найбільшого навантаження - перевищення подачі води насосом - ліквідувати нестачу води. Накриття башти використовується для захисту від погодних

впливів, його виготовляють легким в каркасній формі. Накриття також захищає воду в резервуарі зимою від замерзання. Гідроколону виконана у вигляді металевого порожнистого циліндра з листової сталі, з'єднаної ребрами жорсткості. Конструкція циліндра наповнюється водою, де верхня частина є регулювальною ємністю стандартного напірної ємності, а нижня - підтримуючи каркасом у якості запасного резервуара.

Водонапірні резервуари монтують на несучі конструкції, які витримують задані розрахункові навантаження. Хоча вони і є простої конструкції, проте це вже застарілим рішенням, так як накопичення води в резервуарах вимагає їх періодичної чищення та знезараження. У випадку встановлення накопичувального резервуару на горищі будинку будемо мати додаткове навантаження на його конструктивні елементи. Отже, використання водонапірної вежі для приватного будинку є економічно не вигідним [11].

Сучасні технології пропонують варіант, коли система водопостачання для приватних житлових будинків має наступне обладнання [12]:

- занурювальний або всмоктуючий насос;
- система автоматичного управління;
- бак-акумулятор;
- система автоматичного захисту;
- системи очистки води.

Бак-акумулятор є сталеву ємністю з мембраною всередині, що розділяє ємність на дві частини. Суть роботи полягає у підключенні насоса до електромережі насос, після чого він закачує воду в водяну камеру. Об'єм повітря в повітряній камері починає зменшуватися пропорційно до об'єму води, яка поступає, а тиск в баку-акумуляторі відповідно зростає. Після перевищення тиску в баку-акумуляторі тиску відключення насоса, встановленому на реле тиску, насос відключається і буде у відключеному стані доти, поки тиск в системі не впаде внаслідок розбору - тоді насос знову вмикається і т.д.

Перевагою бака-акумулятора є можливість його монтажу майже будь-де на території житлового будинку на відміну від накопичувальних ємностей, які необхідно розміщувати на найбільшій висоті, крім того, розміри баків є не дуже великими. Такі насосні станції монтуються зазвичай в приміщенні, а

всмоктуючий трубопровід з клапаном встановлюється біля джерела з водою. Система автоматичного управління керує включенням і виключенням насоса при наявності або відсутності водорозбору. Система автоматичного захисту захищає насос від роботи на холостих оборотах, підвищення напруги і ін. Тиск води встановлюється і підтримується автоматично за допомогою вбудованого частотного перетворювача. Така установка є максимально комфортною і при потребі подачі води не потрібно самому вмикати насос.

На ринку насосів є популярним обладнання німецької фірми GRUNDFOS, яке є системою водопостачання з використанням насосного обладнання різної продуктивності на будь-які джерела води (рис. 1.2). Після монтажу насосної установки можна здійснювати водопостачання по типу централізованого без втручання споживача.



Рисунок 1.2 - Насосна станція фірми GRUNDFOS

На даний час для потреб власників житлових будинків і котеджів на ринку пропонують унікальні станції водопостачання MG, які мають в своєму складі самовсмоктуючий насос, мембранний напірний бак, автоматика управління та захисту в одному компактному агрегаті [12, 13]. Призначення таких насосних станцій полягає у водопостачанні індивідуального житлового будинку та перекачуванні води з допомогою компактною і легкою в монтажі установки. Станція водопостачання MG дозволяє створити додатковий тиск при перекачуванні води з накопичувальних резервуарів або водопровідної

мережі. МГ виконано з корозостійких матеріалів і може при необхідності монтуватися на відкритому повітрі, має обладнання для автоматичної роботи. Режими роботи станції відображаються при допомозі світлодіодів на передній контрольній панелі (рис. 1.3).



Рисунок 1.3 - Панель управління насосною станцією МГ

1.2 Частотне регулювання швидкості асинхронних електроприводів

Частотний метод регулювання швидкості обертання двигунів в широких межах в електроприводі змінного струму є перспективним методом, оскільки він дозволяє отримати від простої конструкції асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором всі потрібні механічні характеристики в технологічному виробництві, зокрема, високі частоти обертання без значних втрат електроенергії на перетворення [14].

При використанні частотного керування швидкістю асинхронного двигуна потрібно таким чином змінювати частоту f_1 і напругу живлення U_1 , щоб уникнути насичення магнітної системи та утримати задану перевантажувальну здатність двигуна. Магнітний потік двигуна при неврахуванні падіння напруги в обмотці статора, можна визначити за формулою:

$$\Phi = U_1 / (4,44 \cdot W_1 \cdot K_{w1} \cdot f_1) , \quad (1.1)$$

де f_1, U_1 – частота і напруга живлення статорної обмотки;

W_1 – к-ть витків обмотки статора;

K_{w1} – коефіцієнт обмотки статора.

Для того, щоб отримати низький питомий масовий габаритний показник на одиницю потужності двигуна, потрібно його номінальний потік Φ_n при проектуванні встановити приблизно рівним до потоку насичення. При збільшенні потоку насичення відносно номінального може викликати насичення магнітної системи двигуна. Номінальному потоку насичення відповідають паспортні частота f_{1n} і напруга живлення U_{1n} .

Якщо зміною частоти f_1 здійснювати управління швидкістю, то її відповідно до виразу (1.1) можна тільки збільшувати відносно номінальної частоти f_{1n} , щоб уникнути насичення магнітного кола електродвигуна.

Збільшення частоти викликає пропорційне зростання синхронної швидкості ω_c

$$\omega_c = \frac{2\pi f_1}{p}$$

та до зменшення частоти критичного моменту M_k пропорційно квадрату

$$M_k = \pm \frac{3U_1^2}{2\omega_c \left[\pm R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_k^2} \right]},$$

оскільки індуктивний опір обмоток статора і ротора та синхронна швидкість мають залежність від частоти:

$$\begin{aligned} X_1 &= 2\pi f_1 L_1 \\ X_2' &= 2\pi f_1 s L_2' \end{aligned}$$

На робочій ділянці жорсткість механічних характеристик є незмінною, оскільки пропорційному зростанню синхронної швидкості відповідає пропорційне спадання критичного ковзання. Графіки штучних механічних характеристик зображені на рис. 1.4.

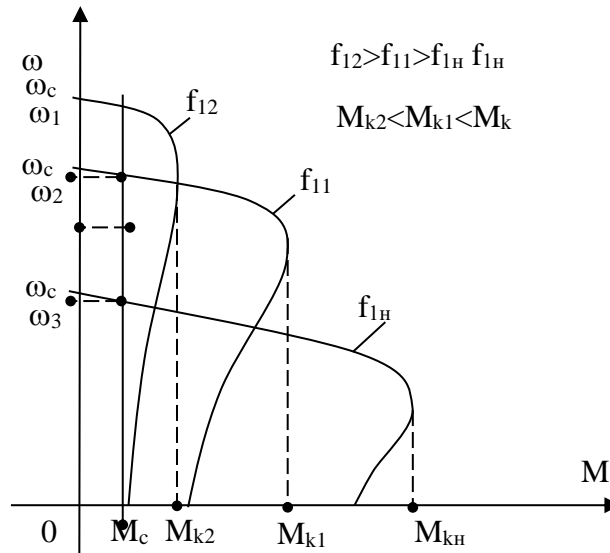


Рисунок 1.4 - Штучні механічні характеристики залежності критичного моменту від синхронної швидкості

Перевагою цього методу є повільна зміна швидкості при постійній жорсткості характеристик. Недоліком є зменшення перевантажувальної здатності електродвигуна та можливість керування його швидкістю тільки вище номінальної.

Якщо не брати до уваги активний електричний опір статора R_1 , то критичний момент електродвигуна буде залежати в квадраті від частоти і напруги статора:

$$M_k = K \frac{U_1^2}{f_1^2}, \quad (1.2)$$

де K – коефіцієнт пропорційності.

Звідси, за законом Костенко, можна вивести основний закон частотного управління швидкістю асинхронного електродвигуна [15]:

$$\frac{U_1}{f_1} = \frac{U_{1n}}{f_{1n}} = \text{const}. \quad (1.3)$$

Відповідно до цього закону частота змінюється пропорційно до зміни напруги, що дозволяє забезпечити постійне значення критичного моменту і постійний номінальний магнітний потік при великому діапазоні регулювання швидкості: від нуля і до найбільшої. Дуже часто в якості максимальної швидкості приймають її номінальну швидкість, що відповідає номінальній

напрузі статора. Збільшення напруги за номінальну можна обмежити за рахунок електричної стійкості ізоляції обмотки.

Графіки штучних механічних характеристик з паралельними робочими ділянками приведено на рис. 1.5.

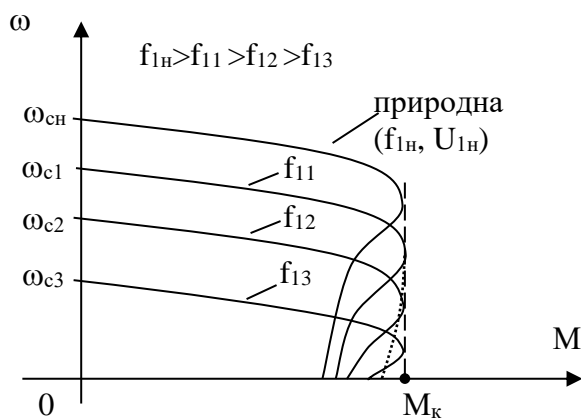


Рисунок 1.5 - Штучні механічні характеристики з паралельними робочими ділянками

При малих швидкостях спад напруги в колі статора, яку ми не враховуємо при представленні закону керування, буде аналогічною напругою живлення статора, що викликає зменшення критичного моменту (це показано кривою лінією з точок на рис. 1.4). Щоб усунути цей недолік на низьких швидкостях, напругу слід зменшувати в меншій степені, ніж за законом (1.3) або підтримувати постійним співвідношення електрорушійної сили статора до частоти за допомогою замкненої системи управління - тоді відповідно до (1.1) не буде змінюватися магнітний потік. Варто врахувати, що при частоті, близькій до нульової, тобто під час пуску двигуна, необхідне початкове значення напруги U_{10} , щоб створити магнітний потік і відповідний момент двигуна. З цією метою пуск стартує з початкової частоти $f_{10} = 2,5-5$ Гц та відповідного значення напруги і пропорція трохи зростає (рис. 1.6). В цьому випадку параметр U_{10} можна встановлювати автоматично або вручну, зокрема, враховуючи значення динамічного моменту для створення необхідного прискорення електроприводу.

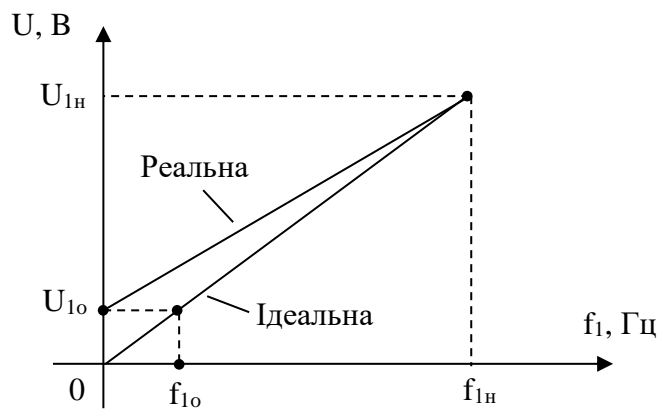


Рисунок 1.6 - Графічні залежності напруги від частоти

Для здійснення способу керування дуже часто використовують перетворювачі частоти з колом постійного струму, які мають керований випрямляч, фільтр, автономний інвертор та систем управління випрямлячем, інвертором і електричним приводом в цілому. Величина напруги статора U_1 змінюється керованим випрямлячем, а частоти f_1 - автономний інвертор. Для малих потужностей замість керованого випрямляча можна використати некерований, а за допомогою автономного інвертора з системою широтно-імпульсної модуляції одночасно здійснюється регулювання напруги і частоти. Автономний інвертор служить джерелом струму або напруги - відповідно є різні види замкнутих систем керування швидкістю асинхронного електродвигуна.

Зазначений спосіб частотного управління швидкістю асинхронного електродвигуна є базовим. Перевагою цього способу є повільна зміна швидкості: від нуля до номінальної при постійній жорсткості механічної характеристики та перевантажувальній здатності електродвигуна. Межі управління можуть включати від 5 до 10 для розімкнутих систем та більше 1000 для замкнутих систем. Цей спосіб отримав назву "управління в першій зоні з постійним моментом двигуна". Його недоліком є відносна складність та висока вартість перетворювача частоти.

Для механізмів струмового навантаження, зокрема вентиляторів, насосів, в яких статичний момент пропорційний квадрату швидкості ($M_c \cong \omega^2$), найефективнішим вважається закон керування

$$\frac{U_1}{f_1^2} = \frac{U_{1н}}{f_{1н}^2} = \text{const}, \quad (1.4)$$

де критичний момент електродвигуна спадає пропорційно до квадрату швидкості. При цьому зменшується магнітний потік і споживання реактивної енергії та відображається режим статичного моменту (рис. 1.7).

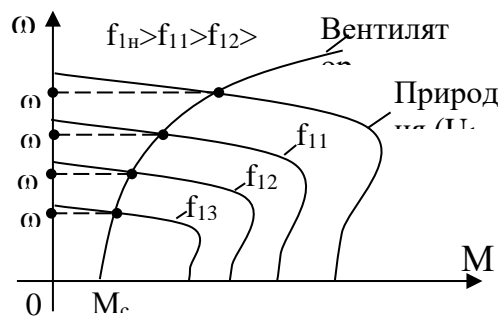


Рисунок 1.7 - Графічні залежності статичного моменту від синхронної швидкості

Для того, щоб забезпечити повну потужність електродвигуна та зменшити магнітний потік і відповідно зменшити критичний момент, для керування його швидкістю використовують закон управління:

$$\frac{U_1}{\sqrt{f_1}} = \frac{U_{1н}}{\sqrt{f_{1н}}} = \text{const} . \quad (1.5)$$

У цьому випадку момент електродвигуна буде змінюватися обернено пропорційно, а синхронна швидкість буде змінюватися пропорційно частоті, відповідно потужність, як її добуток, буде залишатися постійною. Графіки штучних механічних характеристик приведені на рис. 1.8. Напруга в даній ситуації не зростає вище номінальної і при подальшому зростанні частоти вона залишається постійною.

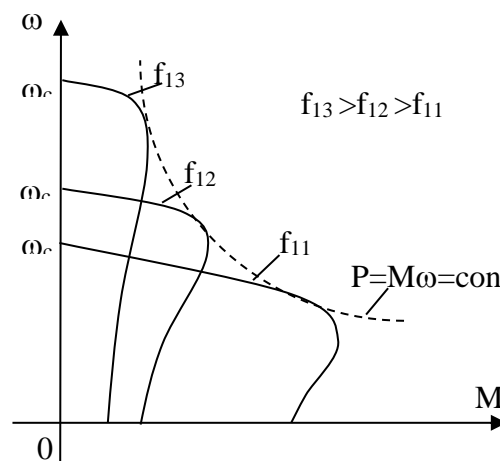


Рисунок 1.8 - Графічні залежності моменту двигуна від синхронної швидкості

Частотні методи управління швидкістю асинхронного електродвигуна, які були розглянуті в цьому розділі, є найбільш розповсюдженими.

1.3 Система підпорядкованого регулювання

На теперішній момент в електричному приводі при проектуванні систем регулювання отримала широке застосування методика підпорядкованого регулювання. Суть її полягає в тому, що система поділяється на декілька контурів, в кожному з яких присутня одна постійна часу з великим значенням (рис. 1.9).

Відповідно до заданих параметрів задача кожного з контурів полягає в компенсації наявної постійної часу та передачі контуру заданих динамічних і статичних властивостей. Процедуру оптимізації здійснюють спочатку із внутрішнього контуру, а далі - до зовнішніх. В процесі виконання процедури оптимізації проводять вибір параметрів послідовних коригувальних ланок (регуляторів). Розглянута система ще отримала назву системи з послідовною корекцією. У цій системі початковий сигнал регулятора кожного контуру є сигналом завдання для внутрішнього підпорядкованого йому контуру. Зазначений принцип регулювання дозволяє знизити швидкодію кожного наступного контуру, яка порівнюється з швидкодією попереднього. В такій системі рекомендується використовувати не більше трьох підпорядкованих контурів.

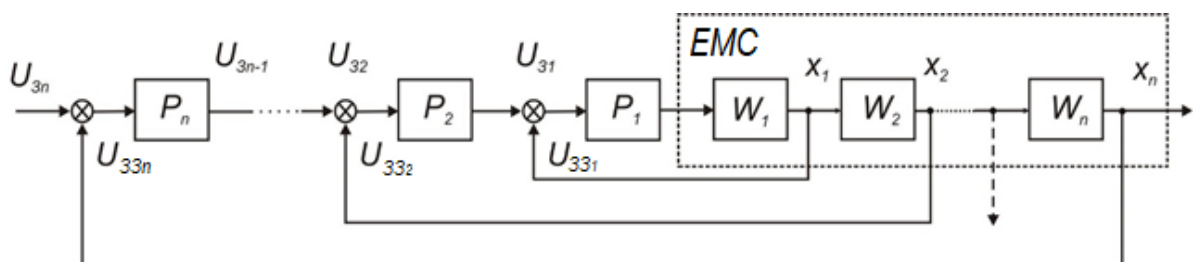


Рисунок 1.9 - Структурна схема системи з підпорядкованим регулюванням координат

До переваг системи підпорядкованого регулювання можна віднести можливість обмеження прохідних регульованих координат при обмеженні на

регуляторі напруги, а також стабільність характеристик перехідних процесів, які для заданого налаштування контурів зазвичай мають подібний вигляд.

Розглянуту систему в процесі функціонування не потрібно досліджувати на стійкість, оскільки параметри динамічних режимів задано наперед.

В цій кваліфікаційній роботі запропоновано виконати проектування системи управління на базі частотного перетворювача з керованим випрямлячем і автономним інвертором на *IGBT*-транзисторах з скалярною широтно-імпульсною модуляцією [16].

1.4 Висновки до розділу

Таким чином, за підсумком розглянутих готових технічних рішень та проведеного аналітичного огляду доступних літературних джерел можна сформулювати наступні висновки.

1. Для водопостачання приватного житлового сектору найоптимальнішим варіантом буде використання сучасної компактної насосної станції, оскільки водонапірні вежі є економічно не вигідними.

2. Для керування насосною станцією на базі асинхронного електродвигуна необхідно застосувати найбільш розповсюдженими частотні методи управління швидкістю.

3. При розробці системи керування насосною станцією пропонується застосувати частотний перетворювач з керованим випрямлячем і автономним інвертором на *IGBT*-транзисторах.

2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

2.1 Конструкція промислової установки та задача автоматизації

Об'єктом керування в кваліфікаційній роботі та основним елементом системи проектування виступає насос, основні типи, характеристики та конструкції якого були розглянуті в Аналітичному розділі. Зокрема, ми будемо в проектувати насосну установку для водопостачання декількох індивідуальних житлових будинків, тобто групове автономне водопостачання.

Будь-яка автономна система водопостачання складається з водозабору та водопровідної мережі. В приватних житлових будинках в якості схем постачання води найбільше розповсюдження мають колодязі і свердловини [11]. Стандартна водопровідна мережа комплектується насосною установкою (рис. 2.1), системою управління подачі води та трубами.



Рисунок 2.1 – Приклад насосної установки

У випадку, коли якість води має відхилення від санітарних нормативів, за необхідності встановлюють блоки очищення води. На рис. 2.2 наведено стандартну схему водопостачання приватного будинку при подачі води з свердловини.

Головна задача автономної системи водопостачання – надати споживачеві комфортні умови при споживанні води. Проведемо аналіз обладнання, яке входить в склад цієї схеми. Головним елементом будь-якої системи водопостачання є насос. У нашому випадку маємо свердловину і для водопостачання потрібно використати глибинні насоси. Якщо споживач має колодязь з водою,

то тут потрібно використати самовсмоктуючий поверхневий насос, які зазвичай розміщують в підвалі будівлі. До обладнання схеми водопостачання входять: *зворотний клапан*, який представляє собою гідравлічний елемент для пропускання води тільки в одному напрямку; *манометр*, який використовується для визначення тиску в системі в точці його монтажу; *реле тиску* служить для автоматичного включення насоса, коли потрібна вода, і автоматично відключає його, якщо вода не потрібна; *гідроаккумулятор* – представляє собою бак для води з еластичною мембраною, в одній частині якого знаходиться вода, а в другій знаходиться стиснене повітря. В гідроаккумуляторі знаходиться певна кількість води під тиском, який забезпечує необхідний тиск в системі при вимкненому насосі.

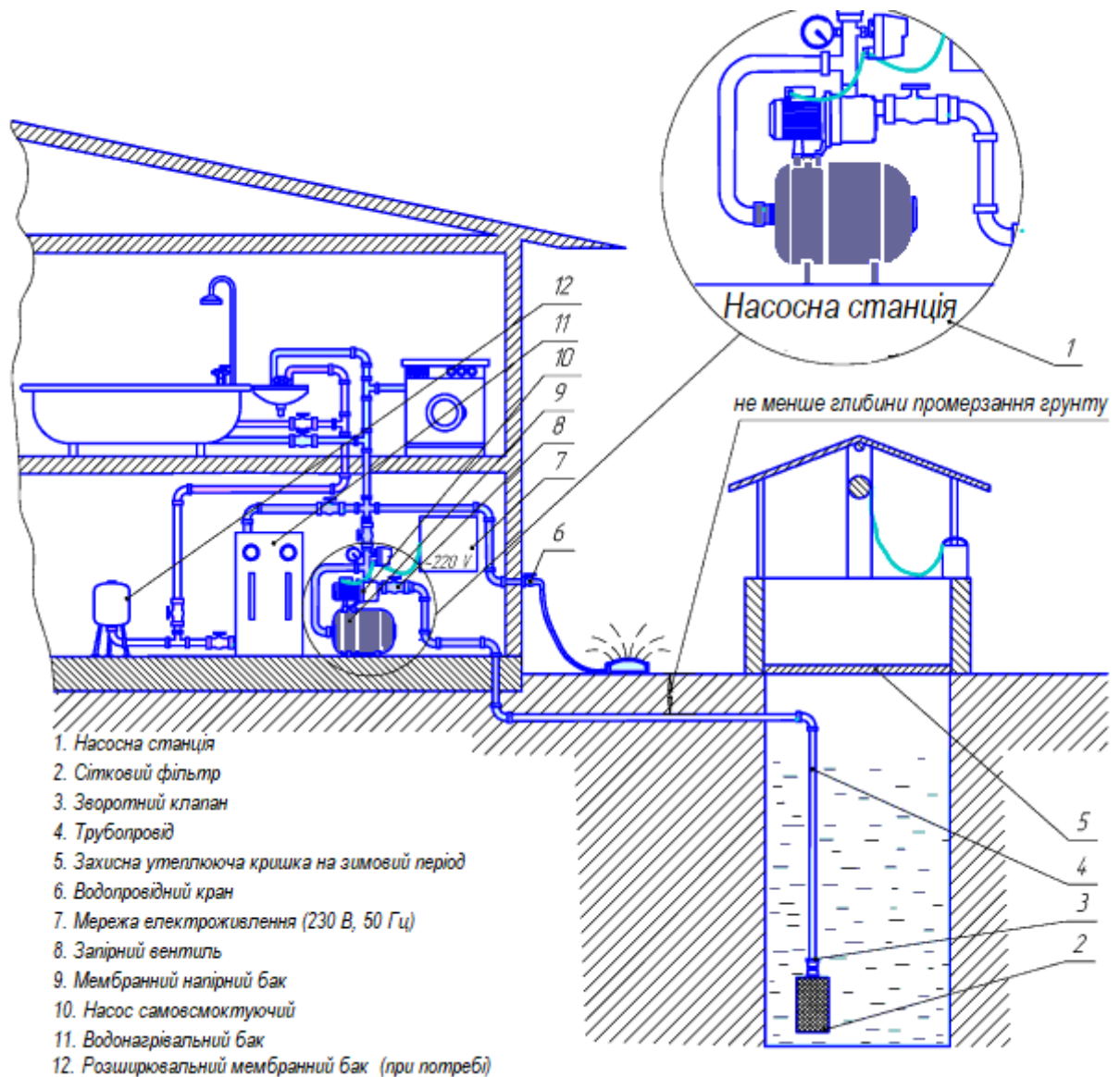


Рисунок 2.2 - Схема водопостачання зі свердловинним насосом і системою автоматичного керування

Варто відмітити, що в теперішніх умовах сучасні індивідуальні приватні будівлі вже не можна розглядати у вигляді окремих житлових будинків. Біля сучасних малих і великих міст споруджується багато котеджних поселень, які необхідно забезпечити комфортними умовами цивілізації, в тому числі своєчасною і нормальною подачею холодної води. Враховуючи ці вимоги та запити, в місця забудови таких поселень здійснюють централізоване підведення електроенергії, газу, води та каналізації.

Основна частина таких будинків є на декілька поверхів (три – чотири), на кожному поверсі зазвичай є санвузол, в будинку є кухня, ванна кімната, протипожежна система, деякі ділянки будинків обладнані басейном, мають систему автоматичного поливу, тобто всі вони є споживачами холодної води. Такі споживачі, як правило, використовують систему внутрішнього водопроводу, яка є частиною технічної конструкції забудови.

Загально прийнято, що внутрішню водопровідну систему поділяють на господарсько-питну, виробничу та протипожежну. Такі системи складаються з вводу в житлову будівлю, водомірні вузли, розвідну мережу, окремі стояки, підведення до санітарних вузлів і технологічних установок та арматуру, яка поділяється на регулюючу, водорозбірну, змішувальну і запірну [8].

Приймаючи до уваги проведений аналітичний огляд літератури в першому розділі кваліфікаційної роботи та напрацьований практичний досвід роботи української фірми «Епос» (м. Харків) у галузі забезпечення холодною водою приватних будинків, вибираємо для реалізації нашого проекту її насос типу КМ (рис. 2.3) з параметрами, які приведені в табл. 2.1 [9].

Таблиця 2.1 - Параметри насосу КМ 50-32-125

| Продуктивність, м ³ /год | Напір, м | ккд, % | Кавітаційний запас, м |
|-------------------------------------|----------|--------|-----------------------|
| 12,5 | 20 | 0,5 | 3,5 |



Рисунок 2.3 - Насос КМ 50-32-125

Такий вибір пояснюється тим, що в системах водопостачання невеликих поселень та котеджних містечок уже недостатньо використання насосної установки тільки для забезпечення напору. Установки водопостачання для таких об'єктів повинні забезпечувати регулювання тиску у водонапірній мережі, тобто забезпечувати зниження витрат електроенергії, води, а також звести до мінімуму кількість і габарити обладнання водопостачання.

2.2 Вибір електродвигуна для системи водопостачання

Відомо, що під електричним приводом розуміють електромеханічну систему для приведення в рух робочих органів будь-якого технічного пристрою, і який має в своєму складі електричний двигун та пристрої передачі, перетворення і керування [17]. *Електричний двигун* є основною складовою електроприводу і здійснює перетворення електричної енергії від енергосистеми в механічну енергію та формує задані види руху робочих механізмів разом з пристроєм передачі.

Пристрій передачі служить для перетворення одних видів руху в інший та передачі механічної енергії від електричного двигуна до виконавчих органів машини.

Пристрій перетворення при необхідності використовується для перетворення одного виду електроенергії в інший і для управління потоком енергії в технологічному процесі з метою мінімізації втрат електричної енергії.

Керуючий пристрій призначений для виконання заданих законів управління потоками електричної енергії і рухом виконавчих механізмів технічного обладнання.

Функціональна схема системи автоматизованого управління приведена на рис. 2.4. Пристрій перетворення (ПП) підключено до джерела електроенергії (ДЕ) змінного струму, яке має не керовану напругою U_c , струм I_c та частоту f_c . На виході ПП маємо електричну енергію з іншими параметрами - U , I і f - вона передається на вхід електричного двигуна (ЕД), який здійснює перетворення електричної енергії W_e в механічну енергію W_m з моментом на валу електричного двигуна M_d і обертовою частотою ω_d . Після механічного передавального пристрій (МПП) потік її енергії W перетворюється в енергії W_p та поступає на робочий орган машини (РОМ) з координатами крутного моменту M або сили F , частота обертання ω , або швидкості поступального руху v .

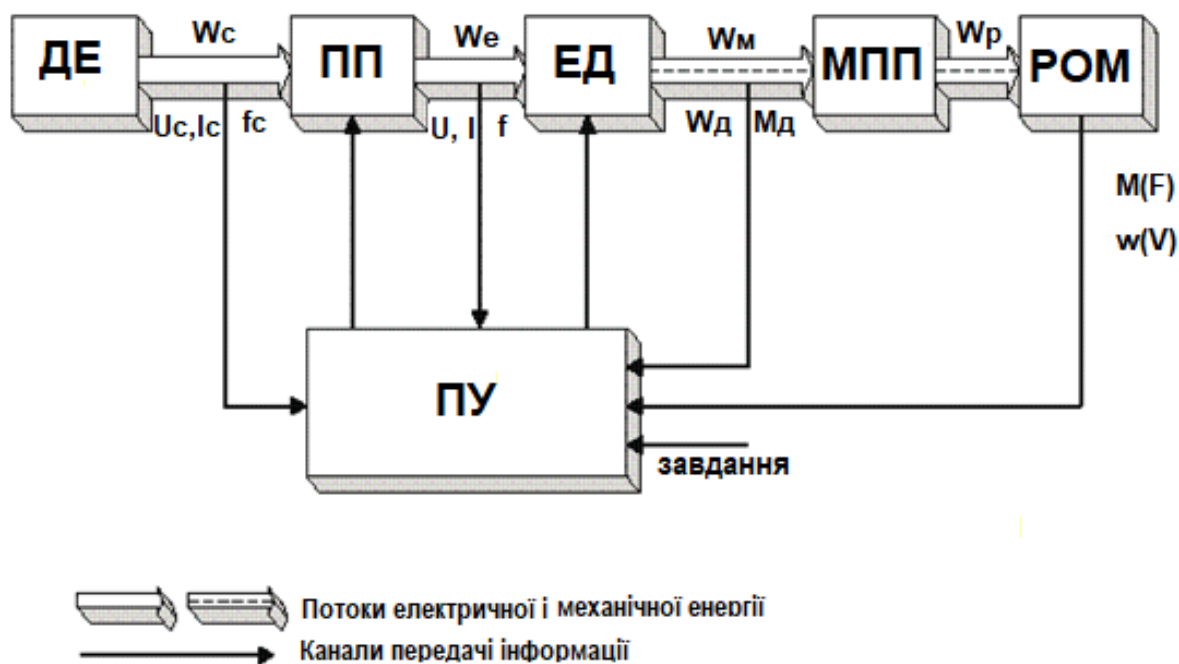


Рисунок 2.4 - Функціональна схема системи автоматизованого управління

Перетворення енергії з електричної мережі W_c в енергію W_p викликає втрати, величина яких залежить від типу і якості всіх складових електроприводу та від законів управління потоками енергії, які формуються пристроєм управління (ПУ) - здійснює керує деякими координатами ПП, ЕД і РОМ при порівнянні поточних і заданих величин цих координат. Процес управління триває до того часу, поки сигнал помилки між поточними і заданими значеннями координат не досягне заданого значення. Можна сказати, що ПУ дозволяє за допомогою зворотного зв'язку реалізувати принцип управління за відхиленням від норми. Отже, електричний привод представляє систему елементів, кожен з яких може бути предметом самостійного вивчення. Відповідно, основні властивості електричного приводу варто досліджувати в системі, яка об'єднує всі його елементи та здійснює приведення в рух робочих елементів машини.

Як уже згадувалось, головним елементом в системі електроприводу є електричний двигун - електрична машина постійного або змінного струму. Застосування електричних двигунів змінного струму дозволяє підвищити надійність електричного приводу та зменшити капітальні і експлуатаційні витрати, що визначає та надає суттєву перевагу при їх використанні.

Виконаємо розрахунок потрібної потужності електричного двигуна для нашої системи. Момент опору M_o , який створюється на валу електричного двигуна при роботі насоса, можна визначити за формулою:

$$M_o = k_3 g \rho Q (H_c + \Delta H) / (\eta_n \omega_n \eta_i) \quad (2.1)$$

де Q – продуктивність насоса, м³/с;

H_c – статичний напір, м;

ΔH – втрати напору в трубопроводі, м;

$g = 9,8$ – прискорення вільного падіння, м/с²;

ρ - густина робочої рідини, кг/м³;

k_3 – коефіцієнт запасу;

η_n – коефіцієнт корисної дії насоса;

ω_n – швидкість насоса, рад/с.

$$M_o = 1,1 \cdot 9,81 \cdot 1000 \cdot 12,5(20 + 6) / (0,5 \cdot 314 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 3600) = 6,2 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Знайдемо розрахункову потужність електричного двигуна за формулою:

$$P_{розр} = k_3 M_o \cdot \omega_{вст}, \quad (2.2)$$

$$P_{розр} = 1,3 \cdot 6,2 \cdot 314 = 2143 \text{ Вт}.$$

Вибираємо зі стандартного ряду найближчий за потужністю електричний двигун 2,2 кВт. Це також підтверджується тим фактом, що фірма «Епос», яка виробляє насоси для даної насосної установки, пропонує встановити двигун потужністю 2,2 кВт. Вибираємо асинхронний електричний двигун українського виробника, зокрема київського ТОВ «Вірол-Груп» АІС90-Л2 (рис. 2.5) [18].

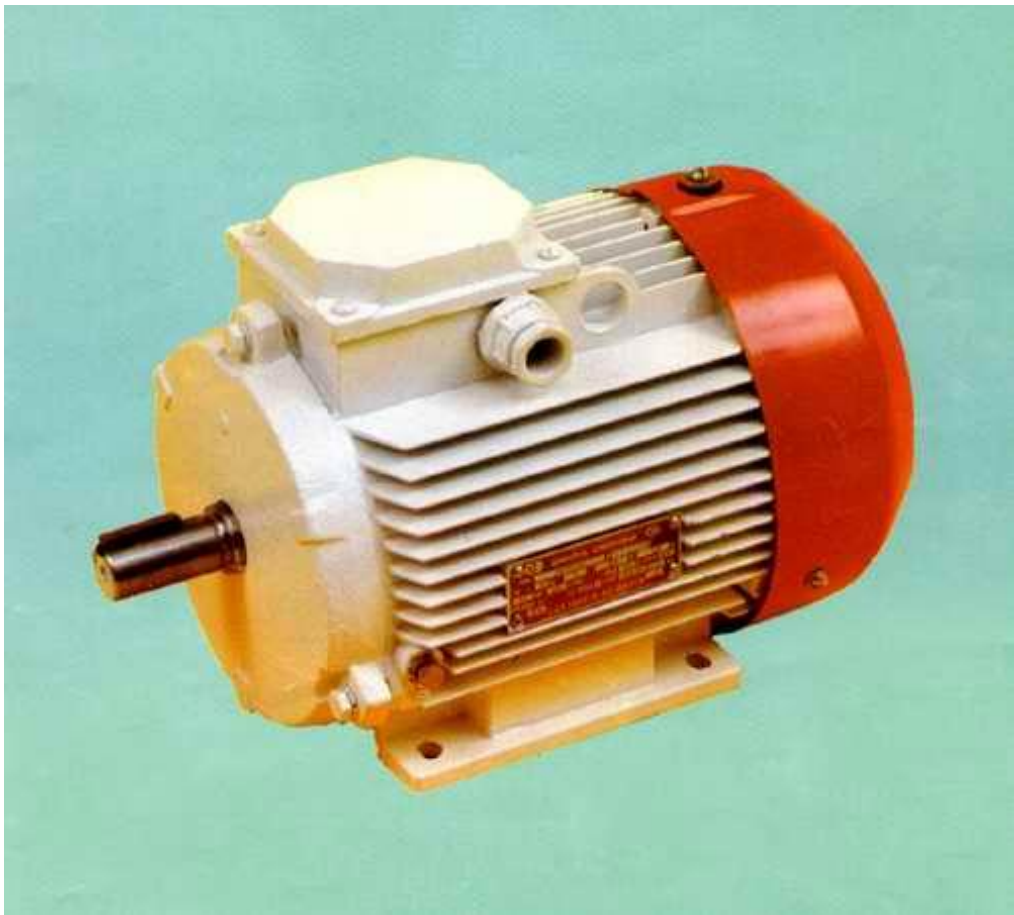


Рисунок 2.5 – Асинхронний двигун АІС90-Л2

В табл. 2.2 приведено технічні характеристики асинхронного двигуна АІС90-Л2.

Таблиця 2.2 – Технічні дані електродвигуна АІС90-Л2

| | | |
|---|-------------------------------|--------|
| Номінальна потужність | $P_{ном}$, кВт | 2,21 |
| Фазна напруга | $U_{фн}$, В | 230 |
| Синхронна частота обертання | n_n , об/хв | 2845 |
| Ковзання | $S_{ном}$, % | 5,5 |
| Критичне ковзання | S_k , % | 36 |
| Коефіцієнт корисної дії | η_n , % | 85 |
| $\cos \varphi$ | | 0,85 |
| $m_n = M_n/M_{ном}$ | | 2,2 |
| $m_n = M_{min}/M_{ном}$ | | 1,5 |
| $m_k = M_k/M_{ном}$ | | 2,61 |
| $i_n = I_n/I_{ном}$ | | 6,52 |
| Опір індуктивний контуру намагнічування | X_μ , о. е. | 2,51 |
| Опір активний статора | $R'1$, о. е. | 0,086 |
| Опір індуктивний статора | $X'1$, о. е. | 0,048 |
| Опір активний ротора | $R''2$, о. е. | 0,052 |
| Опір індуктивний ротора | $X''2$, о. е. | 0,083 |
| Момент інерції електричного двигуна | $J_{д,р}$, кг·м ² | 0,0023 |

2.3 Вибір частотного перетворювача

Перетворювальний пристрій виконує функцію перетворення параметрів електроенергії мережі живлення до значень, що забезпечують нормальну роботу приводного електродвигуна та функцію дозування підведеної до нього електричної енергії для регулювання його швидкості. В якості перетворювального пристрою зазвичай використовують перетворювач частоти на базі автономного інвертора напруги з скалярною широтно-імпульсною модуляцією на IGBT-транзисторах.

При виборі частотного перетворювача для реалізації проекту кваліфікаційної роботи були поставлені такі вимоги:

- стабільна висока надійність;

- простота системи управління з дотриманням величини вихідного струму, напруги та функціональних можливостей;

- невелика вартість перетворювача в діапазоні необхідної потужності.

З урахуванням поставлених вимог був вибрано перетворювач частоти Micromaster 420 (рис. 2.6, табл. 2.3) фірми Siemens, який дозволяє забезпечити наступні режими роботи та управління приводних машин і механізмів [19]:

- плавний пуск;

- тривалу роботу в заданому діапазоні частот обертання і навантажень;

- реверсний режим роботи;

- режим гальмування і режим зупинки;

- захист електричного і механічного обладнання в аварійних і позаштатних режимах.

Вибраний частотний перетворювач володіє такими властивостями:

- високою надійністю статичних і динамічних характеристик;

- достатніми енергетичними параметрами;

- гнучким налаштуванням робочих характеристик і режимів;

- доступним інтерфейсом та адаптивністю до роботи з іншими системами високого рівня управління і автоматизації;

- простою монтажною схемою та простим налаштуванням.



Рисунок 2.6 – Частотний перетворювач Micromaster 420

Таблиця 2.3 – Основні параметри і характеристики Micromaster 420

| | | |
|--|-------------|-----------------|
| Номинальна потужність, кВА | 3 | |
| Параметри мережі живлення: | число фаз | 3 |
| | напруга, В | 380, +10%, -15% |
| | частота, Гц | 50 ± 2 |
| Параметри вихідної напруги: | число фаз | 3 |
| | напруга, В | 380 ± 2 |
| | частота, Гц | 50 ± 0,5% |
| Робочий діапазон регулювання частоти, Гц | 5-50 | |
| Робочий діапазон регулювання напруги, В | 0-380 | |
| Коефіцієнт потужності, не менше | 0,98 | |
| Коефіцієнт корисної дії, не менше | 95 | |

На даний час знайшли застосування стандартні засоби рішення при побудові систем управління електроприводом, які базуються на використанні комплексу MCS-96 фірми Intel, що добре себе проявив у пристроях потужністю від 15 кВт і вище. В електроприводах меншої потужності вони будуть дещо завеликими, особливо це проявляється в приводах потужністю до 15 кВт, де ціна системи управління суттєво впливає на загальну ціну виробу. Отже, бачимо, що завдання створення системи управління високої якості, надійності і відносно дешевої є актуальним питанням в цьому діапазоні потужності. Відповідно постає питання в використанні такого контролера, який би поєднував і функціональну повноту для реалізації управління асинхронним двигуном і низьку ціну при гарантованій надійності. Всім цим властивостям відповідає серія PIC16C7x від фірми Micro-CHIP сімейства КМОП мікроконтролерів і має характеристики RISC-процесора. Всі команди складаються з одного слова шириною 14 біт і виконуються за один цикл, а команди переходу - за два цикли.

Архітектура процесора базується на концепції роздільних шин і комірок пам'яті для даних та комірок пам'яті для команд. Шина даних і оперативний пристрій пам'яті мають ширину 8 біт, а програмна шина і постійний пристрій пам'яті - ширину 14 біт. Така технологія володіє простою і досить потужною системою команд - бітові, байтові і реєстрові операції мають високу швидкість

з перекриттям за часом циклів виконання та вибору команд. За один цикл 14-бітова ширина програмної пам'яті виконує вибірку 14-бітової команди, 2-ступеневий конвеєр виконує одночасну вибірку та виконання команди.

Так як в інформаційному відношенні в системі управління асинхронним двигуном є детерміновані в часовій області сигнали, пов'язані з координатами динамічної системи, а також стохастичні і збуджуючі впливи, то необхідно поділити на дві підсистеми системи управління:

- 1) підсистему регулятора електроприводу та формування алгоритму перемикання ключів інвертора,
- 2) підсистему автоматики і діагностики.

На рис. 2.7 приведено функціональну схему системи управління частотним перетворювачем.

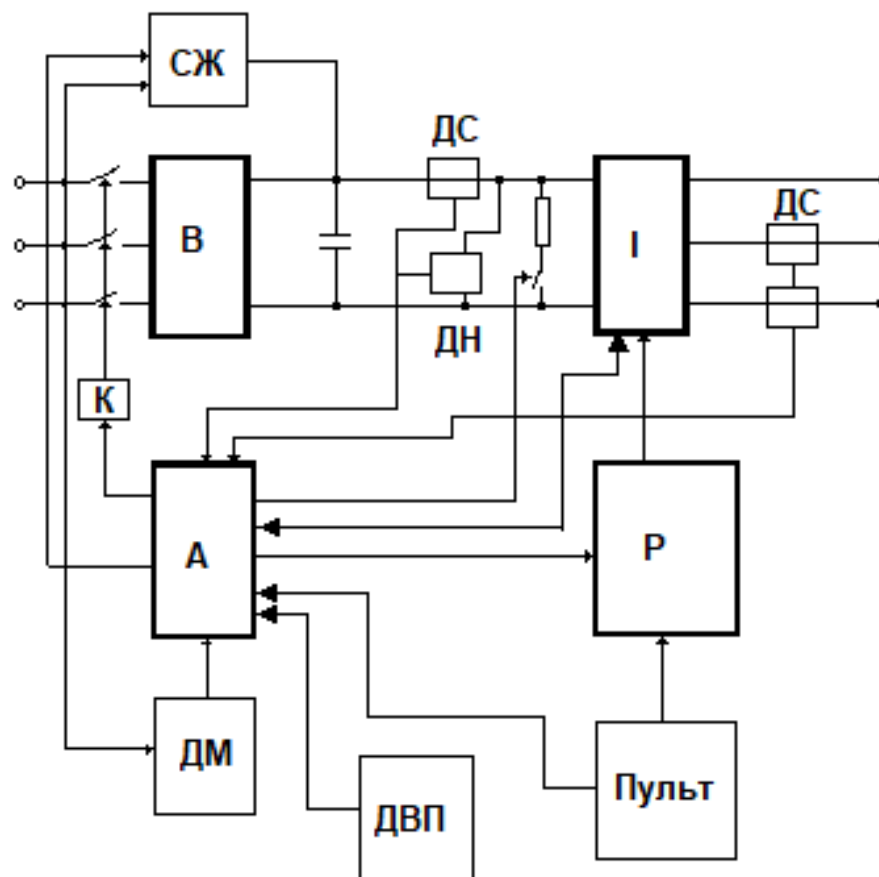


Рисунок 2.7 - Функціональна схема системи керування частотним перетворювачем: СЖ - система живлення; В - випрямляч некерований; І - інвертор напруги; А - блок автоматики і діагностики; Р – регулятор; ДМ - давач мережі живлення; ДП - давач живлення власних потреб; ДС - давач струму; ДН - давач напруги; К - силовий пускач

В якості широтно-імпульсного модулятора рекомендується взяти спеціальну інтегральну мікросхему, яка може реалізувати такі функції:

- програмну зміну меж вихідних допустимих напруг і частот;
- програмоване значення основної частоти модуляції;
- програмоване значення пауз на переключення силових ключів;
- зміну частоти і напруги на виході інвертора в реальному часі;
- запис події нештатної ситуації або заборони керування від іншого логічного сигналу;
- доступність керування по стандартній шині.

Використання спеціальної *НВІС*(надвелика інтегральна схема) в модуляторі забезпечує умову декомпозиції задачі керування і розподілу окремих задач між апаратними та програмними пристроями наступним чином: формування широтно-імпульсних модульованих сигналів керування ключами здійснює *НВІС*, а формування сигналів управління вихідною частотою і напругою інвертора (модулятора) - здійснює *РІС*-контролер.

Функції регулювання виконує процесор, який напряму пов'язаний зі *НВІС* модулятора по стандартній шині. Швидкість *РІС*-контролера дозволяє реалізувати доволі складні алгоритми керування електроприводом. Додатково можна отримати сигнал завдання від ЕОМ, якій виконує керування верхнім рівнем каналом інтерфейсу RS-232.

Процесор, на якого покладена функція реалізації підсистеми автоматики і діагностики, здійснює такі основні функції:

- керує пусковими контакторними пристроями;
- здійснює режим індикації;
- обслуговує вузли і давачі кіл захисту.

Так як в підсистемі автоматики присутній доволі значний розкид сигналів керування та зовнішніх сигналів за їх часовими характеристиками (час спрацьовування захисту може бути від 100 нс короткого замикання, час заряду ємності фільтру в колі тривати 4-5 сек), то було запропоновано деякі програмні рішення, що дозволяють знехтувати функцію переривань.

Алгоритм роботи процесора системи автоматики під час роботи можна поділити на наступні блоки:

- початкова ініціалізація системи;
- перевірка роботи деяких вузлів та діагностика;
- процеси діагностики функціонування електроприводу;
- діагностика та аналіз позаштатних подій в реальному часі.

Під час ініціалізації здійснюються задані установки програмних параметрів і окремих сигналів управління (сигнал заборони, сигнал скидання тригера аварії і ін.).

Дальше здійснюється контроль величини напруги живлення власних потреб, працездатності давачів струму і напруги, наявності відхилень мережі живлення, контролю режиму індикації та органів керування. Під час запуску електроприводу контролер спершу контролює систему живлення (СЖ) до тих пір, коли U_d досягає номінальної напруги, далі виконує ввімкнення силового пускача (К). Управління на ключі подається з затримкою в часі, яка має бути достатньою для завершення перехідних електричних і механічних процесів в пусковому контакторному блоці. Протягом функціонування пристрою при нормальних умовах циклічно здійснюється діагностика таких моментів:

- контроль величини U_d ($U_d > U_{dnorm}$);
- контроль величини струму та аналіз параметрів можливого струмового перевантаження ($I_d < I_{dmax}$);
- контроль параметрів стану мережі живлення;
- контроль величини температури радіатора ($T_h < T_{hmax}$);
- контроль величини напруги живлення власних потреб ($U_n > U_{nmin}$).

Також, при дуже великому підвищенні величини напруги U_d кола постійного струму на фільтровому конденсаторі (таке явище виникає при частотному гальмуванні), відбувається включення 7-о ключа, через який лишня накопичена енергія поглинається баластним резистором.

Впровадження технології *метал-окисел-провідник* (МОП-технології) в галузь випуску силових напівпровідників дозволяє розробити абсолютно нові пристрої з унікальними характеристиками [21]. Значне зацікавлення викликають транзистори з ізольованим затвором (IGBT), які на даний момент

суттєво впливають на розробку силових електронних схем для промислового, побутового та військового сектору [22].

У країнах з промислово розвинутою електронною галуззю *IGBT*-модулі фактично повністю замінили старі біполярні модулі, оскільки вони бездоганно працюють без застосування додаткових заходів перемиканням на високих частотах (до 20 кГц) та перемиканням на високих частотах. Прилади на базі цієї технології зайняли нішу частот нижче від 1 до 10 кГц при потужності до 1 МВт, а це колись була ніша біполярних транзисторних модулів і в деякій мірі тиристорів. *IGBT*-пристрої, які призначені для перемикання струму, практично не використовуються для роботи в лінійному режимі. Прилади на такій основі мають затвор, який ізольовано оксидною плівкою і тонкою сотовою структурою (аналог силового *MOSFET*), але на стороні колектора присутній *pn*-перехід для доступу неосновних носіїв в канал, коли *IGBT*-пристрій перебуває в провідному стані. При цьому суттєво спадає потужність розсіювання у робочому стані. Така структура *IGBT*-пристрою дозволяє проявляти властивості як *MOSFET* так і біполярних транзисторів.

Сучасний розвиток *IGBT*-технології дозволив розробникам мікропроцесорного обладнання додати коло керування і захисту всередину силового модуля, а це, в свою чергу, викликало появи інтелектуальних силових модулів. *IGBT*-модулі і інтелектуальні силові модулі (*IPM*) є зараз основною елементною базою для інверторів для роботи в діапазонах частот, вище звукових. Інтелектуальні силові модулі надають розробникам обладнання такі додаткові переваги: його мініатюризацію і прискоренням монтажу при виготовлення, так як *IPM* має кола управління затвором і кола захисту від к.з., перевантаження за струмом, захисту від високої температури, а також відключення затвору при низькій напрузі живлення *IPM*.

Приймаючи до уваги параметри параметрів силових приладів, інтелектуальний силовий модуль може мати в своєму складі транзистор з зворотним діодом, стійку інвертора з 2-х транзисторів з зворотними діодами, стандартну схему трифазного інвертора: може бути з додатковим ключем із захистом від великих напруг в колі постійного струму або без нього.

2.4 Вибір давача тиску системи водопостачання

Одним із важливих елементів системи автоматичного водопостачання є давачі регулювання, при допомозі яких система виконує включення/виключення, контролює правильну роботу. Відповідно, вибір давачів є важливою частиною роботи при проектуванні загального комплексу обладнання. Щоб система безперебійно функціонувала та виконувала поставлене завдання, при встановленні давача потрібно обрати правильний діапазон. Якщо обрано дуже широкий діапазон, то насос буде часто реагувати на перепади і давач тиску буде завжди спрацьовувати. І, навпаки, якщо обрано малий рівень діапазону, то насос буде дуже часто вмикатися, тобто може вийти з ладу [22].

Давач тиску води, або реле тиску, або контролер тиску є надзвичайно важливим пристроєм, від якого залежить успішна робота спроектованої насосної станції. Від цього приладу залежить така функція керування, як автоматичне регулювання необхідного тиску води в системі, беручи до уваги навіть мінімальний. При правильно вибраному діапазоні тиску насос має змогу працювати в оптимальному режимі, уникаючи поломок та підтримуючи його нормальний технічний стан протягом довгого терміну експлуатації.

Давачі тиску можна поділити на два типи:

- механічні (або електромеханічні);
- електронні.

Обидва типи мають головний робочий орган - мембрану, яка виконує роль однієї з перегородок їх внутрішнього резервуара, який служить для подачі води. Вода створює тиск, мембрана відхиляється і виконує вплив на інші елементи давача, внаслідок цього він спрацьовує. Такими елементами в механічних давачах є контактами, які під час замикання або розмикання, впливають на роботу насоса - вмикають його або вимикають. Згідно цього механічні давачі іноді можуть називати контактними.

Механічні давачі є надзвичайно популярними, простими в обслуговуванні і недорогими. Зазвичай їх виготовляють вітчизняні виробники. Моделі давачів зарубіжних фірм є дорожчі та комплектуються значною

кількістю пристосувань: мають шкала для регулювання, внутрішній манометр та інші необхідні пристрої.

Електронного реле тиску працюють за дещо іншим принципом на відміну механічного. В такому давачі при коливаннях мембрани виникає електричний аналоговий сигнал, який далі підсилюється, перетворюється в цифрову форму і поступає в блок системи автоматичного управління.

Варто зазначити, що електронні давачі тиску є надзвичайно чутливими до будь-яких, навіть найменших, коливань і відхилення від заданих установок параметрів, в них передбачено також захист від сухого ходу. На даний час на ринку України представлені моделі електронних давачів, в яких передбачено автоматичний запуск системи водопостачання після аварійної зупинки. Подібні системи можуть надавати інформацію споживачу про аварійні ситуації – він отримує попередження на власний мобільний телефон. Крім того, в залежності від моделі давача, може бути багато інших корисних додаткових функцій.

Перейдемо до вибору датчика тиску. В даній кваліфікаційній роботі для системи автоматизованого водопостачання було вибрано давач тиску фірми «Метран» (рис. 2.7).

Ці давачі призначені для роботи в різних галузях промисловості в системах автоматичного контролю, регулювання та управління технологічними процесами. Дозволяють забезпечити надійне і безперервне перетворення таких вимірюваних величин, як надлишковий тиск, розрідження, тиск-розрідження, різницю тисків, гідростатичний тиск нейтральних, агресивних, газоподібних і рідких середовищ у вихідний уніфікований струмовий сигнал. Також ці давачі можна застосовувати для перетворення вимірюваних параметрів рівня та витрати рідини і газу у вихідний уніфікований струмовий сигнал. Можуть працювати у вибухобезпечних та вибухонебезпечних умовах. Ступінь вибухозахисту такого давача визначається рівнем вибухозахисту, який застосовується у вторинному пристрої [23].



Рисунок 2.7 - Давач тиску Метран-43

Зокрема, давачі сімейства серії 43 використовують для вимірювання і перетворення значень надлишкового тиску. Їх перевага полягає в тому, що вони є корозостійкими та призначені для роботи в системах автоматичного контролю, дозволяють регулювати і управляти технологічними процесами, забезпечують значення вимірюваного параметра - безперервне перетворення тиску в уніфікований аналоговий сигнал.

Щоб налаштувати параметри, контроль, вибрати режиму роботи давача, необхідно використати спеціальні виносні індикаторні рідкокристалічні пристрої (рис. 2.7).

Вибір давача виконаємо, приймаючи за основу робочий тиск насоса:

$$H_{ном} = 20 \text{ м} = 2 \text{ атм.}$$

Тоді максимальний високий робочий тиск визначимо за формулою:

$$P_{макс} = k \cdot H_{ном}, \quad (2.3)$$

$$P_{макс} = 1.5 \cdot 2 = 3 \text{ атм.}$$

Вибираємо давач, який відповідає найближчому великому робочому тиску Метран-43-ДІ-3133-3,5 (табл. 2.4).

Таблиця 2.4 – Технічні характеристики давача Метран-43-ДІ-3133-3,5

| Макс. робочий тиск, атм. | Макс. допустимий тиск, атм. | Вихідна напруга U_{sp} , мВ | Чутливість, мВ/кПа | Лінійність, % від U_{sp} | Діапазон робочих температур, °С |
|--------------------------|-----------------------------|-------------------------------|--------------------|----------------------------|---------------------------------|
| 3,51 | 4,1 | 50 | 0,15 | 0,52 | -45 ...+100 |

Давач тиску Метран-43-ДІ-3133-3,5 складається з блоку вимірювання та електронного перетворювача. Базовим елементом блоку вимірювання є чутливий елемент - монокристалічна сапфірова пластина з кремнієвим плівковими тензорезисторами, які з'єднані з металеву пластину тензоперетворювача. Тензорезистори з'єднані за типом мостової схеми. Деформація вимірювальної мембрани викликає, в свою чергу, пропорційну зміну опору тензорезисторів, що приводить до розбалансування мостової схеми. З виходу мостової схеми давача електричний сигнал поступає в електронний блок, в якому він перетворюється в уніфікований струмовий сигнал. Загальний вигляд давача тиску Метран-43-ДІ-3133-3,5 показано на рис. 2.7.

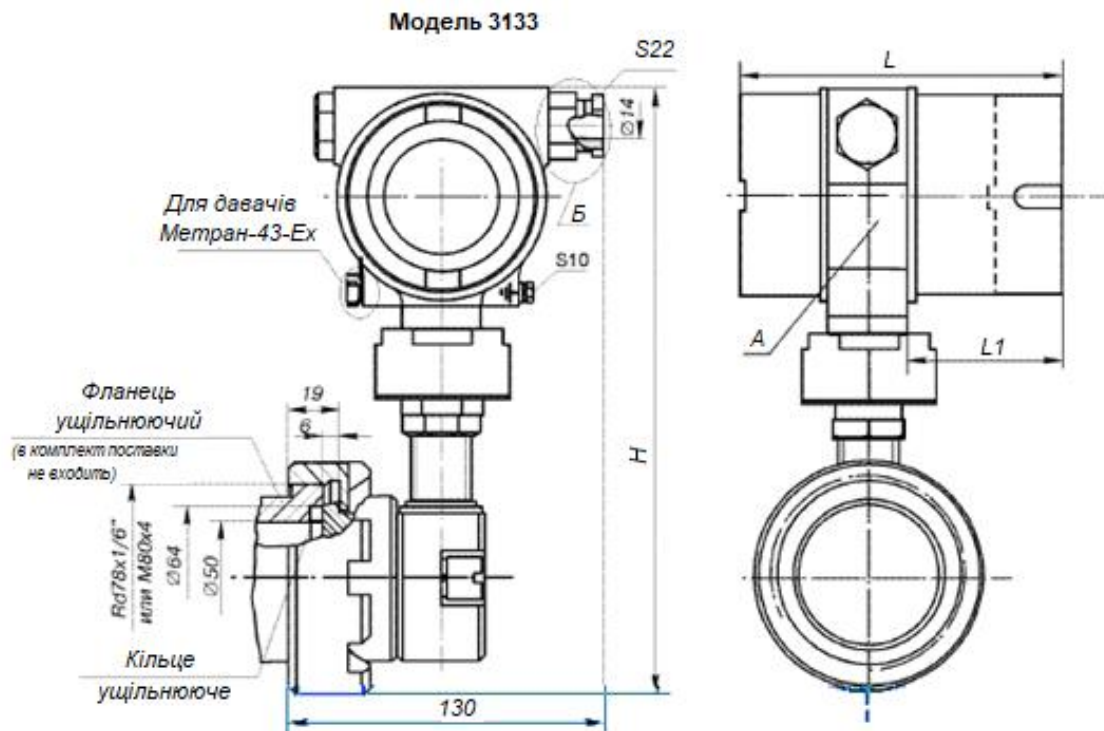


Рисунок 2.8 - Давач тиску Метран-43

2.5 Вибір захисного обладнання

Оскільки електричний привод електродвигуна має транзисторний частотний перетворювач, то його живлення здійснюється трифазною напругою промислової частоти. Для вибраного електродвигуна АІС90-Л2, потужність якого становить 2,2 кВт, номінальний струм не перевищує 5,5 А.

Потрібно виконати вибір з'єднувального, пускового і захисного обладнання для розробленої насосної установки [24].

Для захисту і управління електродвигуном вибираємо універсальний блок захисту УБЗ-305 українського виробника (фірма «Новатек-електро», м. Київ), що входить в комплект щита захисту двигуна УБЗ-303-250-1А [25].

Універсальний блок захисту призначений для захисту асинхронних двигунів потужністю від 2,5 до 300 кВт при умові застосування зовнішніх струмових трансформаторів з вихідним струмом 5 А. Він може працювати в мережах з ізолюваною і глухозаземленою нейтраллю. Встановлюється блок на DIN-рейку.

УБЗ-305 забезпечує постійний контроль параметрів напруги мережі, діючих значень фазних струмів трифазного електричного обладнання (380 В, 50 Гц) та контроль параметрів опору ізоляції електродвигуна (рис. 2.9).

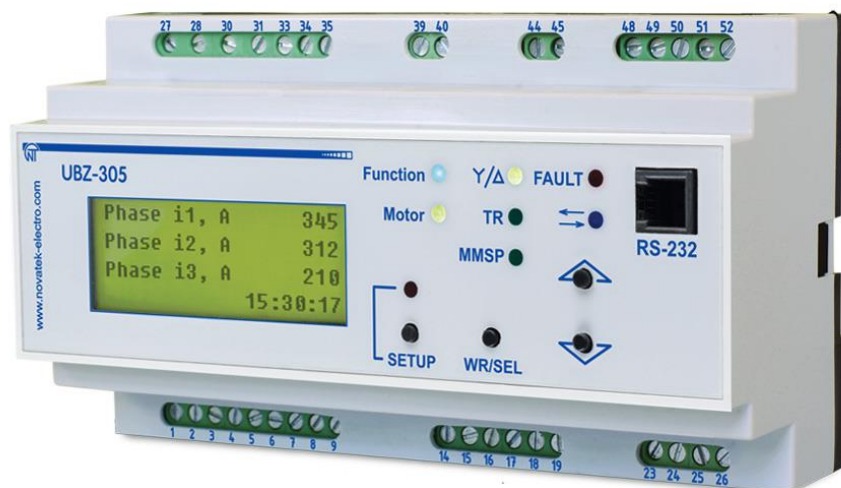


Рисунок 2.9 – Універсальний блок захисту УБЗ-305

Універсальний блок захисту забезпечує захист електричного двигуна за наступних умов [25]:

- неякісна мережева напруга (великі скачки напруги, обрив фаз, зміна чергування та злипання фаз, перекид фазних і лінійних напруг, пониження або підвищення частоти мережі від стандартних діапазонів);

- механічного перевантаження (симетричне перевантаження за фазними струмами);

- перевищення порогу струмом зворотної послідовності;

- несиметрії фазних струмів без перевантаження, яка може бути викликана дефектами ізоляції всередині двигуна або підвідного кабелю (виконується порівняння коефіцієнта несиметрії струму за зворотною послідовністю з коефіцієнтом несиметрії напруги за зворотною послідовністю);

- зникнення моменту на валу електричного двигуна – захист за мінімальним пусковим і робочим струмом;

- тривалого пуску електродвигуна або блокування ротора;

- дуже низькому рівні ізоляції між статором і корпусом двигуна (перед включенням виконується перевірка);

- захисту за струмами витoku на «землю», тобто при замиканні під час роботи на «землю» обмотки статора;

- теплового перевантаження електродвигуна;

- перегріванні обмоток (за допомогою вмонтованих в двигун температурних датчиків визначається температура обмоток або корпусу при використанні зовнішніх температурних датчиків).

На рис. 2.10 приведено схему підключення вибраного електричного двигуна АІС90-Л2 до універсальний блок захисту УБЗ-305.

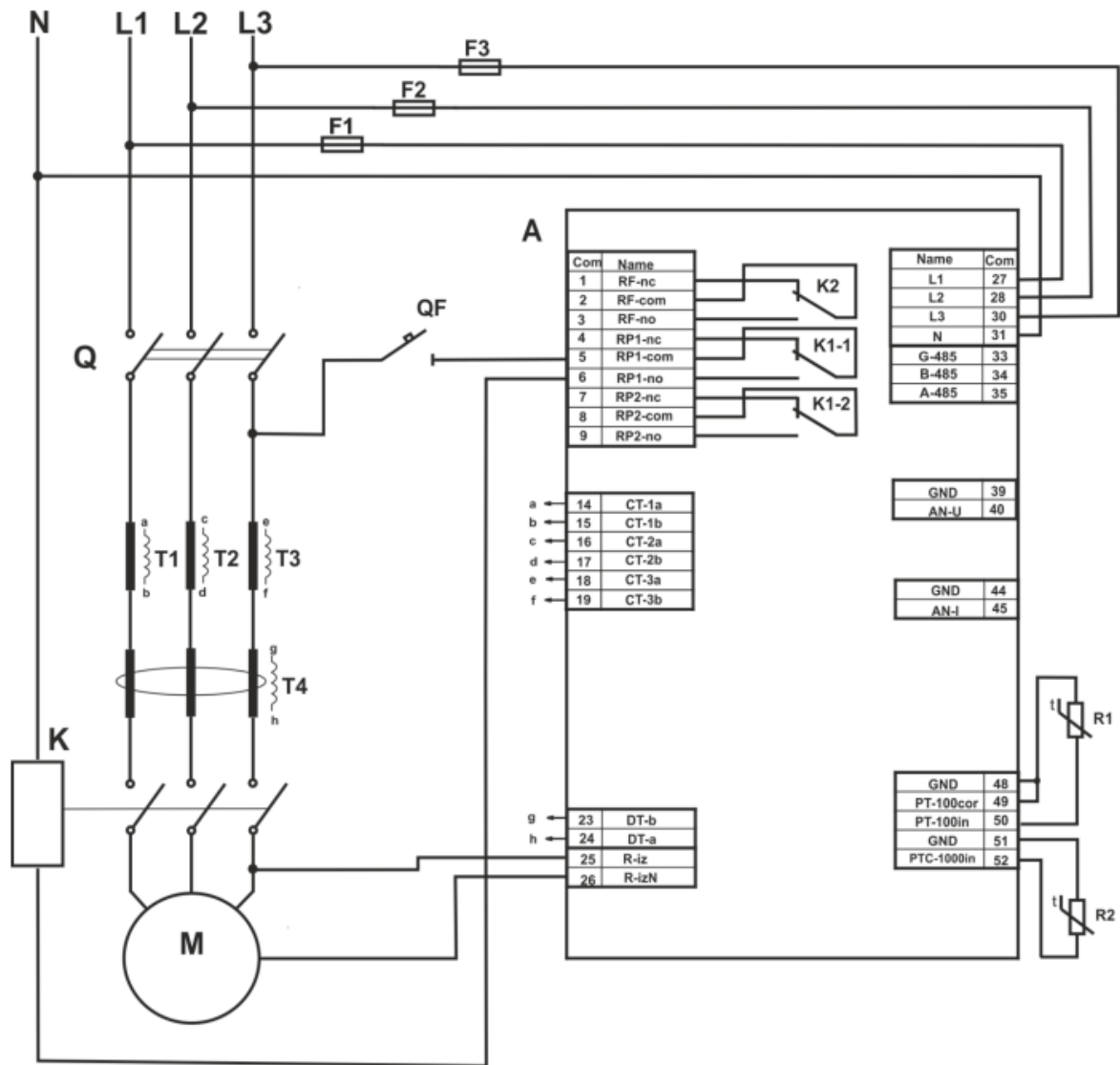


Рисунок 2.10 – Схема підключення УБЗ-305:

- A – УБЗ-305; F1-F3 – запобіжники на струм 1 А; К – магнітний пускач;
 R1, R2 – давачі температури; Q – автоматичний вимикач;
 QF – автоматичний вимикач на струм не більше 5 А;
 Т1-Т3 – трансформатори струму (вихід 5 А);
 Т4 – диференціальний трансформатор

Універсальний блок захисту УБЗ-305 встановлюємо в шафу захисту електричного двигуна УБЗ-303-250-1А українського виробника київської фірми «Новатек-електро» (рис. 2,11).



Рисунок 2.11 – Шафа захисту електродвигуна УВЗ-303-250-1А

Шафа управління і захисту електродвигуном призначена для:

- захисту від обриву, перекосу, помилок чергування фаз електромережі;
- захисту від перевантаження за струмом;
- захисту від дефектів ізоляції обмоток двигуна;
- захисту від перегрівання електричного двигуна у випадку його живлення від трифазної мережі 380 В.

Конструктивно шафа управління і захисту електричного двигуна виконана в металокаркасі навісного виконання із ступенем захисту IP54 (габарити шафи: висота – 450 мм, ширина – 500 мм)

Готовий щит призначений для постійного контролю параметрів напруги мережі і параметрів струмів трифазного живлення асинхронних електричних двигунів та забезпечує повний і ефективний захист електричного двигуна та блокування його пуску в випадках, які були описані вище.

2.5 Висновки до розділу

В результаті виконання проектної конструкторської роботи було отримано наступні результати.

1. Вибрано конструкцію промислової установки для системи водопостачання та сформульовано задачу автоматизації технологічного процесу.
2. Проведено розрахунок та вибір електричного двигуна для системи водопостачання
3. Виконао вибір частотного перетворювача та давача тиску для автоматизованої системи водопостачання
4. Виконано вибір захисного обладнання, зокрема захисту електричного двигуна і обладнання насосної станції.

3 РОЗРАХУНКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ

3.1 Аналітичне дослідження системи автоматичного керування

Виконаємо математичний опис асинхронного електричного двигуна з короткозамкненим ротором та виведемо його динамічну модель беручи за основу Т-подібну схеми заміщення і схему динамічної узагальненої електричної машини.

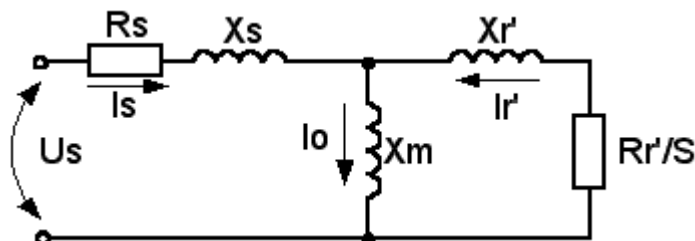


Рисунок 3.1 - Схема заміщення асинхронного двигуна

Виконаємо розрахунок параметрів схеми заміщення електричного двигуна:

$$X_1 = X'_1 \frac{U_{1\phi n}}{I_{1\phi n}} = 0,049 \frac{220}{5,34} = 2,02 \text{ Ом};$$

$$X'_2 = X''_2 \frac{U_{1\phi n}}{I_{1\phi n}} = 0,081 \frac{220}{5,35} = 3,34 \text{ Ом};$$

$$R_1 = R'_1 \frac{U_{1\phi n}}{I_{1\phi n}} = 0,084 \frac{220}{5,35} = 3,46 \text{ Ом};$$

$$R'_2 = R''_2 \frac{U_{1\phi n}}{I_{1\phi n}} = 0,051 \frac{220}{5,35} = 2,10 \text{ Ом};$$

$$X_o = X_\mu \frac{U_{1\phi n}}{I_{1\phi n}} = 2,5 \frac{220}{5,35} = 112,96 \text{ Ом},$$

де $I_{1\phi n} = \frac{P_n}{3U_{1\phi n} \cos \varphi \eta_n} = \frac{2200}{3 \cdot 220 \cdot 0,8 \cdot 0,78} = 5,34 \text{ А}$ - номінальний струм статора.

Виконаємо розрахунок індуктивності полів розсіювання $L_{1\sigma}$ і $L_{2\sigma}$ статора і ротора та індуктивності контуру намагнічування L_μ :

$$L_{1\sigma} = \frac{X_1}{\omega_{o.ел.н}} = \frac{2,02}{314} = 0,0064 \text{ Гн};$$

$$L_{2\sigma} = \frac{X'_2}{\omega_{o.ел.н}} = \frac{3,34}{314} = 0,0106 \text{ Гн};$$

$$L_m = \frac{X_\mu}{\omega_{o.ел.н}} = \frac{103}{314} = 0,33 \text{ Гн},$$

де $\omega_{o.ел.н} = 2\pi f_{1H} = 314 \text{ рад/с}$ - значення номінальної кругової частоти мережі.

Виконаємо розрахунок параметрів частотного перетворювача:

$$W_{пч}(p) = \frac{K_{пч}}{T_\mu p + 1} = \frac{5}{0,01p + 1}$$

де $K_{пч} = f_{1H}/U_3 = 50/10 = 5$ - коефіцієнт підсилення частотного перетворювача;

$f_{1H} = 50 \text{ Гц}$ - частота мережі змінного струму;

$U_3 = 10 \text{ В}$ – задана напруга;

T_μ - постійна часу частотного перетворювача рівна 0,01 с; для реальних систем постійна часу становить 0,008 ÷ 0,01 с.

Проведемо розрахунок параметрів структурної схеми автоматичного управління насосною установкою (рис. 3.2).

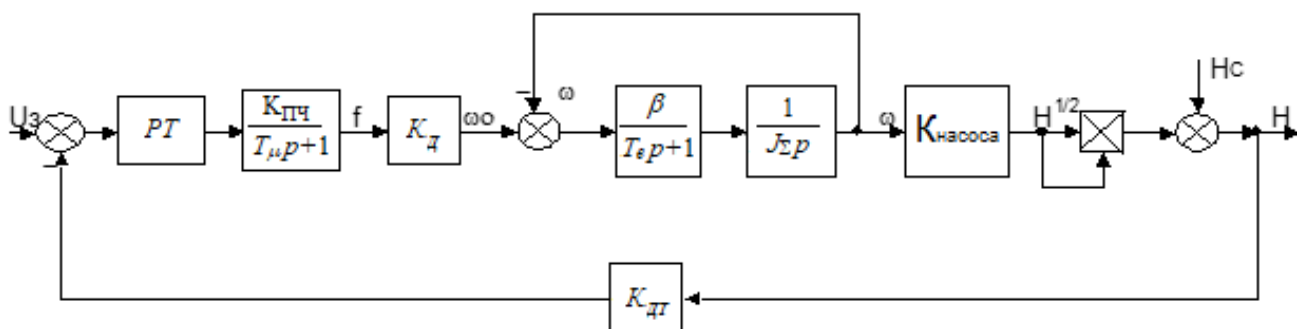


Рисунок 3.2 – Структурна схема автоматичного управління насосом:

PT – регулятор тиску; K_d – коефіцієнт передачі двигуна; $K_{дт}$ – коефіцієнт зворотного зв'язку по тиску

$p = 1$ - кількість пар полюсів обмоток статора.

$$\omega_{OH} = \frac{2\pi f_{1H}}{p} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 50}{1} = 314 \quad - \text{значення номінальної швидкості}$$

холостого ходу.

$$K_D = \frac{2\pi}{p} = \frac{6,28}{1} = 6,28 \quad - \text{значення коефіцієнта передачі електродвигуна.}$$

$$T_e = \frac{1}{\omega_{OH} S_{KH}} = \frac{1}{314 \cdot 0,35} = 0,0091 \quad - \text{значення електромагнітної постій-$$

ної часу електродвигуна.

$\omega_H = \omega_{OH} (1 - s_H) = 314 (1 - 0,05) = 297,5 \text{ рад/с}$ - значення номінальної швидкості електродвигуна.

$$M_H = \frac{P_H}{\omega_H} = \frac{2200}{297,5} = 7,40 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad - \text{значення номінального моменту}$$

двигуна.

$$\beta = \frac{M_H}{\omega_{OH} - \omega_H} = \frac{7,4}{314 - 297,5} = 0,44 \quad - \text{величина статичної жорсткості.}$$

$$T_M = \frac{J_\Sigma}{\beta} = \frac{0,0063}{0,44} = 0,014 \quad - \text{значення електромеханічної сталої часу елек-$$

тродвигуна.

$$K_{насоса} = \sqrt{\frac{H_H}{\omega_H^2}} = \sqrt{\frac{20}{297,5^2}} = 0,015 \quad - \text{значення коефіцієнта передачі насоса.}$$

$$K_{OC} = K_{дд} = \frac{U_3}{H_H} = \frac{10}{20} = 0,5 \quad - \text{значення коефіцієнта зворотного зв'язку.}$$

Враховуючи отримані параметри, передавальна функція електричного двигуна буде мати наступний вигляд:

$$\begin{aligned} W_{дв}(p) &= \frac{\beta k_\delta}{1 + \frac{J_\Sigma p (T_E p + 1)}{\beta}} = \frac{\beta k_\delta}{J_\Sigma T_E p^2 + J_\Sigma p + \beta} = \frac{k_\delta}{T_M T_E p^2 + T_M p + 1} = \\ &= \frac{6,28}{0,00013 p^2 + 0,014 p + 1} \end{aligned}$$

Передавальна функція об'єкта регулювання тиску буде мати такий вигляд:

$$W_{OP}(p) = \frac{K_{ПЧ} K_D K_{насоса}}{(T_{\mu} p + 1) \cdot (T_M T_E p^2 + T_M p + 1)} = \frac{6,28 \cdot 0,015}{(0,01 p + 1) \cdot (0,00013 p^2 + 0,014 p + 1)}$$

Виконаємо налаштування контуру тиску на модульний режим. Регулятор тиску обирають з таких умов, щоб передавальна функція об'єкта управління мала наступний вигляд:

$$W_{OPC}(p) = \frac{K_1 K_2 \dots K_n}{\prod_1^m (T_i p + 1)},$$

де T_i - значення постійної часу елементів об'єкта регулювання.

Використовуючи наступне співвідношення

$$X_i W_i \frac{1}{W_i} = X_i,$$

де W_i і X_i - параметри передавальної функції і змінної i -ї ланки можна виконати компенсацію постійних часу, тобто виключити їх з розімкнутого контуру. Подібним чином виключають із розімкнутого контуру регулювання коефіцієнти, $K_1 K_2 \dots K_n$, а для виключення статичної помилки вводять сюди інтегральний параметр з постійною часу T_o .

В результаті вихідний розімкнутий контур регулювання замінюємо потрібним контуром із загальним коефіцієнтом підсилення, який рівний одиниці та дозволяє забезпечити високу швидкодію завдяки невеликому значенню некомпенсованих постійних часу:

$$W_{PAZC}(p) = W_{OPC}(p) \cdot W_{PC}(p) = \frac{1}{T_o p \cdot \prod_{i+1}^m (T_i p + 1)},$$

де i - число постійно, компенсованих регулятором

На основі цього виразу отримуємо передавальну функцію регулятора:

$$W_P = \frac{T_M T_E p^2 + T_M p + 1}{2K_{OC} K_{ПЧ} K_D K_{насоса} T_{\mu} p}$$

де $a_c = 2$ - значення коефіцієнта демпфірування (оптимальна швидкодія)

Коли підставити у отриманий вираз числове значення, то будемо мати:

$$T_U = 0,023 \text{ с: } W_P(p) = 0,007 p + 7,7 + 212 / p.$$

Отже, в системі автоматизованого управління нам необхідно застосувати пропорційний інтегральний диференціальний регулятор (ПІД-регулятор) [26].

3.2 Розрахунок ПІД-регулятора для автоматичної системи управління

Реалізувати ПІД-регулятор на базі операційного підсилювача можна у вигляді схеми, яка представлена на рис. 3.3 [27].

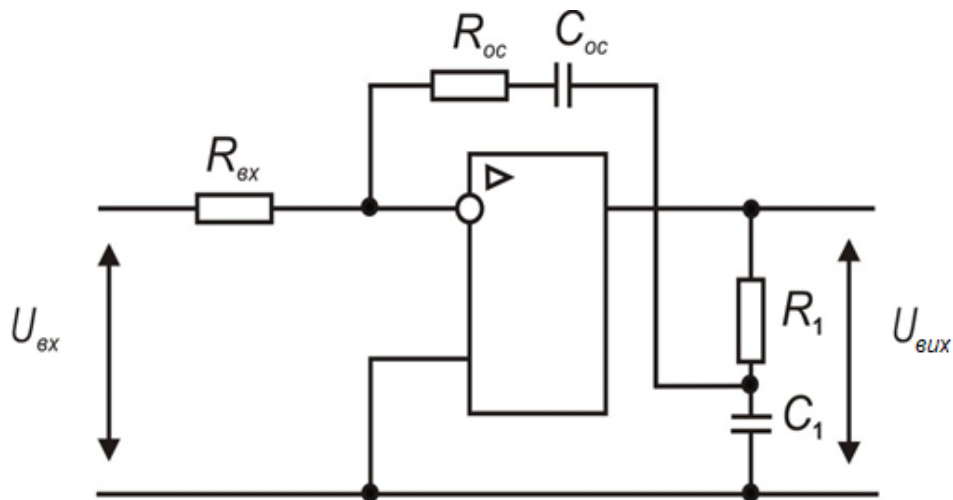


Рисунок 3.3 – Схема ПІД-регулятора на операційному підсилювачі

Розрахуємо значення параметрів ПІД-регулятора тиску ($R_{ВХ}$, R_{OC} , C_{OC} , R_1 , C_1) на прикладі операційного підсилювача К140УД6 [28].

$$W_{ПІД}(p) = \frac{(R_{OC} + C_{OC} p + 1)(R_1 C_1 + 1)}{R_{ВХ} C_{OC} p} = K_{П} + \frac{1}{T_I p} + K_D p.$$

$$K_{II} = \frac{R_{OC} + R_1 C_1}{R_{BX} C_{OC}} = 0.007.$$

$$K_D = \frac{R_{OC} R_1 C_1}{R_{BX}} = 7.7.$$

$$T_I = R_{BX} C_{OC} = 0.0047.$$

Для подальших розрахунків прийmemo, що $C_{OC} = 1 \text{ мкФ}$ і $C_1 = 5 \text{ мкФ}$.

Тоді

$$R_{BX} = \frac{T_I}{C_{OC}} = 4700 \text{ Ом}$$

Зі стандартного ряду вибираємо найближче значення для $R_{BX} = 4,8 \text{ кОм}$

$$R_{OC}^2 C_1 - K_{II} R_{BX} C_{OC} C_1 R_{OC} - K_D R_{BX} = 0$$

$$R_{OC} = 18,2 \text{ кОм}$$

Зі стандартного ряду вибираємо найближче значення для $R_{OC} = 18,5 \text{ кОм}$

$$R_1 = \frac{K_D \cdot R_{BX}}{R_{OC} \cdot C_1} = 3540 \text{ Ом}$$

Зі стандартного ряду вибираємо найближче значення для $R_1 = 3,6 \text{ кОм}$.

При використанні опорів з стандартного ряду, тобто при технічній реалізації системи управління, необхідно виконати перерахунок параметрів ПД-регулятора.

$$K_{II} = \frac{R_{OC} + R_1 C_1}{R_{BX} C_{OC}} = 0.00607.$$

$$K_D = \frac{R_{OC} R_1 C_1}{R_{BX}} = 7.46.$$

$$T_I = R_{BX} C_{OC} = 0.0048.$$

Отже, виконано розрахунок та визначено необхідні параметри системи управління, відповідно, тепер можна виконати наступний етап роботи - перейти до математичного моделювання.

Моделювання системи управління насосної установки було проведено в додатку *Simulink* пакета прикладного програмного забезпечення *Matlab* [29].

Було виконано аналіз динаміки і статички в наступних режимах:

- здійснено пуск на холостому ході до граничної швидкості;
- досліджено роботу при номінальних значеннях системи;
- досліджено різке зменшення споживання води;
- досліджено різке збільшення споживання.

Варто відзначити, що в реальних умовах роботи запуск насосної установки, зміна величини тиску в водопровідній мережі відбувається доволі плавно і тривало, а не стрибкоподібно [30]. В цьому розділі кваліфікаційної роботи було проведено дослідження роботи установки в критичних режимах роботи, а також виконано перевірку правильності вибору компонентів для системи управління.

Моделювання системи управління було проведено в таких часових діапазонах:

при $t = 0$ с - виконано пуск електродвигуна на холостому ходу;

при $t = 0,6$ с - виконано імітацію різкого зменшення споживання води (режим збільшення тиску);

при $t = 1$ с - виконано скидання тиску;

при $t = 2$ с - завершення досліджень.

3.3 Дослідження моделі лінійної системи без обмежень

На рис. 3.4 представлено розроблену модель системи, на базі якої було проведено моделювання, без врахування обмежень [31].

На рис. 3.5 приведено графіки зміни швидкості асинхронного двигуна (а) і тиску (напору) води в мережі споживача (б), які було отримано в результаті проведеного моделювання за допомогою розробленої моделі, на виході регулятора швидкості і перетворювача частоти при реагуванні на вхідний сигнал без врахування обмежень.

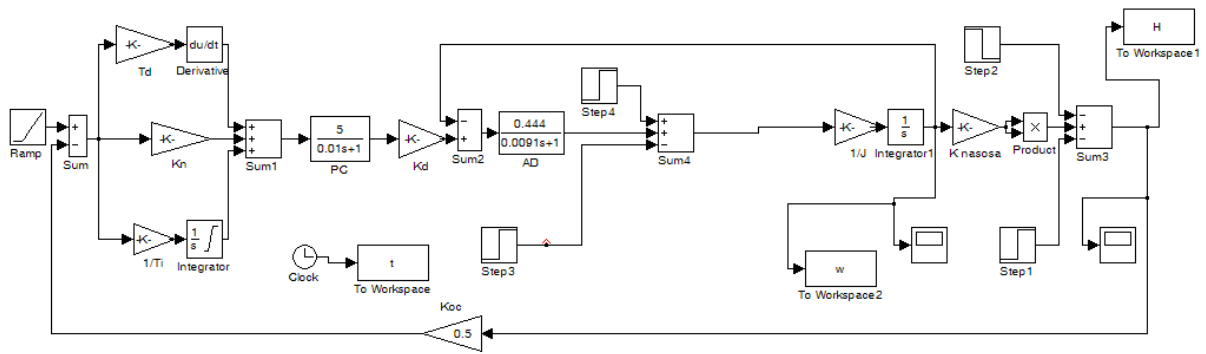
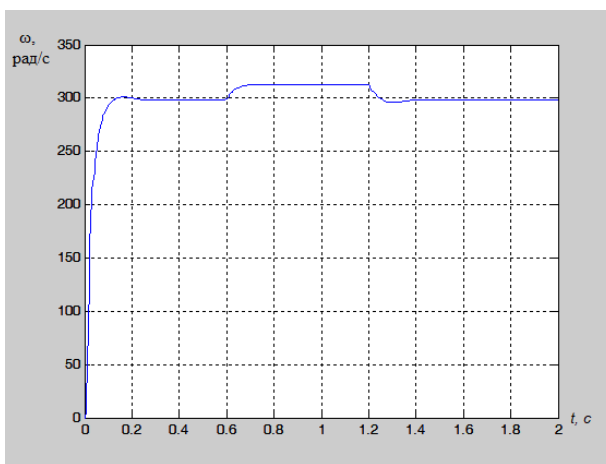
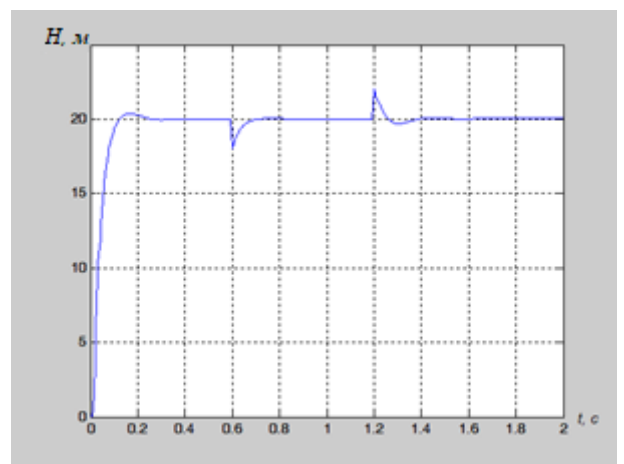


Рисунок 3.4 - Модель системи без врахування обмежень



а)



б)

Рисунок 3.5 – Моделювання перехідних процесів:

а) зміни швидкості; б) зміни тиску

Нижче приведено визначення параметрів якості перехідних процесів:

- час перехідного процесу при запуску електродвигуна

$$t_{пн.пуск} = 0,251 \text{ с};$$

- час перехідного процесу, коли система набирає тиск

$$t_{пн.набр.т.} = 0,22 \text{ с};$$

- час перехідного процесу, коли система скидає тиск

$$t_{пн.скид.т.} = 0,22 \text{ с}.$$

Також було визначено значення перерегулювання тиску в контурі:

$$\sigma = \frac{H_{\max} - H_n}{H_n} \cdot 100\%$$

де H_{\max} – значення максимального напору при запуску двигуна ($H_{\max} = 20,8$ м).

Тоді отримаємо

$$\sigma = \frac{20,8 - 20}{20} \cdot 100\% = 3,8\%$$

Визначимо статичну помилку, яка виникає в контурі тиску:

$$\Delta H = H_H - H_{cm},$$

де H_{cm} – значення сталого напору після скидання або збільшення навантаження ($H_{cm} = 20$ м).

Тоді отримаємо

$$\Delta H = 20 - 20 = 0.$$

Значення перерегулювання при збільшення або скиданні тиску визначимо за формулою:

$$\sigma_{дин} = \frac{H_{дин}}{H_n} \cdot 100\% = \frac{0,75}{20} \cdot 100\% = 3,75\%.$$

Отже, можна зробити висновок, всі отримані значення перехідних процесів задовольняють технічним вимогам до електричного приводу.

3.4 Дослідження моделі лінійної системи з урахуванням обмежень

На виході операційних підсилювачів в діючих електричних приводах напруга обмежується на рівні 10 В, а в частотному перетворювачі - на рівні 100 Гц [32].

На рис. 3.6 представлено розроблену модель системи, на базі якої було проведено моделювання, з урахуванням обмежень на виході регулятора тиску та перетворювача частоти.

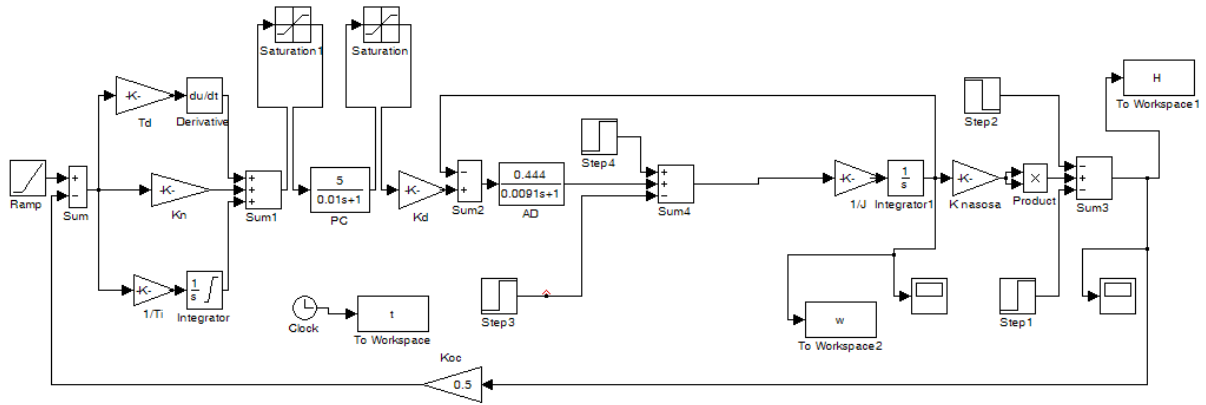
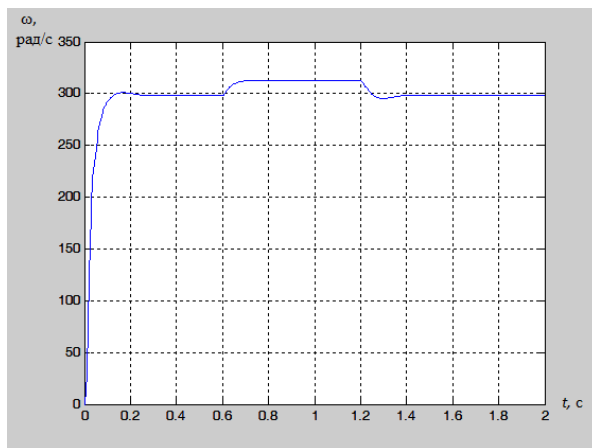
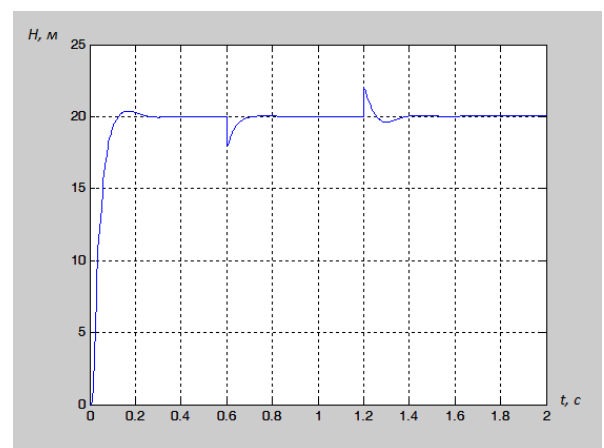


Рисунок 3.6 - Модель системи з врахуванням обмежень

На рис. 3.7 приведено графіки зміни швидкості асинхронного двигуна (а) і моменту (б), які було отримано в результаті проведеного моделювання за допомогою розробленої моделі, на виході регулятора швидкості і перетворювача частоти при реагуванні на вхідний сигнал з врахуванням обмежень.



а)

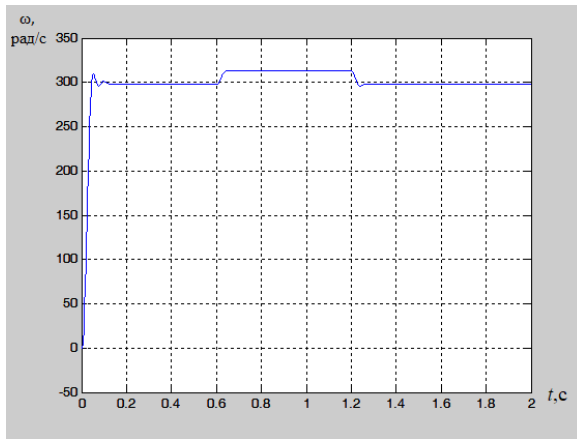


б)

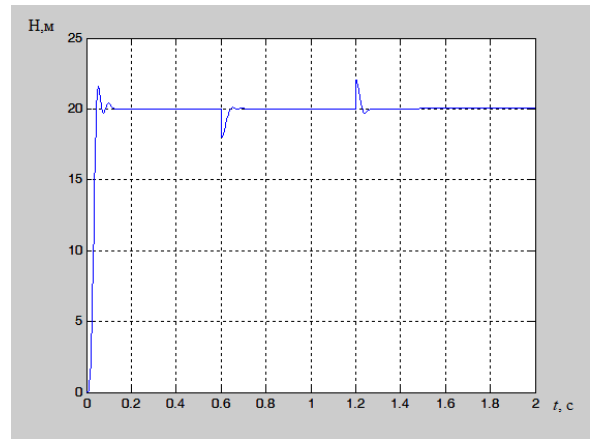
Рисунок 3.7 – Моделювання перехідних процесів:

а) зміни швидкості; б) зміни тиску

Коли підставити в схему, зображену на рис. 3.6, отримані значення параметрів ПД-регулятора, то при його технічній реалізації, тобто при моделюванні, отримаємо графіки, як представлені на рис. 3.8.



а)



б)

Рисунок 3.8 – Перехідний процес при технічній реалізації ПІД-регулятора:
а) зміни швидкості; б) зміни тиску

Нижче приведено визначення показників якості перехідних процесів.
При визначенні розрахункових значень параметрів ПІД-регулятора:

- час перехідного процесу при пуску електродвигуна

$$t_{nn.пуск} = 0,251 \text{ с};$$

- час перехідного процесу, коли система набирає тиск

$$t_{nn.набр.д.} = 0,22 \text{ с};$$

- час перехідного процесу, коли система скидає тиск

$$t_{nn.скид.д.} = 0,22 \text{ с}.$$

При технічній реалізації ПІД-регулятора отримаємо:

- час перехідного процесу при пуску електродвигуна

$$t_{nn.пуск} = 0,152 \text{ с};$$

- час перехідного процесу, коли система набирає тиск

$$t_{nn.набр.д.} = 0,19 \text{ с};$$

- час перехідного процесу, коли система скидає тиск

$$t_{nn.скид.д.} = 0,19 \text{ с}.$$

Під час моделювання встановлено, що при пуску з'являється коливальність, зростає величина перерегулювання, але інші параметри не змінюються.

3.5 Дослідження системи автоматизованого управління

При проведенні дослідження перехідних процесів автоматизованої системи управління в пакеті моделювання динамічних систем *Simulink* програмного пакету *MATLAB* розроблено структурну схему системи частотний перетворювач – асинхронний двигун з використанням еквівалентної двофазної моделі двигуна у векторній формі (рис. 3.9-3.12) [33]. В структурній схемі, приведений на рис. 3.9, блок *Subsystem* представляє собою ПІД-регулятор тиску.

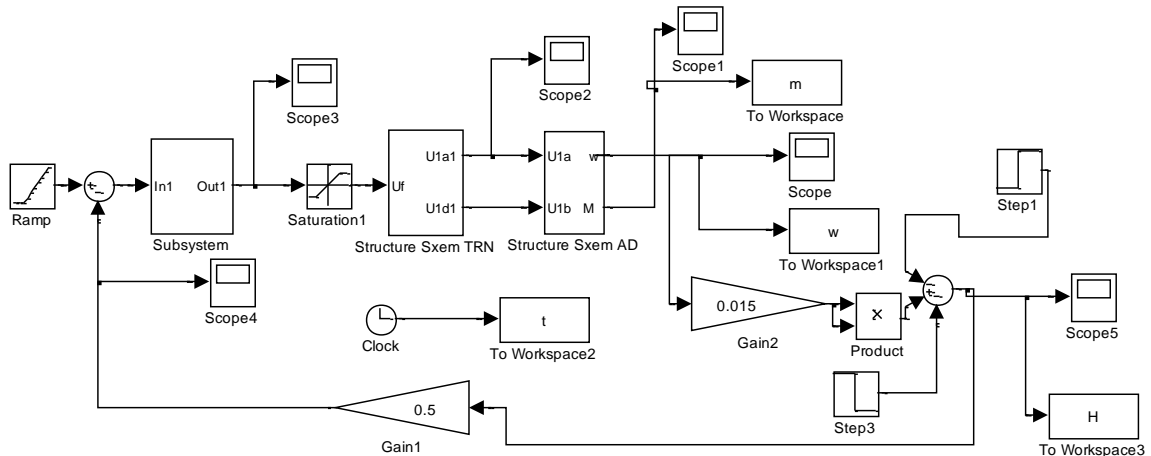


Рисунок 3.9 - Структурна схема системи «частотний перетворювач – асинхронний двигун» із застосуванням 2-фазної моделі електродвигуна у векторній формі

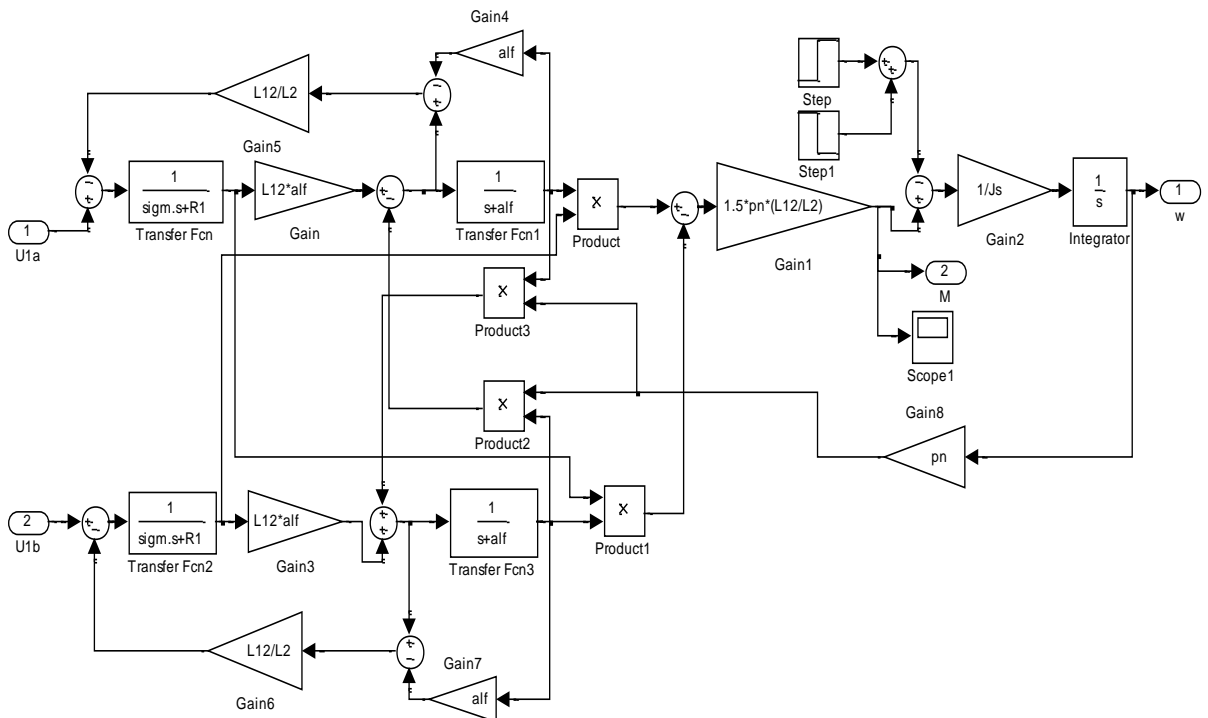


Рисунок 3.10 - Структурна схема еквівалентної 2-фазної моделі електродвигуна у векторній формі (Structure Sxem AD)

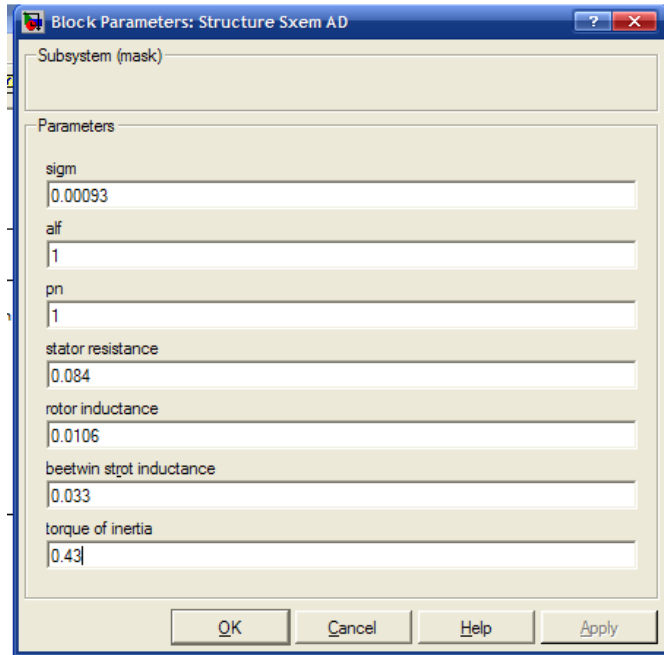


Рисунок 3.11 – Вікно задання параметрів еквівалентної схеми двофазної моделі електродвигуна у векторній формі

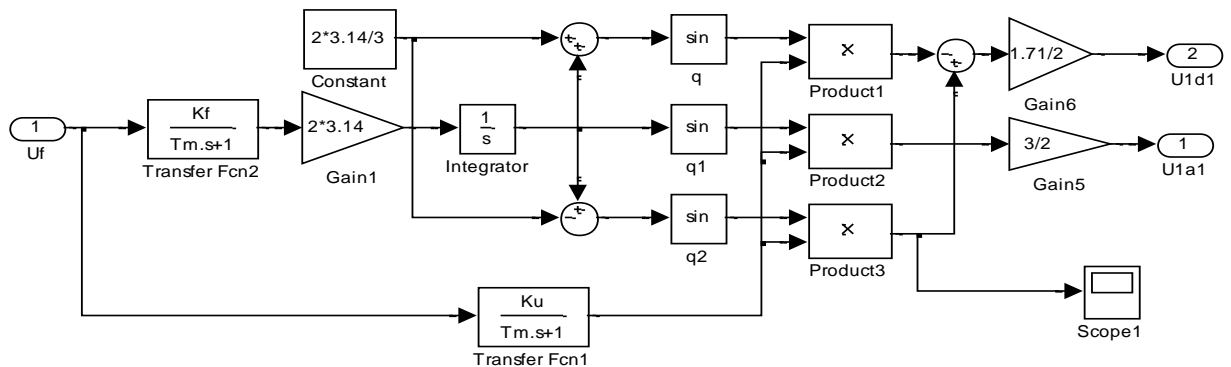
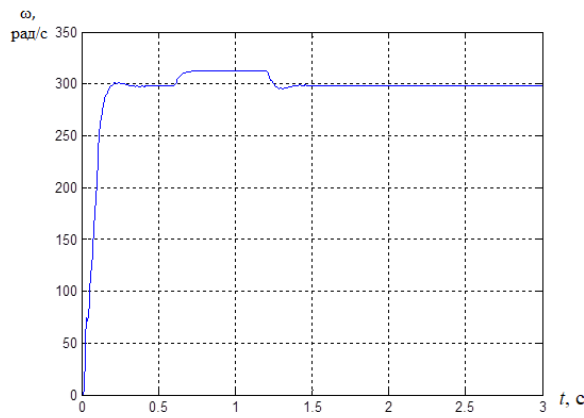
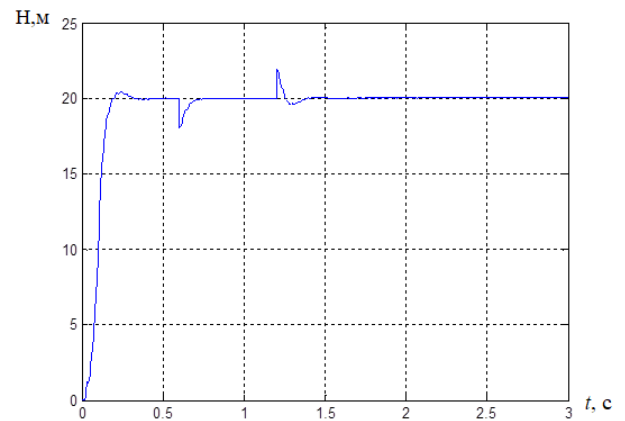


Рисунок 3.12 – Структурна схема частотного перетворювача та формування переходу від трифазної системи координат до двофазної (Structure Sxem TRN)

На рис. 3.13 приведено отримані в результаті моделювання графіки зміни швидкості і тиску на виході регулятора швидкості при реагуванні на вхідний вплив з урахуванням обмежень.



а)

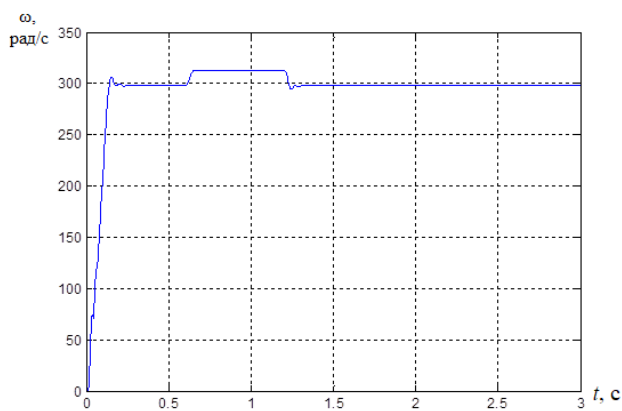


б)

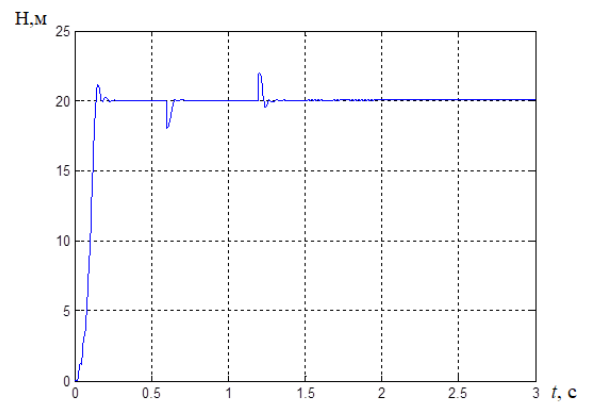
Рисунок 3.13 – *Перехідний процес з урахуванням обмежень:*

а) *зміни швидкості; б) зміни тиску*

Виконаємо аналогічну процедуру, яка описана в підпункті 3.4, тобто підставимо значення параметрів ПД-регулятора в блок Subsystem при виконанні його технічної реалізації. Тепер виконаємо моделювання схеми, яка приведена на рис. 3.9, з підставленими параметрами та отримаємо результати перехідних процесів швидкості і тиску у вигляді графіків, приведених на рис. 3.14.



а)



б)

Рисунок 3.14 - *Перехідний процес при технічній реалізації ПД-регулятора:*

а) *зміни швидкості; б) зміни тиску у*

Аналізуючи отримані графіки перехідних процесів, можна сказати, що система має задовільну стійкість до збільшення і зменшення навантаження. Крім того, якщо не брати до уваги час пуску електродвигуна, основні показники динаміки у порівнянні подібні на аналогічні показники при аналізі лінійної системи без обмежень. Але в цьому випадку значення перехідних характеристик швидкості електродвигуна і тиску при його технічній реалізації є суттєво різними, а саме: під час запуску двигуна швидкість і тиск мають

коливальність при значеннях, наближених до реальних, також виявляється коливальність при зміні значення тиску в системі. Варто зазначити, що це явище не є критичним, але дозволяє найбільш реально показати всі процеси в системі у порівнянні з схемою з параметрами розрахунків [34]. Так як лінійна система без обмежень виявилась найбільш спрощеним варіантом для моделювання, то було використано результати, отримані при моделюванні розробленої структурної схеми системи *частотний перетворювач – асинхронний двигун* з використанням еквівалентної 2-фазної моделі двигуна в векторній формі з розрахованими коефіцієнтами.

3.6 Висновки до розділу

1. Аналітичні дослідження показали, що в систему автоматизованого управління необхідно ввести пропорційний інтегральний диференціальний регулятор.

2. Досліджено, що в реальних умовах роботи пуск насосної установки, зміна тиску в мережі відбувається не стрибкоподібно, а доволі плавно і тривало.

3. В ході проведеного моделювання було отримано наступні результати:

- у випадку введення обмежень інтегральною складовою регулятора та самого регулятора на вихідні сигнали, показники якості перехідних процесів не погіршуються;

- у випадку, коли не враховуються обмеження в схемі системи *частотний перетворювач – асинхронний двигун*, то отримуємо дуже спрощену схему, яка дає тільки загальне уявлення про процеси в асинхронному двигуні;

- у випадку, коли враховуються обмеження в схемі системи *частотний перетворювач – асинхронний двигун*, отримуємо якісний перехідний процес з малим пусковим моментом, але не реальними значеннями;

- у випадку технічної реалізації швидше протікають перехідні процеси, присутнє явище коливальності, так як коефіцієнти ПІД-регулятора відрізняються від розрахункових, зате вони точніше демонструють картину перехідних процесів в дійсній системі.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Заходи безпеки при обслуговуванні автоматичної системи керування насосною установкою

Розроблена автоматична система керування насосною установкою буде працювати в мережі змінного струму, на віддалі від струмопровідних частин. Дефекти під час роботи виявляються візуально - оглядом і на слух. Право одноособового огляду автоматичної система має черговий із кваліфікаційною групою не нижче III або адміністративно-технічний працівник, що має V групу в установках напругою вище 1000 В і IV групу в електроустановках напругою нижче 1000 В [35].

Як правило, при оглядах діючих електроприладів на підстанції не можна проходити за огороження, знімати їх і входити в камери розподільних пристроїв, що не мають бар'єрів. При необхідності дозволяється працівникові з кваліфікаційною групою не нижче IV групи увійти за огороження, але за умови, що струмопровідні частини недоступні, тобто нижні фланці ізоляторів знаходяться від сталі на відстані більше 2 м, а необгороджені струмопровідні частини - на відстані більше 2,75 м при напрузі 35 кВ і 3,5 м при напрузі 110 кВ.

При менших відстанях входити за огороження можна тільки в присутності другої особи з кваліфікаційною групою не нижче III і за умови, що струмопровідні частини знаходяться на відстані не менше, зазначеного в табл. 4.1 [36].

Відключення і зміни в електричних схемах регулятора якості електроенергії можуть виконуватись тільки за розпорядженням або з відома того чергового персоналу, у керуванні або підпорядкуванні якого знаходиться дане устаткування. При пожежах, нещасних випадках або при стихійних лихах можна негайно відключати електроустаткування без узгодження.

Таблиця 4.1 – Допустимі відстані від місця проведення робіт до струмопровідних частин у залежності від їхньої напруги

| Номінальна напруга електроустановки, кВ | Допустима відстань, м |
|---|-----------------------|
| До 15 | 0,7 |
| Від 15 до 35 | 1,0 |
| Від 35 до 110 | 1,5 |
| 154 | 2 |
| 220 | 2,5 |
| 330 | 3,5 |
| 400 і 500 | 4,5 |
| 750 | 6,4 |

Розпорядження вважається виконаним після того, як черговий повідомить особисто або телефоном черговому диспетчерові енергосистеми районної мережі, черговому інженерові, тобто особі, що дала розпорядження. Керуватися показами приладів та повідомленнями осіб не оперативного персоналу про виконання розпорядження не можна.

Особа, що віддає розпорядження про переключення, обов'язково перевіряє послідовність операцій за оперативною схемою. Черговий, який отримав розпорядження, зобов'язаний повторити його і записати в оперативний журнал.

За оперативною схемою або макетом цей черговий намічає порядок операції. Якщо переключення виконують дві особи то перша особа є старшою, роз'ясняє другій (виконавцю) завдання і послідовність його виконання.

В електроустановках напругою вище 1000 В, не обладнаних повністю блокованими від неправильних операцій роз'єднувачів, складні переключення проводяться за бланками. В бланку переключень виконується запис усіх операцій про включення і відключення електрообладнання точно у тій послідовності, у якій ці операції повинні виконуватись.

Прості переключення на одному електричному приєднанні і переключення в електроустановках повністю обладнаних блокуванням роз'єднувачів від неправильної операції, можуть виконуватися без бланків.

Бланки переключень заповнює і підписує черговий який є безпосереднім виконавцем. Старший черговий контролюючий виконання операцій, перевіряє

бланк і також його підписує. Старший черговий зачитує зміст операції виконавець повторює прочитане і приступає до виконання. Старший контролює дії виконавця і відразу відзначає в бланку виконання операції. При сумніві в правильності операцій робота припиняється до в'яснення правильного порядку переключень. Якщо черговий здійснює переключення одноосібно, то він зачитує послідовність операцій, вказаних у бланку, телефоном старшому черговому, який віддав розпорядження. Цей черговий є контролюючою особою.

Дозвіл на переключення виконавець зобов'язаний одержати телефоном безпосередньо перед їх виконанням. Приєднання вмикають або вимикають з допомогою вимикачів.

Якщо роз'єднувач має ручний привід, то операції з ним виконують в діелектричних рукавицях, з ізолюваною основою. Вимикати і вмикати потрібно швидко, рішуче і до упору. Відключення і включення роз'єднувачів виконується, як правило без навантаження. Роз'єднувачами допускається розмикати струми замикання на землю і зарядні струми повітряних і кабельних ліній не вище, наведених в табл. 4.2 [37].

Таблиця 4.2 – Залежність струму замикання на землю і зарядного струму від напруги

| При напрузі, кВ | Струм замикання на землю, А | Зарядний струм на фазу, А |
|-----------------|-----------------------------|---------------------------|
| 3 – 6 | 7,5 | 2,5 |
| 10 – 20 | 3,0 | 1,0 |
| 35 | 1,5 | 0,5 |

Дозволяється відключати навантажувальний струм лінії до $I \leq 15$ А при напрузі $U \leq 10$ кВ.

Роз'єднувачі необхідно вмикати ривком. Якщо при цьому виникає дуга, то ножі необхідно довести до кінця. У протилежному випадку зворотний хід ножа викликає розвиток дуги й нещасний випадок. Відключати роз'єднувачі треба, навпаки, повільно, особливо в початковий момент. Якщо з'явиться дуга при відході ножів від губок, то роз'єднувач необхідно включити назад.

Роз'єднувачі відключають (включають) у діелектричних рукавицях. Роз'єднувачі з пофазним керуванням і з вертикальним розташуванням - у

діелектричних рукавицях, з використанням ізолюючих штанг і стоячи на ізолюючій підставці. Старшим може бути черговий, що має не меншу ніж IV кваліфікаційну групу. Прості перемикання на одному електричному приєднанні дозволяється виконувати оперативному персоналу, що має не нижче ніж IV кваліфікаційну групу, одноосібно.

Перевіряти відсутність напруги, накладати й знімати переносні заземлення дозволяється не менш ніж двом виконавцям.

В установках напругою до 1000 В апаратуру перемикає один працівник, що має III кваліфікаційну групу, якщо він черговий, IV кваліфікаційну групу, якщо він не є черговим.

Персонал, що виконує перемикання, повинен твердо знати, що у випадку зникнення напруги воно може бути подане знову без попередження як в умовах нормальної експлуатації, так і при аваріях.

4.2 Вимоги пожежної безпеки при роботі з автоматичною системою керування насосною установкою

В кваліфікаційній роботі розглядаються ділянки, які можуть бути пожежонебезпечними. Зокрема, відзначається, що потенційну пожежну небезпеку може представляти відкрито прокладений кабель, який з'єднує автоматичну систему керування насосною установкою з силовим електричним щитом, і може при пошкодженні стати причиною пожежі.

Пожежа може виникнути внаслідок загоряння займистих матеріалів, що знаходяться в кабельній споруді, при електричному розряді кабелю чи в момент випробувань або при ремонтних роботах із-за недотримання заходів пожежної безпеки.

В електричних мережах необхідно виконувати наступні вимоги пожежної безпеки при гасінні електроустановок [38]:

- 1) допускається гасіння пожежі водяними потоками на невідключених електроустановках напругою до 10 кВ, відкритих тільки для огляду електромонтера. При цьому опора повинна бути заземлена, а електромонтер – працювати в діелектричних ботах і рукавицях. Не допускається гасіння пожеж ручними засобами;

2) забороняється гасіння пожежі усіма видами піни з допомогою ручних засобів в електроустановках під напругою, так як піна і розчини піноутворювачів мають велику електропровідність. Тільки в окремих випадках при спеціальному закріпленні піногенераторів і надійному їх заземленні, а також заземленні насосів пожежних машин, дозволяється гасити пожежу повітряно – механічною піною в електроустановках напругою до 10 кВ, які знаходяться під напругою;

3) при пожежі трансформатор повинен бути відключеним з обох сторін, після чого одразу ж приступають до його гасіння будь – якими засобами (повітряно – механічною піною, розпиленою водою, вогнегасниками). При гасінні пожежі в трансформаторах, які встановлені в приміщеннях (камерах), необхідно прийняти заходи щодо попередження розповсюдження пожежі через вентиляційні і інші канали. Вентиляція в приміщенні в цей період може включатись тільки з вказівки пожежного підрозділу;

4) при загорянні кабелів необхідно при наявності стаціонарної системи пожежогасіння (повітряно–механічною піною, розпиленою водою) включити її в роботу. При гасінні пожежонебезпечних кабелів напругою до 1000 В у кабельному тунелі пожежник, який працює з пожежним стволом, повинен направляти потоки води через дверний люк, не заходячи при цьому в відсік з кабелями, що знаходяться під дією вогню. Одночасно з гасінням пожежі кабелів потрібно прийняти заходи з швидкого зняття з них напруги;

5) щити управління станцій чи підстанцій напругою до 0,4 кВ являються найбільш важливою частиною електроустановок, тому найбільшу увагу при гасінні пожежі повинні приділяти збереженню на них встановленої апаратури;

б) при загорянні кабелів, проводів і апаратів на панелях щитів управління оперативний персонал повинен в міру можливості зняти напругу з панелей, не допускаючи переходу вогню на сусідні панелі. В цьому випадку застосовують вуглекислотні вогнегасники чи брометиллові, а також порошкові вогнегасники.

При виявленні пожежі в РП чи ТП чергова бригада в першу чергу проводить всебічне відключення горючого обладнання від мережі і приступає до гасіння пожежі, застосовуючи порошковий вогнегасник чи пісок. В випадку необхідності чергова бригада викликає місцеву пожежну команду.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі приведені результати теоретичних досліджень та вирішена науково-технічна задача, що полягає в розробці автоматизованої системи управління електроприводом для постачання води приватним житловим господарством. На базі отриманих результатів та розробок зроблено наступні висновки:

1. Проведено порівняльний аналіз існуючих автоматизованої системи управління електроприводом для постачання води, вказано на їх переваги та недоліки, вибрано найбільш ефективну систему автоматизованого управління на базі транзисторного частотного перетворювача частоти з скалярною ШІМ-модуляцією.

2. Виконано вибір елементів системи автоматизованого управління, зокрема, відцентровий насос КМ50-32-125, асинхронний двигун АІС90-Л2, транзисторний частотний перетворювач Micromaster 420, давач тиску Метран-43, які відповідають вимогам надійності, є малогабаритними, відносно дешевими і доступними на ринку України.

3. Виконано математичне моделювання та проведено аналіз динамічних і статичних характеристик системи автоматизованого управління на комп'ютері в програмному середовищі Simulink пакета MATLAB з наступними результатами: перерегулювання в контурі тиску при пуску, набірні і скиданні тиску становить 3,75%; статична похибка в контурі тиску рівна 0. Ці параметри задовольняють технічні вимоги до електроприводу.

4. Отже, розроблений проект насосної установка відповідає поставленому технічному завданню, може бути рекомендований до впровадження для водопостачання приватних житлових господарств, володіє високими техніко-економічними показниками.

5. Розроблено і запропоновано заходи щодо охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях при реалізації проекту системи автоматизованого управління на базі виконаної кваліфікаційної роботи.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Соколовський О. Ф. Електромеханічні системи автоматизації багатоагрегатних насосних установок при енерго- та ресурсоощадливому керуванні: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. 115 наук : спец. 05.09.03 «Електротехнічні комплекси і системи» / О.Ф. Соколовський. – К., 2009. – 19 с
2. Сотник М. І. Аналіз способів регулювання роботи насосних станцій комунального водопостачання / М. І. Сотник, С. О. Хованський, О. І. Дужак // Вісник СумДУ. Серія Технічні науки. – 2008. – №2. – С. 152–157.
3. Алексеева Ю. Техническое состояние и технологии управления насосными комплексами коммунального хозяйства / Юлия Алексеева, Татьяна Коренькова // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – Вип. 3(50), Ч. 1. – Кременчук : КДПУ, 2008. – С. 135–141.
4. Решетник В. Я. Основи автоматизованого електроприводу: Навчальний посібник з дисципліни “Основи електроприводу” для студентів спеціальностей 7.000008, 7.090603, 7.090605, 7.09.2501, 7.090203. ТНТУ ім. Івана Пулюя, Тернопіль, 2009.
5. Лезнов Б. С., Чебанов В. Б., Агеева Н. Т. и др. Частотный преобразователь на IGBT-транзисторах в системе автоматизированного управления насосной установкой // Водоснабжение и сан. техника. 1998. № 3.
6. Попович М. Г. Екстремальні енергозберігаючі електромеханічні системи автоматичного керування насосними установками / М. Г. Попович, М. В. Печеник, О. І. Кіселичник // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – 2002. – №12. – С. 37–41.
7. Копилов В. І., Яхно О. М. Насоси и вентиляторы: навч. посібник. – К.: ІЗМН, 1996. – 328с.
8. Водоснабжение и канализация / Петренко В. И. – М.: Высшая школа, 1992. – 415с.
9. Электронасосы типа КМ. [Електронний ресурс]. - Режим доступу: URL: <http://zaepos.com.ua/products>
10. Петросов В. А. Стійкість водопостачання / Петросов В. А. – Х. : Фактор, 2007. – 360 с.

11. Типовые схемы водоснабжения индивидуального дома. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: URL: <http://allpumps.boom.ua/tipov2.htm>.
12. Грицак С.В. Автоматизована система керування насосною станцією міської системи водопостачання: Патент України № 26658, 25.09.2007.
13. Состояние рынка оборудования в Украине // Мир техники и технологий. – 2004. – № 8. – С. 20–27.
14. Использование преобразователей частоты в коммунальном хозяйстве. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: URL: <http://www.etx.ua>
15. Москаленко В. В. Электрический привод: Учебн. для электротехн. спец. техн. – М.: Высш. шк., 1991. – 430 с.: ил.
16. IGBT чи MOSFET? Оптимальний вибір / Е. Дуплякин. // Электронные компоненты, 2000, № 1.
17. Электропривод: Підручник / Ю. М. Лавріненко, О. С. Марченко, П. І. Савченко та інш.; за ред. Ю. М. Лавріненка. — К.: Ліра-К, 2009. — 504 с.
18. Асинхронные электродвигатели. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: URL: <http://www.viol.ua/engines>
19. Частотні перетворювачі Siemens. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: URL: <http://siemens.com.ua/products>
20. Жан М. Рабаи, Ананта Чандракасан, Боривож Николич. Цифровые интегральные схемы. Методология проектирования // Digital Integrated Circuits. - 2-е изд. — М.: «Вильямс», 2007. — С. 912. — ISBN 0-13-090996-3.
21. Білоус О.І., Єфименко С.А., Турцевич А.С., Напівпровідникова силова електроніка, Москва: Техносфера, 2013. – 216 с. + 12 с. кол. вкл.
22. Хашемиан, Х. М. Датчики технологических процессов. Характеристики и методы повышения надежности / Х.М. Хашемиан. - М.: Бином, 2008. - 336 с
23. Датчики давления Метран-43. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: URL: <http://www.metran.com>
24. Енергозбереження засобами промислового електропривода: Навчальний посібник / Закладний О.М., Праховник А.В., Соловей О.І. - К: Кондор, 2005. - 408 с
25. Сайт компанії «Новатек-електро». [Электронный ресурс]. - Режим доступа: URL: <http://www.novatek-electro.com/production>

26. Коренькова Т. Обоснование необходимости повышения управляемости насосных комплексов / Татьяна Коренькова, Юлия Алексеева // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – Вип. 3(38), Ч. 1. – Кременчук: КДПУ, 2006. – С. 87–90.

27. Иванов А. О. Теорія автоматичного керування: Підручник. — Дніпропетровськ: Національний гірничий університет. — 2003. — 250 с.

28. Бажанов В. Л., Вайшнарас А. В. Программа “ММ-настройка” для определения параметров ПИД-регуляторов по методу масштабирования // Автоматизация в промышленности. – 2007, № 6.

29. Черних І.В. Моделювання електротехнічних пристроїв в MATLAB, SimPowerSystems і Simulink . 1-е видання, 2007 рік, 288 с.

30. Станція водоснабження ГИДРОДЖЕТ. [Електронний ресурс]. - Режим доступу: URL: <http://www.usm.netfirms.com/hydrojet>

31. Гриценко К. Г. Способ решения задачи реконструкции электроприводов насосов насосной станции с использованием имитационной модели / К. Г. Гриценко // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – 2000. – Вип. 2(9). – С. 10–16.

32. Правила улаштування електроустановок. – Харків: «Форт», 2009. 770 с.

33. Мошноріз М.М. Розробка математичних моделей та пристроїв для оптимізації керування насосною станцією: дис. ... магістра технічних наук: 8.092203 / Мошноріз Микола Миколайович. – Вінниця: ВНТУ, 2006. – 100 с.

34. Мисюренко В. А. Имитационная модель электромеханической системы для управления группой насосов / В. А. Мисюренко // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – 2002. – Т. 2, №12. – С. 142–145.

35. Лут М.Т. Охорона праці в галузі. Методичні вказівки щодо виконання розділу у дипломних проектах студентів зі спеціальності 7.091901 «Енергетика сільськогосподарського виробництва». К.:НАУ,2000.-136с.

36. Основи охорони праці: підручник для студентів вищих навчальних закладів // За ред. д.т.н., проф. М.П. Гандзюка - К.: Каравела, 2003. - 408 с.

37. Влияние электромагнитного излучения на жизнедеятельность человека и способы защиты от него. Учебное пособие – Захаров С. Г., Каверзнева Т. Т. СПб.: СПбГТУ, 1992, 74 с., ил.

38. Лапін В.М., Безпека життєдіяльності людини, - Львів: ЛБК НБУ; Київ: Знання, 2000.-188 с.

39. Євтух П.С., Буняк О.А., Оробчук Б.Я. Решетник В.Я. Зміст та тематика дипломних проектів (робіт) за спеціальністю 7.05070103 (8.05070103) електротехнічні системи електроспоживання // Методичні вказівки. - Тернопіль, ТНТУ імені Івана Пулюя, 2012.