МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Таврійський національний університет
імені В.І. Вернадського
Навчально-науковий інститут муніципального управління
та міського господарства
Кафедра інженерних систем та технологій

На правах рукопису

Кваліфікаційна робота на здобуття ступеня вищої освіти «магістр»

ПОБУДОВА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ НАСОСНОЮ СТАНЦІЄЮ

Здобувача вищої освіти
Гончаренко Дениса
Олександровича
Освітня програма
«Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»
(Спеціальність
174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»)

_____
(підпис)

Науковий керівник:
д.т.н., професор Кисельов В.Б.

_____
(підпис)

Національна шкала_____
Кількість балів_____
Оцінка: ECTS

Київ – 2026

Таврійський національний університет імені В. І. Вернадського
Навчально-науковий інститут муніципального управління
та міського господарства
Кафедра Інженерних систем та технологій
Освітньо-кваліфікаційний рівень бакалавр
Спеціальність 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Завідувач кафедри
_____Наталія ОМЕЦИНСЬКА
«____» _____2025_року

ЗАВДАННЯ
НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Гончаренко Дениса Олександровича

1. Тема роботи: Побудова математичної моделі перехідних процесів системи автоматичного керування насосною станцією
керівник роботи: д.т.н., професор Кисельов В.Б.

затверджені Наказом ТНУ імені В.І Вернадського:
від «7 » листопада 2025 № 138/1-ОД

2. Строк подання студентом роботи: 25.11.2025

3. Вихідні дані до роботи: Параметри насосної станції: продуктивність 9 м³/год, робочий натиск 38,4 м. Базове обладнання: відцентровий занурювальний насос Grundfos SP 17-4N, частотний перетворювач Grundfos CUE із вбудованим ПІД-регулятором. Програмне забезпечення для побудови математичної моделі: MATLAB/Simulink.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки: Проаналізувати насосну станцію, розрахувати її технологічні параметри та обґрунтувати вибір насосного обладнання; Виконати розрахунок параметрів схеми заміщення асинхронного двигуна та налаштувати ПІД-регулятор системи стабілізації тиску; Побудувати математичну модель перехідних процесів електроприводу в середовищі MatLab/Simulink та проаналізувати її динаміку; Розробити заходи з охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях.

5. Перелік графічного матеріалу: графічна робота виконана у вигляді мультимедійної презентації

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1	професор Володимир КИСЕЛЬОВ		
Розділ 2	професор Володимир КИСЕЛЬОВ		
Розділ 3	професор Володимир КИСЕЛЬОВ		
Розділ 4	професор Володимир КИСЕЛЬОВ		

7. Дата видачі завдання _____ 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	*Назва етапів бакалаврської роботи*	*Термін виконання етапів роботи*	*Заключний документ етапу*
1	Вибір теми бакалаврської роботи, призначення керівника	до 31.10.2025	Затвердження переліку тем бакалаврських робіт
2	Пошук і відбір літератури по темі роботи, складання плану бакалаврської роботи	до 14.12.2025	Список літературних джерел, план роботи
3	Визначення об’єкта, предмета, мети, завдань та методів дослідження, написання вступу до теми бакалаврського дослідження	до 25.01.2026	Текст вступу
4	Написання тексту бакалаврської роботи відповідно до її структури:	26.01.2026-17.05.2026	Текст розділів
	4.1 I розділ	26.01.2026-6.03.2026	Текст розділу
	4.2 II розділ	9.03.2026-27.03.2026	Текст розділу
	4.3 III розділ	30.03.2026-17.04.2026	Текст розділу
	4.4 IV розділ	20.04.2026-8.05.2026	
5	Підготовка графічних матеріалів чи іншого унаочнення	11.05.2026-15.05.2026	Роздатковий матеріал, презентація
6	Оформлення кінцевого списку використаних джерел та додатків	11.05.2026-15.05.2026	Список літературних джерел
7	Оформлення та попередній захист бакалаврської роботи	18.05.2026-22.05.2026	Бакалаврська робота, рішення кафедри про допуск до захисту
8	Внесення коректив та кінцеве редагування бакалаврської роботи	25.05.2026-29.05.2026	Бакалаврська робота
9	Реєстрація бакалаврської роботи на кафедрі	1.06.2026-5.06.2026	Бакалаврська робота внесена до журналу реєстрації випускових робіт
10	Захист бакалаврської роботи	10.06.2026-28.06.2026	Рішення Екзаменаційної комісії про захист

ЗМІСТ

ВИЗНАЧЕННЯ, ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ.....7
ВСТУП.....8
1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО НАСОСИ І НАСОСНІ СТАНЦІЇ.....10
1.1 Аналіз об'єкту управління.....10
1.2 Основні поняття і параметри.....12
1.3 Електропривод насоса.....14
1.4 Управління насосами.....15
Висновок до розділу 1……..17
2 РОЗРАХУНОК І ВИБІР ПОТУЖНОСТІ НАСОСА З ЕЛЕКТРОДВИГУНОМ…….19
2.1 Початкові дані для проектування.....19
2.2 Система Grundfos.....19
2.3 Комбінована система.....29
2.4 Порівняння систем.....34
Висновок до розділу 2……..35
3 МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ І СТАТИЧНИХ ПРОЦЕСІВ.....36
3.1 Розрахунок параметрів схеми заміщення.....36
3.2 Побудова математичної моделі.....42
Висновок до розділу 3……..45
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ 47
4.1 Опис робочого місця програміста 47
4.2 Освітленість робочого столу 50
4.3 Безпека в надзвичайних ситуаціях……..51
Висновки до розділу 4..... 53
ЗАГАЛЬНИЙ ВИСНОВОК 55
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 57

АНОТАЦІЯ

Гончаренко Д. О. Побудова математичної моделі перехідних процесів системи автоматичного керування насосною станцією. – Рукопис.

Кваліфікаційна робота за спеціальністю 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка». – Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського, Київ, 2026 рік.

У кваліфікаційній роботі досліджено насосну станцію другого підйому як об'єкт автоматизації та керування, розраховано її технологічні параметри (натиск, подачу, потужність) та обґрунтовано вибір насосного обладнання. Запропоновано апаратну комплектацію системи на базі професійного обладнання Grundfos (відцентровий занурювальний насос SP 17-4N, частотний перетворювач CUE), виконано розрахунок параметрів схеми заміщення асинхронного двигуна, налаштовано ПІД-регулятор системи стабілізації тиску, а також побудовано математичну модель перехідних процесів електроприводу в середовищі MatLab/Simulink та проаналізовано її динаміку.

Практичне значення полягає в тому, що запропонована система управління на базі професійного обладнання Grundfos та розроблена імітаційна модель можуть бути використані проектними організаціями під час модернізації або створення нових автоматизованих насосних станцій для підвищення їхньої надійності та функціональності.

Об'єкт дослідження – процес автоматичного керування режимами роботи відцентрових насосних агрегатів у системах водопостачання.

Предмет дослідження – математична модель та динамічні процеси частотно-регульованого електроприводу насосної станції.

Мета роботи – підвищення енергоефективності та надійності системи водопостачання шляхом розробки автоматизованої системи керування насосною станцією другого підйому та дослідження її динамічних режимів за допомогою математичного моделювання.

Методи дослідження – методи теорії автоматичного керування для синтезу системи, методи розрахунку електричних кіл та електромеханічних систем, а також методи комп'ютерного моделювання.

Ключові слова: насосна станція, автоматичне керування, частотно-регульований електропривод, математична модель, асинхронний двигун, ПІД-регулятор, перехідні процеси, MatLab/Simulink.

ABSTRACT

Goncharenko D. O. Construction of a mathematical model of transient processes of the automatic control system of a pumping station. – Manuscript.

Qualification work in specialty 174 “Automation, computer-integrated technologies and robotics.” – V.I. Vernadsky Tavrichesky National University, Kyiv, 2026.

In the qualification work, the second-lift pumping station was investigated as an automation and control object, its technological parameters (pressure, flow, power) were calculated, and the choice of pumping equipment was justified.

The hardware configuration of the system based on professional Grundfos equipment (SP 17-4N centrifugal submersible pump, CUE frequency converter) was proposed, the parameters of the equivalent circuit of the asynchronous motor were calculated, the PID regulator of the pressure stabilization system was configured, and a mathematical model of the transient processes of the electric drive was built in the MatLab/Simulink environment and its dynamics were analyzed.

The practical significance is that the proposed control system based on professional Grundfos equipment and the developed simulation model can be used by design organizations during the modernization or creation of new automated pumping stations to increase their reliability and functionality.

The object of research is the process of automatic control of operating modes of centrifugal pumping units in water supply systems.

The subject of research is the mathematical model and dynamic processes of the frequency-controlled electric drive of the pumping station.

The purpose of the work is to increase the energy efficiency and reliability of the water supply system by developing an automated control system for the second-stage pumping station and studying its dynamic modes using mathematical modeling.

Research methods – methods of automatic control theory for

system synthesis, methods of calculating electrical circuits and electromechanical systems, as well as methods of computer modeling.

Keywords: pumping station, automatic control, frequency-controlled electric drive, mathematical model, asynchronous motor, PID controller, transient processes, MatLab/Simulink.

ВИЗНАЧЕННЯ, ПОЗНАЧЕННЯ І СКОРОЧЕННЯ

АД - асинхронний двигун

ККД - коефіцієнт корисної дії

ПЛК - програмований логічний контроллер

ПЧ - перетворювач частоти

ЕП - електричний привід

СУ - система управління

ВСТУП

Насоси є невід'ємною складовою комплексу устаткування насосних станцій і являють собою машини, що служать для створення потоку або переміщення рідини під натиском. Перетворення механічної енергії приводного двигуна в енергію руху рідини дозволяє піднімати її на задану висоту, транспортувати на необхідні відстані або забезпечувати циркуляцію в замкнутих системах.

У сучасних умовах розвитку економіки України критично важливу роль відіграє збільшення конкурентоспроможності продукції за рахунок впровадження програм енергозбереження та раціонального використання ресурсів. Системи водопостачання, зокрема насосні станції другого підйому для житлових масивів та котеджних селищ, є значними споживачами електроенергії. Використання нерегульованого електроприводу призводить до перевитрат енергії та зносу обладнання, тому застосування сучасних систем автоматичного керування на базі частотно-регульованого електроприводу є вкрай актуальним завданням, що дозволяє оптимізувати роботу станції та забезпечити стабільний натиск води.

Метою кваліфікаційної роботи є підвищення енергоефективності та надійності системи водопостачання шляхом розробки автоматизованої системи керування насосною станцією другого підйому та дослідження її динамічних режимів за допомогою математичного моделювання.

Об'єктом дослідження виступає процес автоматичного керування режимами роботи відцентрових насосних агрегатів у системах водопостачання, а предметом — математична модель та динамічні процеси частотно-регульованого електроприводу насосної станції.

Для досягнення поставленої мети у роботі вирішується комплекс завдань. Зокрема, проводиться аналіз насосної станції як об'єкта управління, огляд діючих систем, двигунів, перетворювачів частоти та датчиків. Виконується розрахунок технологічних параметрів та підбір оптимального насосного обладнання з урахуванням вимог надійності та енергоефективності. Крім того, здійснюється розрахунок параметрів схеми заміщення асинхронного двигуна, налаштування ПІД-регулятора та побудова математичної моделі агрегату в середовищі MatLab

(Simulink) з подальшим аналізом роботи системи. Також розглядаються питання організації робочого місця програміста, визначення оптимальних умов праці та забезпечення безпеки в надзвичайних ситуаціях.

Під час виконання роботи використовуються методи теорії автоматичного керування для синтезу системи, методи розрахунку електричних кіл та електромеханічних систем, а також методи комп'ютерного моделювання. Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що запропонована система управління на базі професійного обладнання Grundfos та розроблена імітаційна модель можуть бути використані проектними організаціями під час модернізації або створення нових автоматизованих насосних станцій для підвищення їхньої надійності та функціональності.

РОЗДІЛ 1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО НАСОСИ І НАСОСНІ СТАНЦІЇ

1.1 Аналіз об'єкту управління

Об'єкт управління розглянемо на прикладі насосної станції водопостачання котеджного селища з населенням 500 чоловік. Висота резервуару з води 3 метри.

Насосні станції водопостачання розділяють на насосні станції першого і другого підйому, підвищувальні (підкачування) і циркулярні.

Для даного випадку підійде насосна станція другого подйому, приведена на рисунку 1.1.

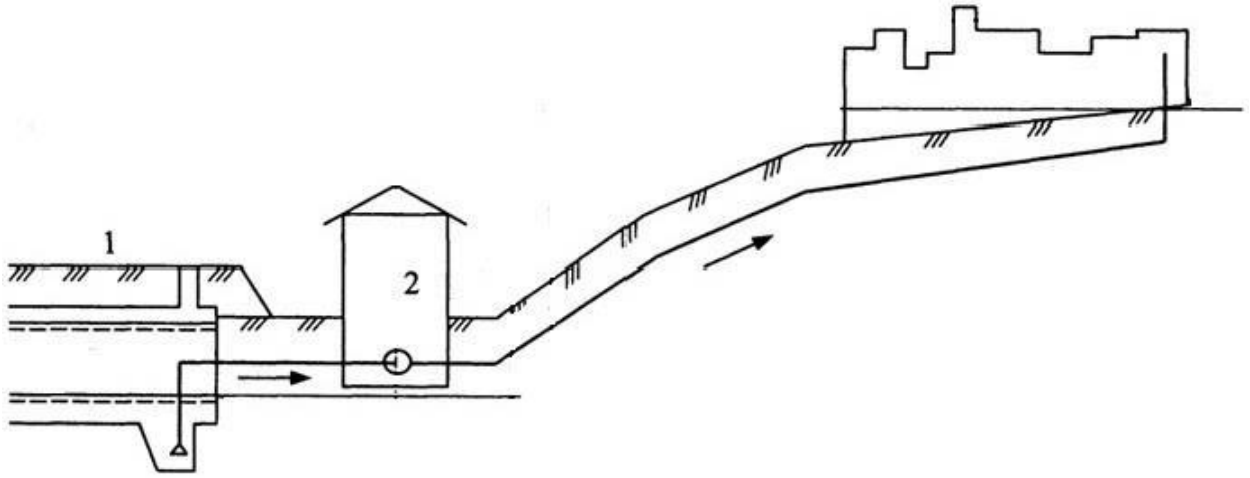


Рисунок 1.1 - Насосна станція другого підйому

Насосними станціями є будівлі, приміщення, де розташовуються насоси, сполучні трубопроводи, силове електроустаткування, вимірювальні прилади і допоміжне приладдя, яке потрібне для нормальної роботи, ремонт або заміну насосних агрегатів. Структурна схема насосної станції приведена на рисунку 1.2.

На цій схемі зображені: трансформаторна підстанція (ТП) від якої відбувається електропостачання насосної станції; на розподільчий пристрій (РП) поступає електроенергія. Також тут розміщені апарати, з яких ведеться облік споживання електроенергії.

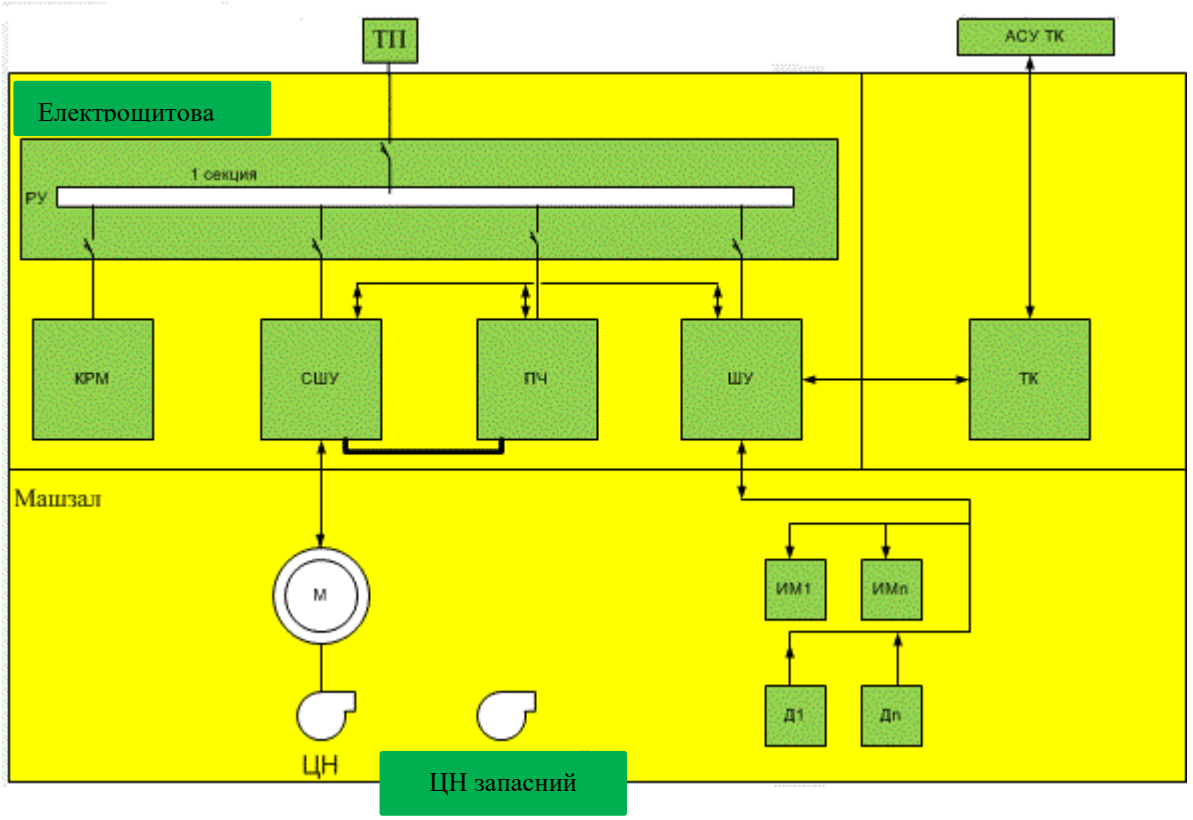


Рисунок 1.2 - Структурна схема автоматизованої насосної станції

У електрощитовій розташовано силове електроустаткування: силова шафа управління (СШУ), перетворювач частоти (ПЧ) і з потреби компенсатор реактивної потужності (КРМ).

У машинному залі розміщені насоси ЦН і ЦН запасною, електропривод М, також тут розміщено допоміжне устаткування, яке включає засувки, вентилятори, обігрівачі. Управління допоміжним устаткуванням здійснюється виконавчими механізмами (ВМ).

Датчики (Д1 - Дn) надають інформацію про значення регульованих параметрів.

У шафі управління (ШУ) відбувається збір усієї інформації від обладнання насосної станції, ця інформація поступає до технологічного контролеру (ТК).

Технологічний контроллер створює алгоритм управління насосної станції і обмін інформацією з автоматизованою системою управління технологічним комплексом (АСОВІ ТК).

Приблизна денна витрата води однієї людини на використання усередині будинку складає 0,4 м^3.

$$Q\lceil м^3 /\lfloor год = \frac{Q\lceil м3 \{доба \rceil \cdot 500 \text{ чол.}}{24} = \frac{0,4 \cdot 500}{24} = 8,3 м^3 / год$$

Формула для визначення натиску :

$$H = P_H \cdot 10,2 + H_Г + h_n$$

де Н - натиск, м;

$P_Н$ = 2 панів - натиск, який необхідно створити у споживача;

НГ = 10 м - геометрична висота підйому перекачуваного середовища;

$h_П$ = 8 м - сумарні втрати натиску

$$H = 2 \cdot 10,2 + 10 + 8 = 38,4 м$$

Отже, максимальне подання насоса за годину приблизно рівне 9 м^3/год і натиск, що подається насосною станцією, дорівнює 38,4 м.

1.2 Основні поняття і параметри

У насоса є ряд основних параметрів таких, як натиск, потужність, подача і коефіцієнт корисної дії. Ці параметри визначають функціонал і підбір устаткування, конструктивні особливості насосної станції, і вибір діапазону зміни режимів роботи.

Подання охарактеризоване об'ємом рідини, який подає насос в напірний трубопровід за одиницю часу.

Потужність, яка витрачається насосом, визначає потужність приводного двигуна і сумарну потужність усієї насосної станції. Вона визначає створюваний натиск і потрібна для уникнення усіх видів втрат при перетворенні механічної енергії, що підводиться до насосу, в енергію руху рідини по трубопроводу.

Натиск насосу характеризує висоту або відстань для переміщення рідини.

З приростом питомої енергії рідини на ділянці від входу в насос до виходу з нього.

Коефіцієнт корисної дії виражає економічну складову експлуатації насоса при інших його робочих характеристиках (натиску, подання, потужність). ККД враховує усі види втрат, які пов'язані з перетворенням насосом механічної енергії двигуна в енергію рідини, що рухається.

Насоси прийнято класифікувати за принципом дії, а не по їх призначенню, і розділяють на 2 типи: об'ємні і динамічні, класифікація насосів приведена на рисунку 1.3.

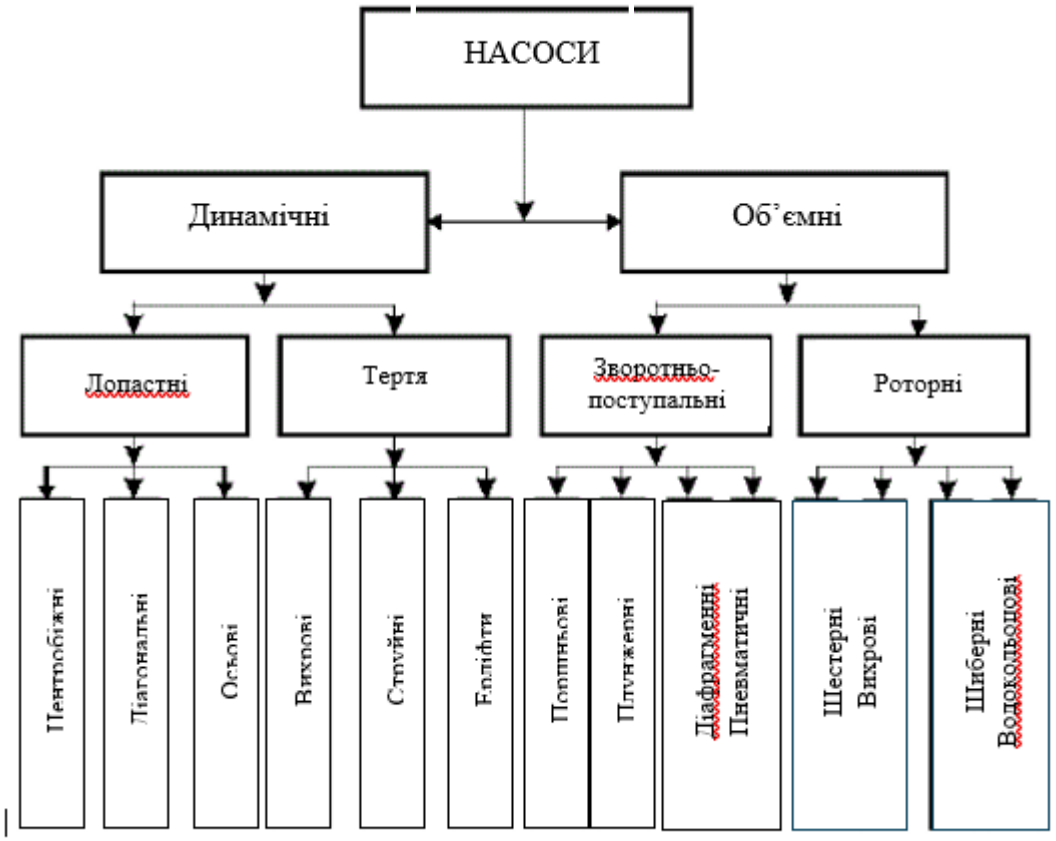


Рисунок 1.3 - Класифікація насосів

У об'ємних насосах рідина витісняється з камери, через зменшення її об'єму. Постійна періодична зміна об'єму камери, обумовлено робочим органом насоса, який рухається зворотньо-поступальним або обертально. Заповнення і звільнення камери рідиною забезпечують клапанні пристрої вхідного і вихідного патрубків насоса [2].

Усі насоси, незалежно від їх відмінностей в принципі дії, конструкцій зобов'язані задовольняти основним вимогам:

- Надійність і довговічність роботи
- Економічність і зручність експлуатації
- Зміна робочих параметрів в широких межах за умови зберігання ККД
- Мінімальні розміри і маса
- Простота пристрою, що полягає в мінімальному числі деталей і повної їх взаємозамінюваності
- Зручність монтажу і демонтажу

При виборі насоса треба буде виходити від конструктивних і експлуатаційних якостей, більше відповідних за призначенням для нашого рішення.

1.3 Електропривод насоса

Структурна схема електроприводу зображена на рисунку 1.5.



Рисунок. 1.5 - Структурна схема електроприводу насоса

На некерований випрямляч подається трифазнаа змінна напруга, яка перетвориться в постійну. Далі постійна напруга поступає на фільтр, який згладжує напругу. На автономному інверторі, у блоці управління формується трифазна симетрична широтно-імпульсна модуляція. У кінці напруга подається

на електродвигун. Датчик струму потрібний для контролю струму.

При виборі регульованого електроприводу, основний варіант — це частотно-управляємій привід з асинхронним короткозамкнутим двигуном [2].

1.4 Управління насосами

Регулювання здійснюється пристроями, що впливають на характеристики насоса або мережі. Ці пристрої діляться на:

– що дроселюють мережу;

– що змінюють характеристику насоса;

– комбіновані.

Як правило, до складу насосної станції подання води входять декілька насосів. Спільна робота насосів розділена на паралельне, послідовне і змішане включення.

Паралельне включення двох і більше насосів (рисунок 1.7) необхідно для збільшення подання.

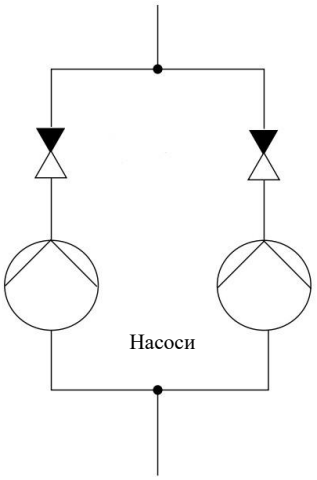


Рисунок 1.7 - Паралельне включення насосів

Загальне подання визначається як сума значень подання окремих насосів при постійному натиску, показана на рисунку 1.8.

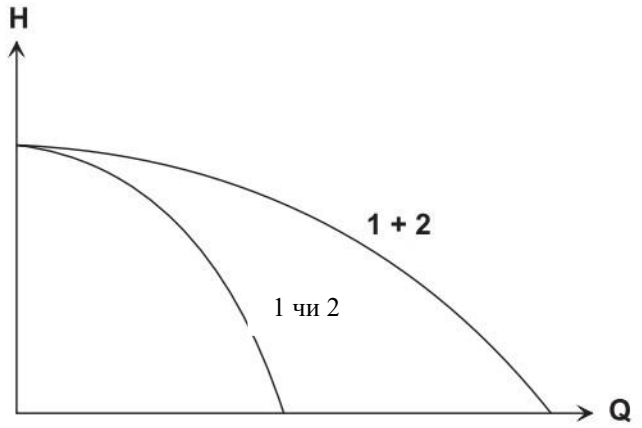


Рисунок 1.8 - Два однотипні насоси, включених паралельно

Послідовне включення двох або більше насосів (рисунок 1.9) необхідно для збільшення натиску.

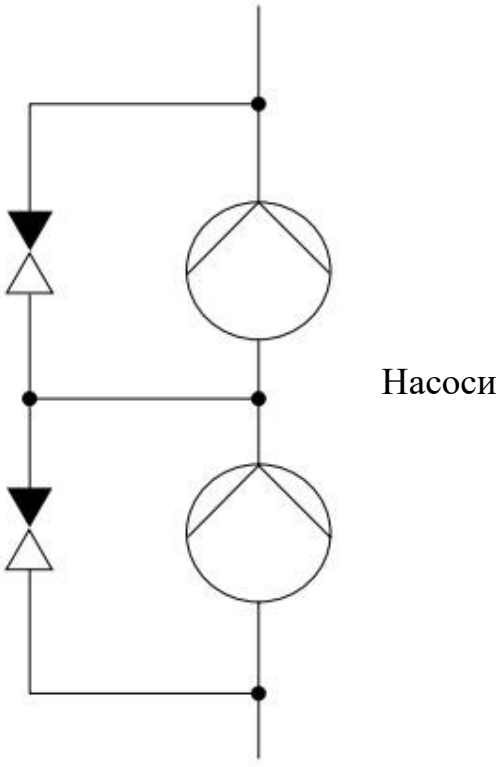


Рисунок 1.9 - Послідовне включення насосів

Для працюючих послідовно насосів загальний натиск (рисунок 1.10) при будь-якому заданому поданні визначається сумою значень висоти нагнітання кожного окремого насоса.

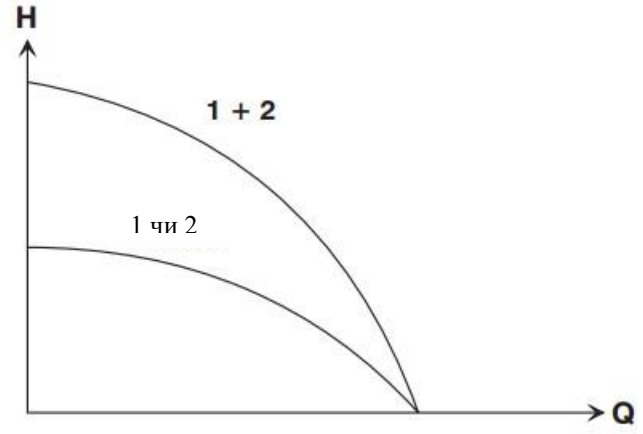


Рисунок 1.10 - Два однотипні насоси, включених послідовно

Висновок до розділу 1

У першому розділі було проведено комплексний аналіз насосної станції, як об'єкта автоматизації та керування. Розглянуто структуру типової насосної станції другого підйому для котеджного селища та визначено склад її обладнання, що включає силові агрегати, перетворювачі частоти, датчики та технологічні контролери. Зокрема, наведено принципову схему електропостачання від трансформаторної підстанції до машинної зали, де розміщені основні та запасні відцентрові насоси.

Встановлено ключові характеристики насосів, такі як натиск, подача, потужність та ККД, які є критичними для підбору устаткування та забезпечення енергоефективної експлуатації. На основі вихідних даних для селища з населенням 500 осіб було розраховано необхідний натиск (H = 38,4 м) та максимальну годинну подачу, яка приблизно дорівнює 9 $м^3$/год. Ці параметри визначають вибір діапазону зміни режимів роботи системи.

Обґрунтовано використання регульованого електроприводу, де основним варіантом визначено частотно-керований привід з асинхронним короткозамкнутим двигуном. Описано методи регулювання роботи насосів через зміну характеристик мережі або самих агрегатів, а також проаналізовано режими

їхньої спільної роботи, включаючи паралельне включення для збільшення подачі та послідовне — для підвищення натиску. Даний аналіз створює необхідну базу для подальшого розрахунку потужності обладнання та побудови математичної моделі перехідних процесів.

2 РОЗРАХУНОК І ВИБІР ПОТУЖНОСТІ НАСОСА З ЕЛЕКТРОДВИГУНОМ

2.1 Початкові дані для проектування

Таблиця 2.1

Початкові дані

H_0н, м	Нм, м	Нс, м	Qм, м^3/ч
50	38,4	10	9

2.2 Система Grundfos

Компанія Grundfos є світовим лідером у виробництві передо- вого насосного устаткування і задає тенденції в області технологій обра- ботки води.

2.2.1 Розрахунок потужності насоса

Потужність насоса визначається по формулі [10]:

$$Nop = \frac{Qм \cdot H_м \cdot \rho \cdot g}{1000 \cdot \eta_н},$$

де $Q_м$- це максимальна витрата, м^3/з; $H_м$- максимальний натиск; $\rho = 999,87$ кг/м^3 - щільність води; $g = 9,8$ м/с^2 - прискорення вільного падіння; $\eta_н = 83\%$ - коефіцієнт корисної дії насоса.

$$N_{ор} = \frac{9 \cdot 38,4 \cdot 999,87 \cdot 9,8}{3600 \cdot 1000 \cdot 0,83} = 1,14 кВт$$

Потужність електродвигуна насоса розраховується по формулі:

$$Nдв = Nop \cdot k_{З},$$

де $k_З = 1{,}3$ - Коефіцієнт запасу;

$N_{ор}$ - потужність насоса.

$$N_{дв} = 1{,}14 \cdot 1{,}3 = 1{,}482 кВт$$

Вибір насоса робитимемо по наступній умові:

$$Nдв \geq Nор \qquad (2.1)$$

По умові (2.1) вибором став насос - Grundfos SP 17-4N, який представлений на рисунку 2.1 [3].

$$2{,}2 кВт \geq 1{,}482 кВт$$

У цій системі управління працюватиме один насос і ще один насос буде знаходиться в резерві, це обумовлено тим що вибраний насос брався із запасам по максимальних значеннях натиску і подання.

Параметри вибраного насоса представлені в таблиці 2.2



Рисунок 2.1 - Насос Grundfos SP 17-4N

Таблиця 2.2

Параметри насоса Grundfos SP 17-4N

$U_{1нас}$, В	$NH_{нас}$, кВт	Нн, м	Qн, $м^3$/ч	Т, ˚С
380	2.2	38	17	40

Цей насос є погружным, призначений для перекачування води. Устоновка можлива, як в вертикальному так і вгоризонтальному положенні. Металеві деталі виготовлені з нержавіючої сталі EN 1.4301 (AISI 304), яка забезпечує високу корозійну стійкість. Насос оснащений погружним електродвигуном MS402 з прямим пуском (рисунок 2.2), в герметичному корпусі. Параметри електродвигуна приведені в таблиці 2.3



Рисунок 2.2 - Електродвигун MS402

Таблиця 2.3 - Параметри двигуна насоса

Номінальна потужність, кВт	Рн $_{дв}$	2,2
Номінальна частота обертання, про/мін	nн $_{дв}$	2900
Номінальний струм, А	Ін $_{дв}$	5,75
Лінійна напруга, В	U1н $_{дв}$	380
Частота мережі, Гц	f1	50
Коефіцієнт корисної дії %		0,83
Коефіцієнт потужності		0,82

2.2.2 Побудова гідравлічних характеристик насоса

Характеристика насоса розраховується по наступній формулі:

$$H = H_{он}\left(\frac{\omega}{\omega_н}\right)^2 - C \cdot Q_2$$

де H - це натиск насоса, м;

$H_{0\,н}$ – насоса при расходе води рівним 0, м;

$\omega_н$ - номінальна скорость обертання двигуна, рад/з;

ω – скорость обертання двигуна, рад/з;

Q - витрата насоса, м^3/з;

$З$ - конструктивний коефіцієнт насоса, який визначається по формулі :

$$C = \frac{(H_{он} - H_н)}{Q_н^2} = \frac{(50 - 38{,}4)}{(2{,}5^{-3})^2} = 18{,}56 \cdot 10^5$$

Формула для визначення характеристики магістралі:

$$H = HC + R \cdot Q^2,$$

де HC – це статичний натиск; R - коефіцієнт опору магістралі визначуваний по формулі:

$$R = \frac{(H_н - H_с)}{Q_н^2} = \frac{(38{,}4 - 10)}{(2{,}5^{-3})^2} = 45{,}44 \cdot 10^5$$

Будуємо дві характеристики насоса при різній швидкості обертання :

1) Швидкість обертання двигуна дорівнює номінальній швидкості $\omega = \omega_н$.

2) Швидкість обертання двигуна дорівнює половині номінальною $\omega = 0{,}5 \cdot \omega_н$.

Далі будуємо характеристику магістралі.

За отриманими даними побудуємо гідравлічну характеристику, приведену на рисунку 2.3.

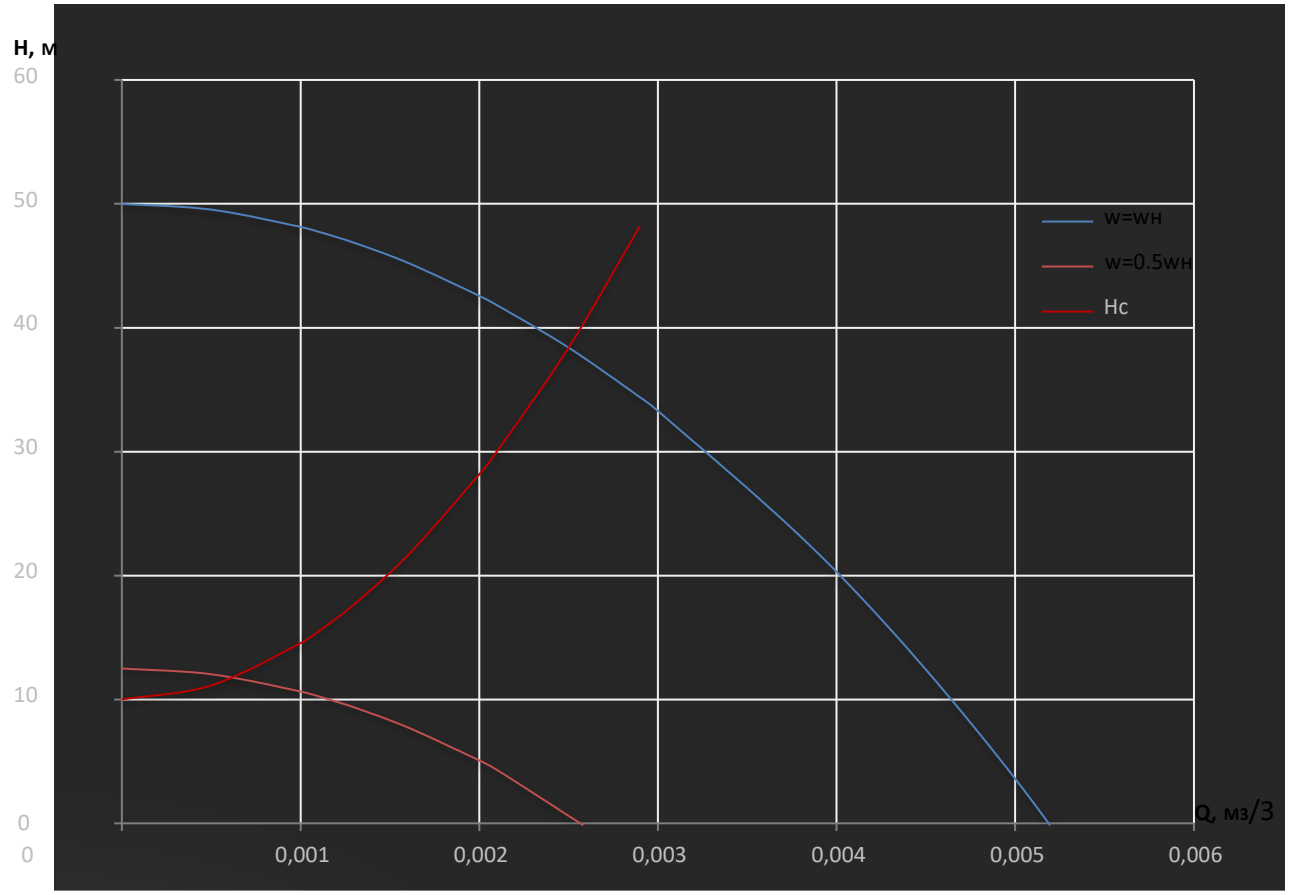


Рисунок 2.3 - Гідравлічна характеристика насоса

2.2.3 Вибір перетворювача частоти

Для електроприводу насоса використовується асинхронний двигун. Отже, перетворювач частоти має бути з використанням проміжної ланки постійного струму. На рисунку 2.4 представлена схема електроприводу по системі перетворювач частоти - асинхронний двигун.

Умови для вибору перетворювача частоти :

$$\begin{cases} U_{пр\,вих} \geq U_{н\,дв}; \\ I_{н\,пр} \geq I_{н\,дв}; \\ S_{н\,пр} \geq S_{н\,дв}. \end{cases}$$

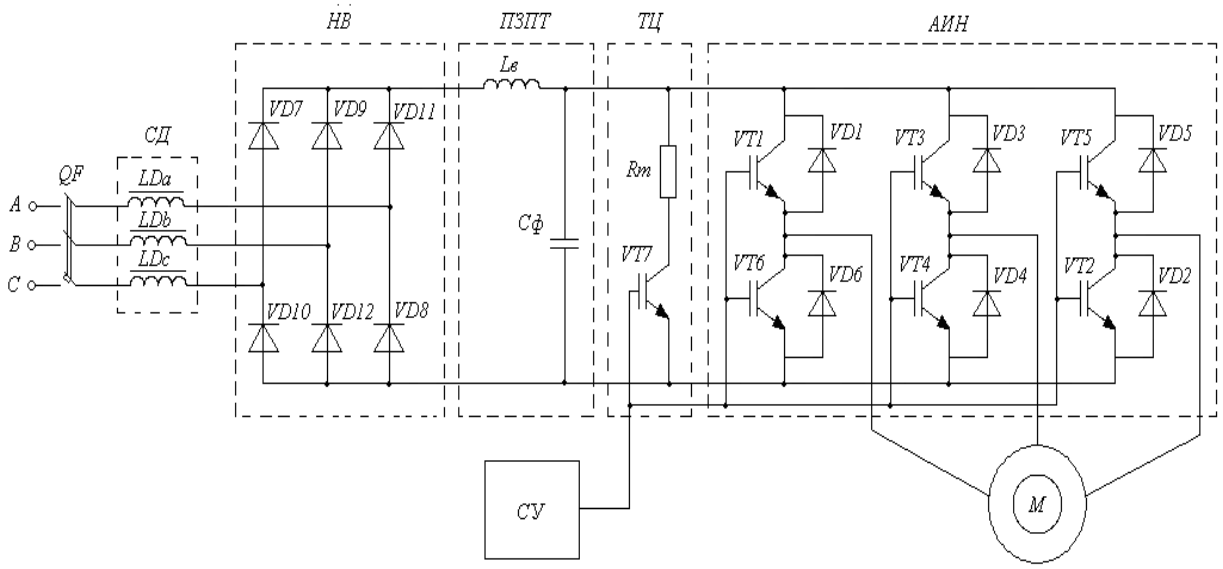


Рисунок 2.4 - Принципова схема системи ПЧ-АД з проміжною ланкою постійного струму

Повна номінальна потужність двигуна визначається по формулі:

$$S_{ндв} = \frac{P_{н.дв}}{\cos\varphi \cdot \eta_н} = \frac{2{,}2}{0{,}85 \cdot 0{,}83} = 3{,}12 кВ \cdot А$$

Оптимальним вибором буде перетворювач частоти Grundfos CUE 3x380-440 В, 50 Гц, IP 20/21, представлений на рисунку 2.5.

$$\begin{cases} 380 У \geq 380 \text{В} \\ 10 А > 5.75 \text{А} \\ 4 кВт > 3{,}12 \text{кВт} \end{cases}$$



Рисунок 2.5 - Перетворювач частоти Grundfos CUE

CUE є серією перетворювачів частоти для регулювання частоти обертання широкого модельного ряду насосів Grundfos. Якщо встановлений перетворювач частоти CUE, то додатковий захист двигуна не потрібно. Перетворювачі CUE відрізняються швидкістю і легкістю перво- початкового налаштування і запуску в експлуатацію в порівнянні із стандартними перетворювачами частоти і вимагають виконання обмеженого мінімального числа налаштувань при запуску. Необхідно просто ввести значення перемінних, виходячи з конкретних умов експлуатації, і CUE автоматично установить усі інші параметри, необхідні для ефективного регулювання частоти обертання насоса. Перетворювач частоти CUE забезпечує плавне перекачування рідини, а також захист системи від гідроудару.

Разом з перетворювачем частоти можна використати наступні датчики. Вихідний сигнал усіх датчиків складає 4-20 мА.

- Датчики тиску до 25 панів
- датчики температури
- датчики перепаду тиску
- датчики перепаду температури
- витратоміри

Входи і виходи :

- Один роз'єм RS - 485 GENIbus;
- Один аналоговий вхід 0-10 В, 0/4-20 мА
- зовнішнє встановлене значення;
- Один аналоговий вхід 0/4-20 мА
- вхід датчика, вхід зворотного зв'язку;
- Один аналоговий вихід 0-20 мА;
- Чотири цифрові входи
- пуск/останов і 3 програмовані входи;
- Два сигнальні реле (C/NO/NC) програмовані.

Режими роботи:

Нормальний: Насос працює у вибраному режимі управління. Режими управління - різні способи регулювання частоти обертання насоса, коли

встановлений нормальний робочий режим.

Зупинка: Насос відключений користувачем.

Мінімальна характеристика: Насос працює з мінімальною установленною частотою обертання. Цей режим можна використати, наприклад, в періоди, коли потрібно дуже маленьку витрату.

Максимальна характеристика: Насос працює з максимальною установленною частотою обертання. Цей режим можна використати, наприклад, для відведення повітря з насоса під час монтажу.

За рахунок цього перетворювача частоти, можна відмовитися від вибору і установки ПЛК, оскільки вбудований ПЛК перетворювача частоти повністю виконує необхідні функції для роботи системи, і має необхідні входи і виходи. У таблиці 2.4 приведені характеристики Grundfos CUE.

Таблиця 2.4 - Технічні характеристики перетворювача Grundfos CUE

Модель перетворювача		CUE 3x380-440 В	
Номінальна потужність двигуна, кВт		Рн $_{пр}$	5,5
Вихід	Повна потужність перетворювача, кВт	Sн $_{пр}$	4
	Номінальний вихідний струм, А	Iн $_{пр}$	10
	Вихідна напруга, В	Uпр $_{вих}$	3-х фазно 380-440В
	Вихідна частота, Гц	fвих	0-100 Гц
Вхід	Номінальний вхідний струм, А	Iвх $_{пр}$	9
	Номінальна вхідна напруга, В	Uвх $_{пр}$	380–480 В
	Номінальна частота мережі, Гц	f	50 / 60 Гц

Цей перетворювач частоти підтримує функцію «grandfos go». Grandfos go є мобільним застосуванням для професійного використання обладнання grandfos. Це застосування використовується для безпровідного підключення до мобільного пристрою і передачі даних.

Для використання цієї функції потрібний спеціальний модуль Grandfos MI 301 (рисунок 2.6).



Рисунок 2.6 - Модуль Grandfos MI 301

За допомогою цього застосування можливі управління і контроль роботи насоса з мобільного телефону. Управління устаткуванням, формування звітів і збір даних займає мінімум часу.

2.2.4 Пристрій для захисту від "сухого ходу"

До вибраного перетворювача частоти компанія GRUNDFOS надає облаштування LiqTec для захисту від «сухого ходу»

Особливості і переваги:

- захист від "сухого ходу" і перегрівання електродвигуна незалежно від перекачуваного середовища, температури і тиску;
- автоматичний/ручний перезапуск при припиненні ситуації "сухого ходу";
- аварійна сигналізація індикація режиму роботи.

Приклад підключення LigTec до системи управління наведений на рисунку 2.7.

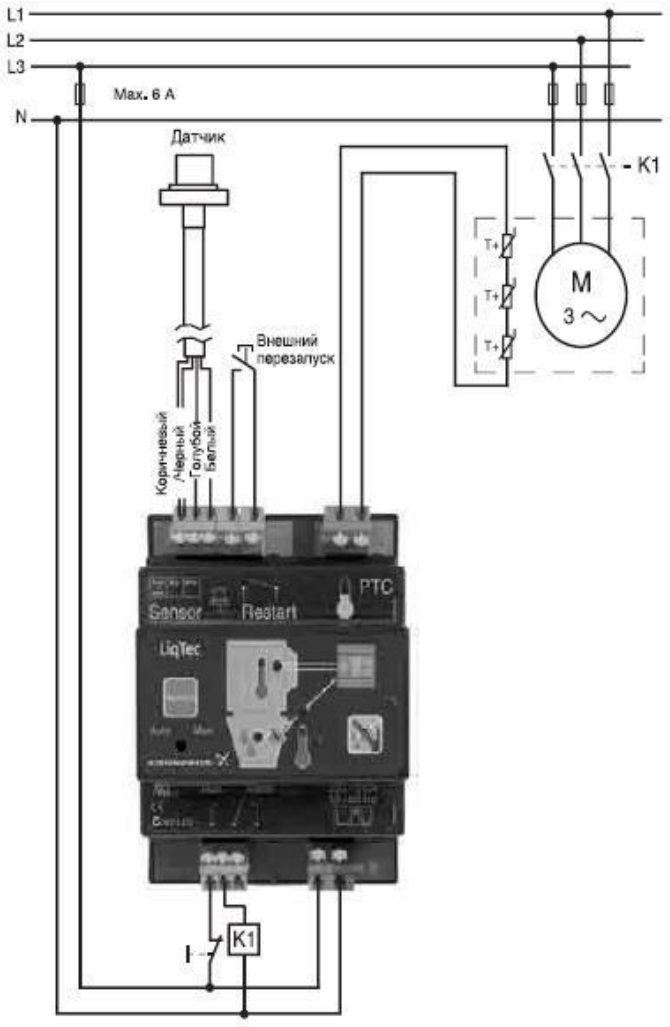


Рисунок 2.7 - Схема підключення LigTec до системи управління

2.2.5 Вибір датчика тиску

Датчик тиску призначений для виміру тиску рідини.

Був вибраний датчик тиску MBS - 3000(рисунок 2.8) виробника Grandfos, характеристики якого приведені в таблиці 2.5.



Рисунок 2.8 - Датчик тиску MBS - 3000

Таблиця 2.5

Основні технічні дані датчика тиску MBS - 3000

Діапазон вимірів тиску, панів	Від 0 - 2,5 до 0 - 25
Вихідний сигнал(аналоговий), мА	4…20
Точність виміру	≤ ± 0.5% від діапазону виміру
Час реакції, мс	<4
Робоча температура, C	-40…80 °C
Клас захисту датчика	IP65

Схема підключення датчика тиску з штекером DIN 43650 приведена на рисунку 2.9.

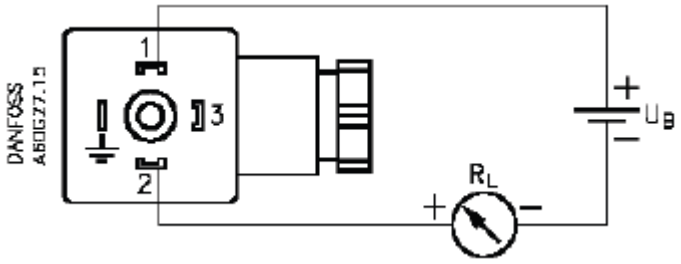


Рисунок 2.9 - Схема підключення датчика тиску

2.3 Комбінована система

2.3.1 Вибір насоса

Вибір насоса робитимемо по наступній умові:

$$N_{дв} \geq N_{ор};$$

$$N_{дв} = 1{,}482 кВт.$$

По умові був вибраний насос - Metabo HWW 9000/100 G, який представлений на рисунку 2.10. Параметри вибраного насоса представлені в таблиці 2.6 [17].

$$1{,}9 кВт \geq 1{,}482 кВт$$



Рисунок 2.10 - Насос Metabo HWW 9000/100 G

Таблиця 2.6

Параметри насоса Metabo HWW 9000/100 G

U1нас, В	NHнас, кВт	Нн, м	Qн, $м^3$/ч	Т, ˚С
220	1.9	35	10	40

Параметри двигуна цього насоса зведені в таблицю 2.7.

Таблиця 2.7

Параметри двигуна насоса

Номінальна потужність, кВт	Рн $_{дв}$	1,9
Номінальна частота обертання, про/мін	nн $_{дв}$	3000
Номінальний струм, А	Iн $_{дв}$	5,75
Лінійна напруга, В	U1н $_{дв}$	220
Частота мережі, Гц	f1	50
Коефіцієнт корисної дії %	$\eta_{дв}$	0,75
Коефіцієнт потужності		0,69

2.3.2 Вибір перетворювача частоти

Оптимальним вибором буде перетворювач частоти VFD - 022E21T, представлений на рисунку 2.11 [16].

$$\begin{cases} 220В \geq 220\text{В} \\ 10А > 5.75\text{А} \\ 4{,}2кВт > 3{,}12\text{кВт} \end{cases}$$



Рисунок 2.11 - Перетворювач частоти VFD - 022E21T

Перетворювач частоти VFD - 022E21T має вбудований програмуємий логічний контроллер з можливістю програмування на різних мовах, об'ємом пам'яті до 500 кроків, має 2 аналогові входи і 1 вихід, 6 дискретних входу і 2 виходи, вбудований ПІД - регулятор.

Схема підключення цього перетворювача частоти приведена на рисунку 2.12. Усі технічні параметри цього перетворювача частоти зведені в таблицю 2.8.

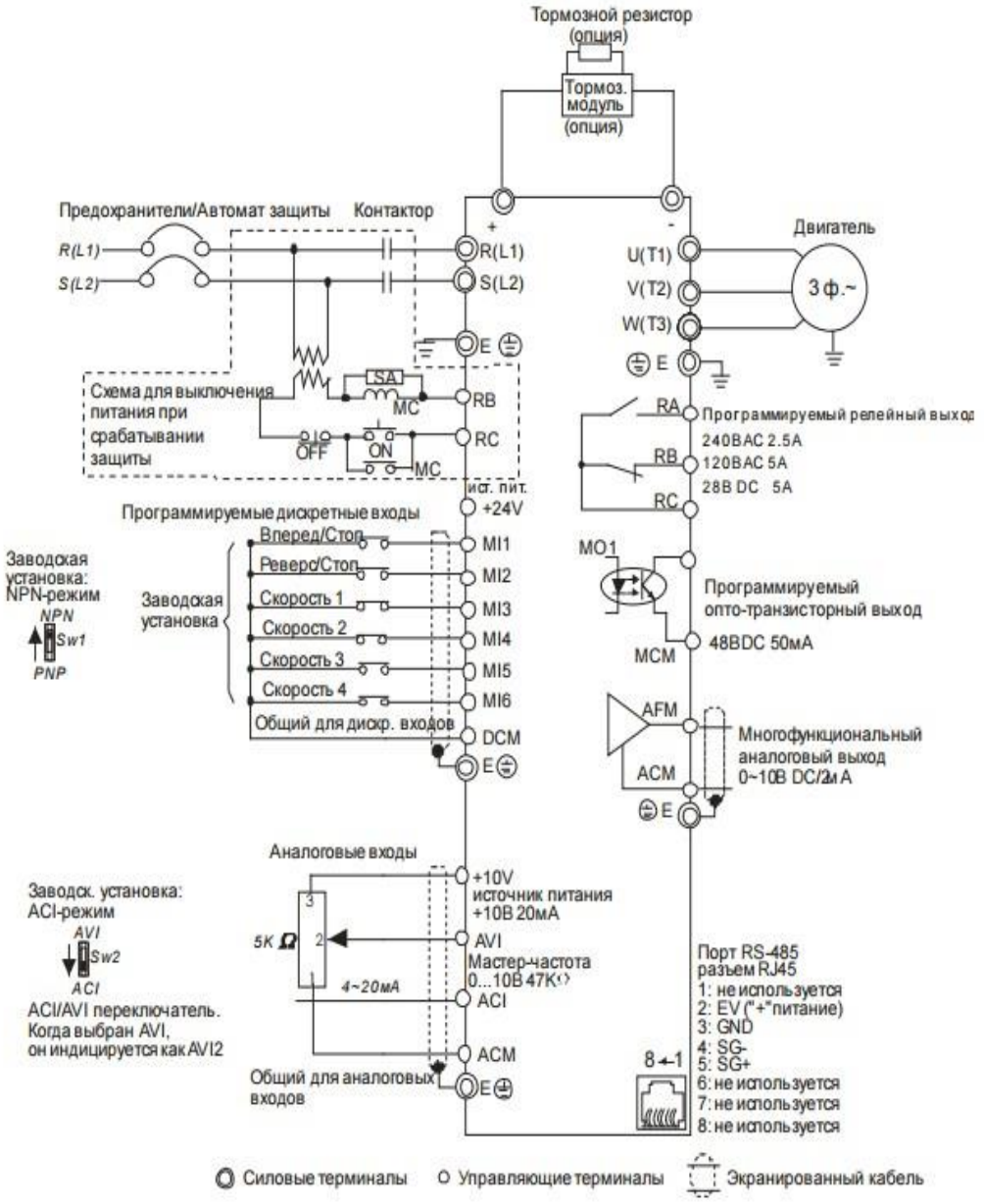


Рисунок 2.12 - Схема підключення перетворювача частоти VFD - 022E21T

Таблиця 2.8

Технічні характеристики перетворювача VFD - 022E21T

Модель перетворювача		DELTA VFD002E21T	
Номінальна потужність двигуна, кВт		Рн $_{пр}$	1,9
Вихід	Повна потужність перетворювача, кВт	Sн $_{пр}$	4,2
	Номінальний вихідний струм, А	Ін $_{пр}$	11
	Вихідна напруга, В	Uпр $_{вих}$	3-х фазне від 0 до напруги живлення
	Вихідна частота, Гц	fвіх	0,1-600 Гц
Вхід	Номінальний вхідний струм, А	Івх $_{пр}$	24/15
	Номінальна вхідна напруга, В	Uвх $_{пр}$	200–240 В
	Номінальна частота мережі, Гц	f	50 / 60 Гц

2.3.3 Пристрій для захисту від "сухого ходу"

Був вибраний датчик сухого ходу Lp/3 (рисунок 2.13), який призначений для автоматичного виключення насоса без поломки устаткування.



Рисунок 2.13 - Датчик сухого ходу Lp/3

Технічні дані цього датчика сухого ходу зведені в таблицю 2.9.

Таблиця 2.9

Основні технічні дані датчика сухого ходу Lp/3

Параметри електричної мережі	220 В
Номінальна частота	50 Гц
Робоча температура	-1…40 °С
Клас захисту датчика	IP 44

2.3.4 Вибір датчика тиску

Був вибраний датчик тиску DMD 331(рисунок 2.14), характеристики якого приведені в таблиці 2.10.



Рисунок 2.14 - Датчик тиску DMD 331

Особливості цього датчика:

– захист від неправильного підключення;

– компактність;

– міцність і надійність у важких експлуатаційних умовах.

Таблиця 2.10

Основні технічні дані датчика тиску DMD 331

Діапазон вимірів тиску, панів	Від 0 - 0,2 до 0 - 16
Вихідний сигнал(аналоговий), мА	4…20
Точність виміру	≤ ± 0.5% від діапазону виміру
Час реакції, мс	<4
Робоча температура, C	-25…125 °C
Клас захисту датчика	IP 65-67

2.4 Порівняння систем

При аналізі приведених систем управління насосною станцією перевага буде зроблена на користь системи Grundfos з кількох причин:

– Grundfos є світовим лідером у виробництві і підборі якіснішого і довго експлуатованого насосного устаткування;

– Насоси обох систем оптимально підібрані для даного технологічного процесу, але насос фірми Grandfos по своїх характеристикам перевершує насос

фірми Metabo.

– Обидва перетворювачі частоти мають вбудований ПЛК, що дає значні переваги і дозволяє відмовитися від купівлі окремого ПЛК. Головними плюсами ПЧ системи Grundfos являється велика кількість аналогових, цифрових і дискретних входів і виходів, потужніший функціонал і підтримка додаткових функцій, як «grundfos go».

Далі здійснюватиметься розрахунок по вибраній системі Grundfos.

Висновок до розділу 2

У другому розділі бакалаврської роботи було здійснено розрахунок потужності та технічний вибір обладнання для системи водопостачання. На основі вихідних даних для котеджного селища, що потребує натиску 38,4 м та подачі 9 $м^3$/год, розраховано необхідну потужність насоса, яка склала 1,14 кВт. Враховуючи коефіцієнт запасу 1,3, потужність приводного електродвигуна визначена на рівні 1,482 кВт, що стало базовим параметром для подальшого підбору устаткування.

Проведено порівняльний аналіз двох варіантів комплектації: спеціалізованої системи Grundfos та комбінованої системи на базі Metabo. За результатами порівняння перевагу віддано системі Grundfos , оскільки вона базується на занурювальному насосі SP 17-4N та інтелектуальному перетворювачі частоти CUE. Обраний перетворювач має потужність 4 кВт та вбудований логічний контролер , що дозволяє автоматизувати роботу станції без встановлення додаткових ПЛК, а також забезпечує захист системи від гідроударів.

Для забезпечення надійної експлуатації об’єкта підібрано допоміжне обладнання, зокрема пристрій захисту від «сухого ходу» LiqTec та аналоговий датчик тиску MBS-3000 з діапазоном вимірювань до 25 бар. Таке технічне рішення дозволяє реалізувати енергоефективне частотне регулювання та дистанційний моніторинг параметрів системи. Виконані розрахунки та обрана специфікація обладнання є достатньою основою для подальшого математичного моделювання процесів у системі автоматичного керування.

3 МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ І СТАТИЧНИХ ПРОЦЕСІВ

3.1 Розрахунок параметрів схеми заміщення

Була вибрана скалярна система регулювання. Схема заміщення асинхронного короткозамкнутого двигуна в режимі, що встановився, приведена на рисунку 3.1 [14].

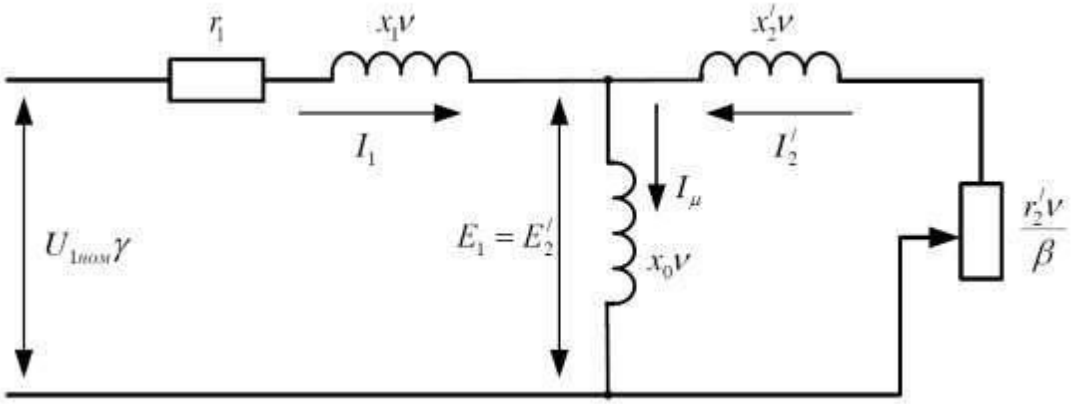


Рисунок 3.1 - Схема заміщення асинхронного двигуна при частотному управлінні

На схемі заміщення прийняті наступні позначення:

-U1ном — номінальна напруга фази статора;

-E1 — фазне значення ЕДС статора;

-E2' — фазне значення ЕДС ротора, приведене до обмотки статора;

-I1 — фазний струм статора;

-I2 — фазний струм ротора, приведений до обмотки статора;

-Iμ — струм намагнічення фази;

-γ = U1/Uном — відносна напруга статора;

-ν = f1/ f1ном — відносна частота струму статора;

-β = f2/f1ном — параметр абсолютного ковзання або відносна частота струму ротора, де f1, f2 — поточні значення частот статора і ротора;

-f1ном - номінальна частота струму статора.

$$I_{іном} = \frac{P_{ном} \cdot 10^3}{3 \cdot U_{номф} \cdot \cos\varphi_{ном} \cdot \eta_{ном}} = \frac{2{,}2 \cdot 10^3}{3 \cdot 220 \cdot 0{,}83 \cdot 0{,}82} = 4{,}9\,A$$

де $U_{ном.ф} = \frac{U_{ном}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} =$ 220В - номінальна фазна напруга ланцюга статора.

Активний опір фази статора :

$$r_1 = \frac{U_{ном.ф.} \cdot S_{ном}}{I_{1ном}} = \frac{220 \cdot 0{,}03}{4{,}9} = 1{,}35Ом,$$

де $S_{ном} = \frac{n_0 - n_{ном}}{n_0} = \frac{3000 - 2900}{3000} = 0{,}03$ – номінальне ковзання двигуна;

$n = \frac{60 \cdot fc}{рн} = \frac{60 \cdot 50}{1} = 3000$ *об/*хв - синхронна частота обертання магнитного поля статора;

fc - частота струму живлячої мережі;

рн $= 1$ - число пар полюсів двигуна.

Номінальна кутова швидкість магнітного поля статора двигуна :

$$\omega_1 = \frac{\pi \cdot n_0}{30} = \frac{3{,}14 \cdot 3000}{30} = 314с^{-1}$$

Номінальна кутова швидкість валу двигуна

$$\omega_{ном} = \frac{\pi \cdot n_{ном}}{30} = \frac{3{,}14 \cdot 2900}{30} = 303{,}5с^{-1}$$

Номінальний момент двигуна

$$M_{ном} = \frac{P_{ном} \cdot 10^3}{\omega_{ном}} = \frac{2{,}2 \cdot 10^3}{303{,}5} = 7{,}2Нм$$

Максимальний момент двигуна

$$M_{\max} = \lambda \cdot M_{ном} = 2,8 \cdot 7,2 = 20,16 \text{Нм}$$

Індуктивний опір короткого замикання :

$$x_к = \sqrt{\left(\frac{3 \cdot U_{ном.ф}^2}{2 \cdot \omega_1 M_{мах}} - r_1\right)^2 - r_1^2} = \sqrt{\left(\frac{3 \cdot 220^2}{2 \cdot 314 \cdot 20.16} - 1.35\right)^2 - 1.35^2} = 10.02 Ом$$

Індуктивний опір статора і приведене ротора:

$$x_1 = x_2'' \frac{x_к}{2} = \frac{10,02}{2} = 5.01 Ом$$

Приведене до обмотки статора активний опір фази ротора :

$$r_2^* = S_{ном}\left(\frac{3 \cdot U_{ном.ф}^2}{2 \cdot \omega_1 \cdot M_{ном}} - r_1\right) + S_{ном}\sqrt{\left(\frac{3 \cdot U_{ном.ф}^2}{2 \cdot \omega_1 \cdot M_{ном}} - r_1\right)^2 - \left(r_1^2 + x_k^2\right)} =$$

$$1.35\left(\frac{3 \cdot 220^2}{2 \cdot 314 \cdot 20.16} - 1.35\right) + S_{ном}\sqrt{\left(\frac{3 \cdot 220^2}{2 \cdot 314 \cdot 20,16} - 1,35\right)^2 - \left(1,35^2 + 10,02^2\right)} = 14,21 Ом$$

Номінальний приведений струм ротора :

$$r_{2ном} = \sqrt{\left(\frac{M_{ном} \cdot \omega_1 \cdot S_{ном}}{3 \cdot r_2''}\right)} = \sqrt{\left(\frac{7,2 \cdot 314 \cdot 0,03}{3 \cdot 14,21}\right)} = 1,59 A$$

Номінальний коефіцієнт потужності роторного ланцюга :

$$\cos\varphi_{2ном} = \frac{r_2^*}{\sqrt{r_2^{*2} + \left(x_2^* \cdot S_{ном}\right)^2}} = \frac{14,21}{\sqrt{14,21^2 + \left(5,01 \cdot 0,03\right)^2}} = 0,997$$

Тоді $\sin \varphi_{2\ ном} = \sqrt{1 - \cos \varphi_{2\ ном}} = \sqrt{1 - 0,997} = 0,054$.

Номінальний струм ланцюга, що намагнічує :

$$I_{\mu.ном} = \sqrt{\left(\Gamma_{2.ном} \cdot \sin \varphi_{2.ном}\right)^2 + I_{1.ном}^2 - I_{2.ном}^{*2} - I_{2.ном}^{*}} \cdot \sin \varphi_{2ном} =$$
$$= \sqrt{\left(1,59 \cdot 0,54\right)^2 + 4,9^2 - 1,59^2} - 1,59 \cdot 0,054 = 4,54A$$

Номінальний ЕДС фази статора :

$$E_{1ном} = E_{ном.ф} \cdot (0,985\text{-}0,00375 \cdot p_н) = 220 \cdot (0,985\text{-}0,00375 \cdot 1) = 215,9В$$

Індуктивний опір намагнічення ланцюгу :

$$x_o = \frac{E_{1ном.}}{I_{\mu ном.}} = \frac{215,9}{4,54} = 47,6Ом$$

Коефіцієнти розсіяння обмоток статора і ротора :

$$\tau_1 = \tau_2 = \frac{x_1}{x_0} = \frac{5,01}{47,6} = 0,105$$

Загальний коефіцієнт розсіяння :

$\tau_{заг} = \tau_1 + \tau_2 + \tau_1 + \tau_2 = 0,105 \cdot 4 = 0,421$

Визначаються коефіцієнти:

$$b = \tau 1 \cdot (1 + \tau 2) = 0,105 \cdot (1 + 0.1050 \approx 0,116$$
$$c = x0 \cdot \tau_{заг} = 47,6 \cdot 0,421 = 20$$
$$d = \frac{rl}{x0} = \frac{1,35}{47.6} = 0,028$$
$$e = 1 + \tau 1 = 1 + 0.105 = 1,105$$

Далі виходячи з функціональної схеми, складена структурна схема управління електроприводом, приведена на рисунку 3.2.

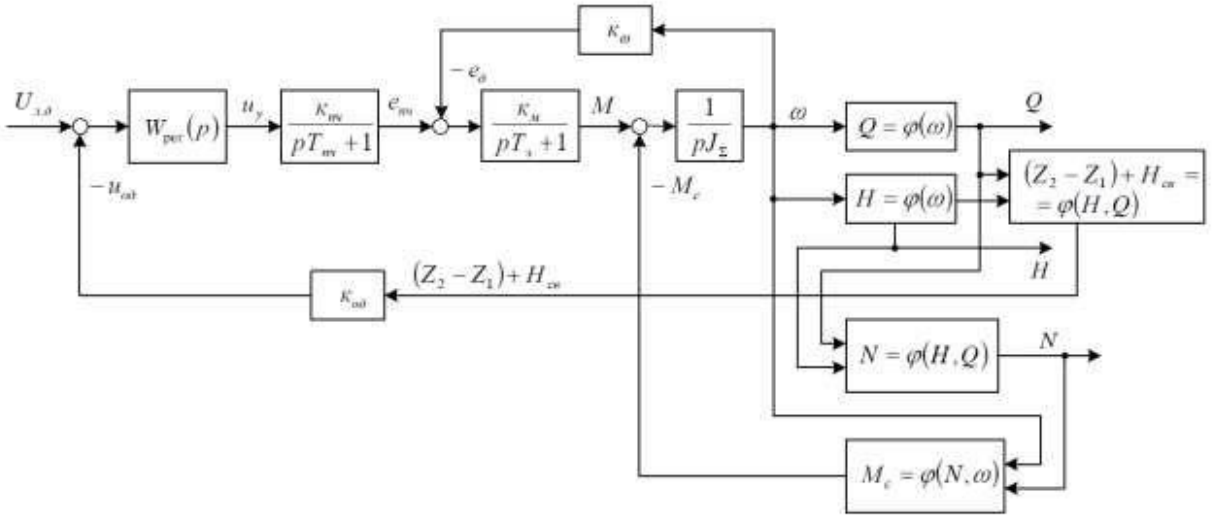


Рисунок 3.2 - Структурна схема управління електроприводом

Далі будуть зроблені рассчеты параметрів математичної моделі. Розрахунок коефіцієнта зворотного зв'язку по струму:

$$W_{ве} = k\omega = \frac{I_{\text{м.ном}} \cdot (x_0 + x_1)}{\omega_{1ном}} = \frac{4,54 \cdot (47,6 + 5,01)}{314} = 0,761$$

Розрахунок ланки моменту двигуна :

$$W_{m(p)} = \frac{k_m}{pT_e + 1} = \frac{0.947}{0.0045s + 1}$$

$$k_m = \frac{M_{ном.}}{k_\omega \cdot (\omega_{1/ном} - \omega_{ном})} = \frac{7,2}{0,761 \cdot (314 \cdot 304)} = 0,947$$

$$T_э = \frac{Le}{Re} = \frac{0,029}{6,38} = 0,0045$$

Щоб визначити електромагнітну постійну часу, треба зробити наступні розрахунки:

Знайдемо індуктивність розсіяння обмоток статора і ротора:

$$L_1 = L_2^* = \frac{x_1}{314} = \frac{x_2^*}{314} = \frac{5.01}{314} = 0.0159$$

Знайдемо індуктивність намагнічення контура :

$$L\mu = \frac{x_0}{314} = \frac{47.6}{314} = 0.151$$

Розрахуємо повну індуктивність оботок статора і ротора :

$$L_s = L_r = L_\mu + L_l = 0{,}151 + 0{,}0159 = 0{,}167 \text{ Гн}$$

Розрахуємо еквівалентну індуктивність:

$$L_e = L_{др} + \frac{3}{2} \cdot \kappa_i^2 \left(L_s - \frac{L_\mu^2}{L_r} \right) = \frac{3}{2} \cdot \left(2 \cdot \frac{\sqrt{3}}{\pi} \right)^2 \cdot \left(0{,}167 - \frac{0{,}151^2}{0{,}151} \right) = 0.029 Ом$$

Розрахуємо еквівалентний активний опір:

$$R_e = r_{др} + \frac{3}{2} \cdot \kappa_i^2 \left(r_1 + r_2^* \cdot \frac{L_\mu^2}{L_r} \right) = \frac{3}{2} \cdot \left(2 \cdot \frac{\sqrt{3}}{\pi} \right)^2 \cdot \left(0{,}135 + 14.21 - \frac{0{,}151^2}{0{,}151} \right) = 6.38 Ом$$

Передатна функція ланки швидкості визначається як:

( )
$$Wc \quad p = \frac{1}{pJ_\sum} = \frac{1}{0{,}045p}$$

$$J_\sum = J_{дв} + J_н \cdot 1{,}15 = 0{,}021 + 0{,}021 \cdot 1{,}15 = 0{,}045 кг \cdot м^2$$

Коефіцієнт передачі зворотного зв'язку по тиску:

$$k_{од} = \frac{U_{у.ном} / 2}{(Z2 - Z1) + H_{св.\max}} = \frac{10/2}{2{,}98} = 1{,}69$$

Коефіцієнт передачі насоса по тиску розраховується:

$$knac = \frac{H_{ном}}{\omega_{ном}} = \frac{38{,}4}{314} = 0{,}12$$

Передатна функція Пі-регулятора :

$$W_{ПІ}(p) = \frac{(Tэ\,p + 1)}{Tp\,p},$$

де Te - електромагнітна постійна часу;

Tp - постійна часу регулятора тиску:

$$T_p = \frac{2 \cdot T_{пч} \cdot \kappa_{пч} \cdot \kappa_M \cdot \kappa_{нас} \cdot \kappa_{од}}{j_\Sigma} = 0.037 Ом$$

Для завдання параметрів регулятора тиску в сучасних перетворювачах частоти використовується PID- контроллер. Обчислюються його складові. Коефіцієнт передачі пропорційної частини:

$$P = \frac{Te}{Tp} = 0{,}12$$

Коефіцієнт передачі інтегральної частини :

$$I = \frac{1}{Tp} = 27$$

Коефіцієнт передачі диференціальної частини :

$$D = 0$$

3.2 Побудова математичної моделі

Побудуємо модель насосного агрегату з використанням програмного продукту MatLab в середовищі Simulink, що складається з частотно-регульованого електроприводу і моделі насоса. До складу моделі входять:

- вхідне облаштування завдання по тиску(Constant1);
- суматор сигналів завдання по тиску і негативному зворотному зв'язку по тиску;
- ПІД регулятор (PID Controller);
- модель перетворювача частоти (Transfer Fcn);
- суматор ЕДС;
- передатна функція ланки моменту (Transfer Fcn1);
- суматор електромагнітного моменту двигуна і негативного моменту статичного опору;
- ланка швидкості двигуна (Integrator) і підсилювача (Gain1);
- внутрішній зворотний зв'язок по ЕДС двигуна (Gain).

Модель насоса складається з трьох підсистем (Subsystem, Subsystem1, Sub - system2). Відображення чисельних значень величин, вилічених в моделі

здійснюється за допомогою блоків Display, а динаміка зміни координат за допомогою осцилографів Scope. Ця модель приведена на рисунку 3.3 [14].

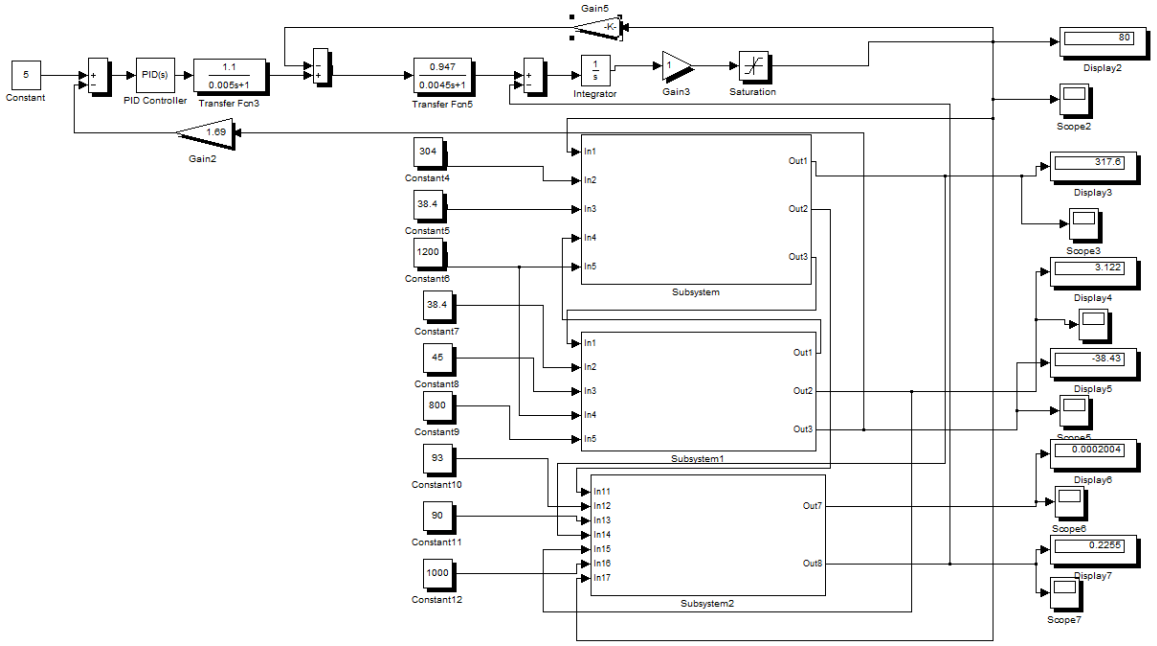


Рисунок 3.3 - Модель частотно-регульованого електроприводу і модель насоса

Були отримані осцилограми перехідних процесів :

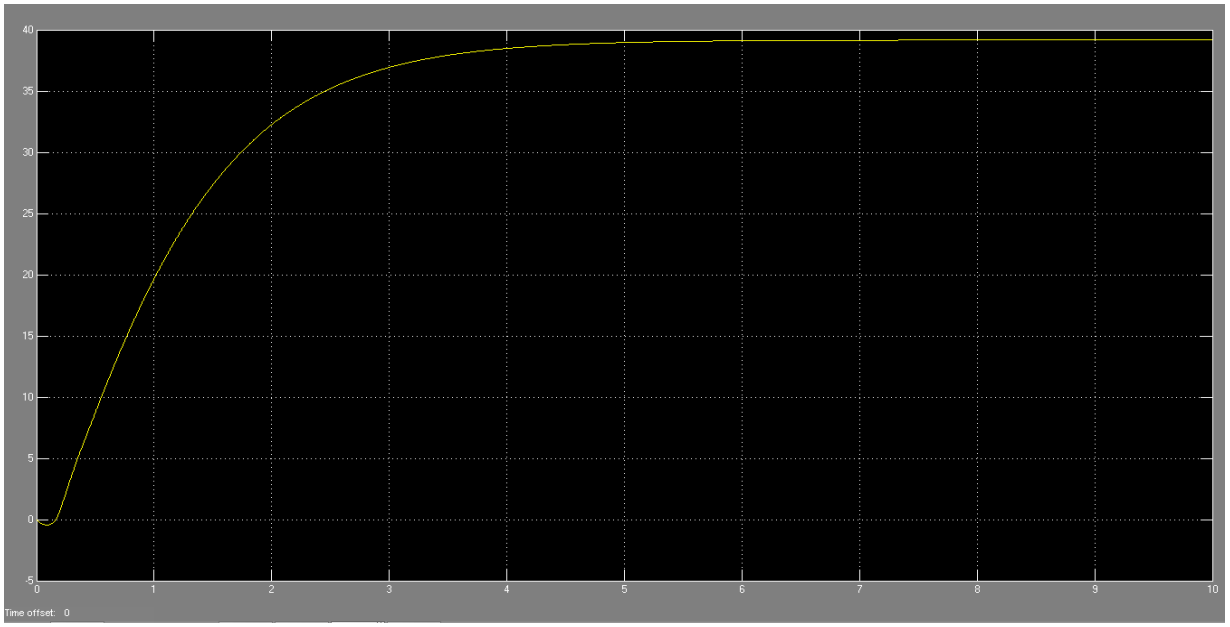


Рисунок 3.4 - Натиск насоса

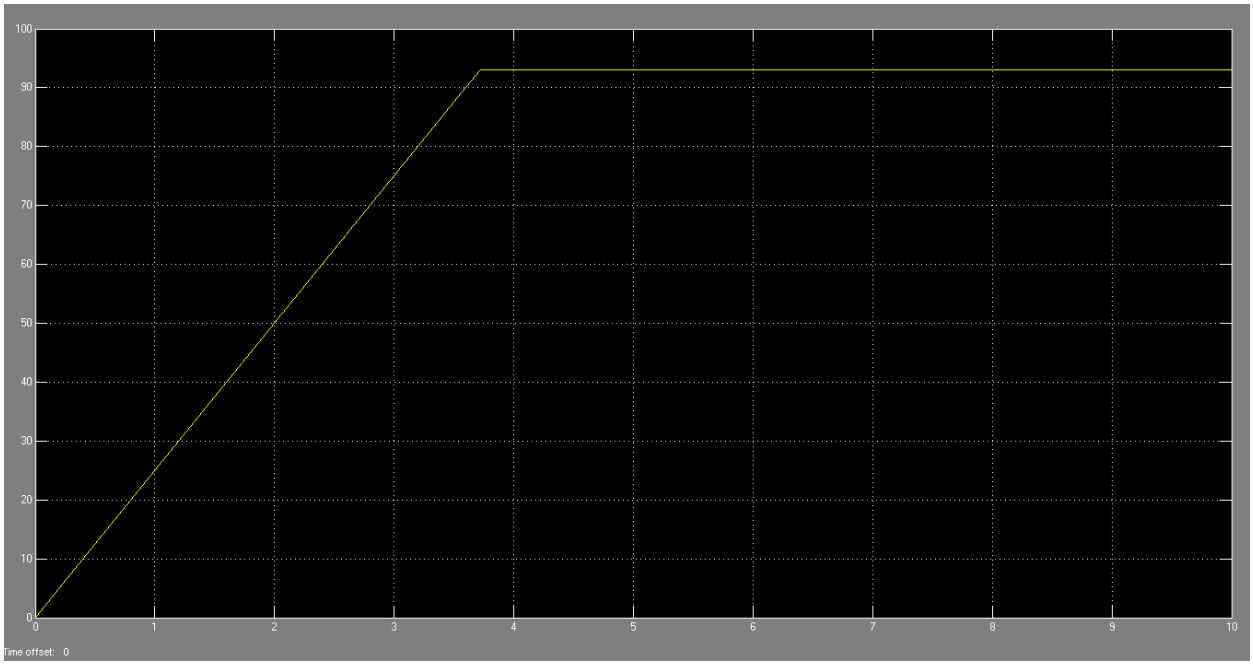


Рисунок 3.5 - Кутова швидкість двигуна

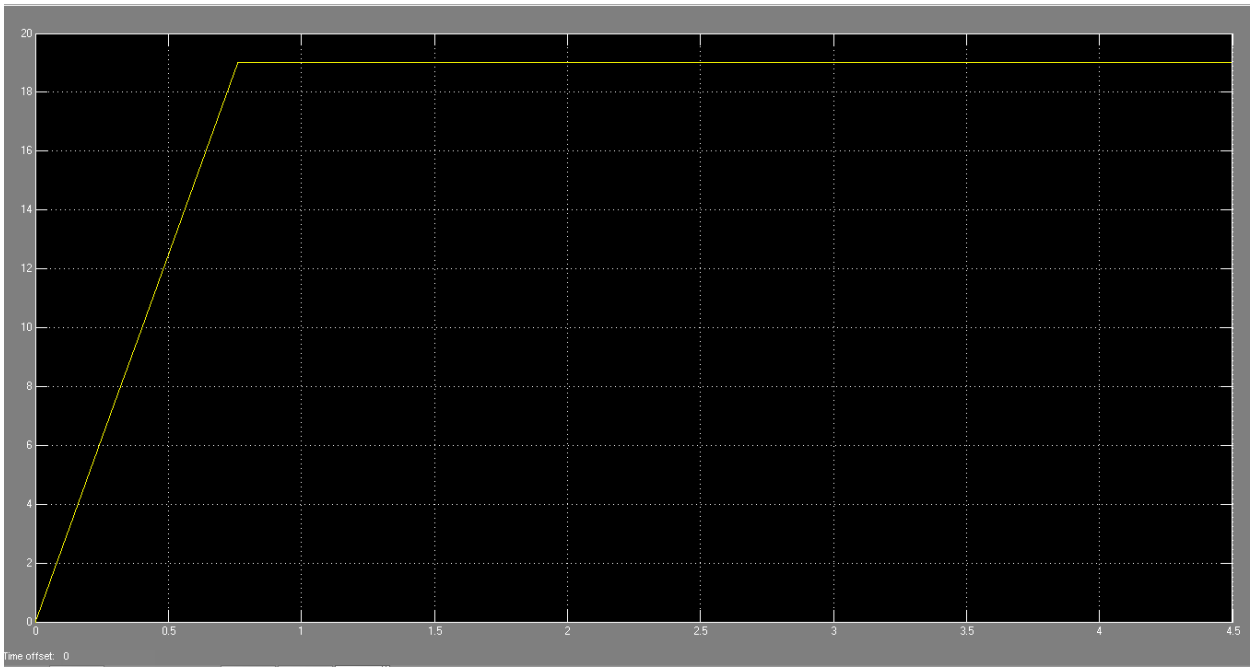


Рисунок 3.6 - Натиск, що стабілізується, при максимальному поданні

Висновок до розділу 3

У третьому розділі було проведено математичне моделювання динамічних та статичних процесів системи автоматичного керування насосною станцією. Основу дослідження склав розрахунок параметрів схеми заміщення для обраної скалярної системи регулювання з асинхронним короткозамкненим двигуном. Для побудови моделі було обчислено ключові електромеханічні характеристики, зокрема активні та індуктивні опори

статора і ротора, номінальний та максимальний моменти двигуна, а також еквівалентні значення індуктивності й опору. На базі цих параметрів розраховано коефіцієнти зворотних зв'язків за струмом та тиском, передавальні функції ланок системи, а також визначено налаштування ПІ-регулятора, де пропорційний коефіцієнт склав 0,12, а інтегральний — 27.

На основі отриманих розрахункових даних було розроблено структурну схему керування електроприводом. Практична реалізація математичної моделі насосного агрегату була виконана у програмному продукті MatLab в середовищі Simulink. Створена модель об'єднує підсистему частотно-регульованого електроприводу з налаштованим ПІД-регулятором та комплексну модель насоса, що складається з трьох підсистем. За результатами симуляції було отримано осцилограми перехідних процесів, які відображають динаміку зміни натиску насоса та кутової швидкості двигуна, а також підтверджують роботу системи при стабілізованому натиску та максимальному поданні.

РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Охорона праці - система законодавчих актів, соціально-економічних, організаційних, технічних, гігієнічних і лікувально-профілактичних заходів та засобів, що забезпечують безпеку, збереження здоров'я і працездатності людини в процесі праці. Науково-технічний прогрес вніс серйозні зміни в умовах виробничої діяльності працівників розумової праці. Їх праця стала більш інтенсивним, напруженим, які вимагають значних витрат розумової, емоційної і фізичної енергії. Це зажадало комплексного рішення проблем ергономіки, гігієни і організації праці, регламентації режимів праці і відпочинку.

Охорона здоров'я трудящих, забезпечення безпеки умов праці, ліквідація професійних захворювань і виробничого травматизму складає одну з головних турбот людського суспільства. Звертається увага на необхідність широкого застосування прогресивних форм наукової організації праці, зведення до мінімуму ручної, малокваліфікованої праці, створення обстановки, що виключає професійні захворювання і виробничий травматизм.

Даний розділ кваліфікаційної роботи присвячений розгляду наступних питань:

- організація робочого місця програміста;
- визначення оптимальних умов праці програміста.

4.1 Опис робочого місця програміста

Робоче місце - це частина простору, в якому інженер здійснює трудову діяльність, і проводить велику частину робочого часу. Робоче місце, добре пристосоване до трудової діяльності інженера, правильно і доцільно організоване, у відношенні простору, форми, розміру забезпечує йому зручне

положення при роботі і високу продуктивність праці при найменшому фізичному і психічному напрузі.

При правильній організації робочого місця продуктивність праці інженера зростає з 8 до 20 відсотків.

Згідно ГОСТ 12.2.032-78 конструкція робочого місця і взаємне розташування всіх його елементів повинне відповідати антропометричним, фізичним і психологічним вимогам. Велике значення має також характер роботи. Зокрема, при організації робочого місця програміста повинні бути дотримані наступні основні умови:

- оптимальне розміщення устаткування, що входить до складу робочого місця;
- достатній робочий простір, що дозволяє здійснювати всі необхідні рухи і переміщення;
- необхідно природне і штучне освітлення для виконання поставлених завдань;
- рівень акустичного шуму не повинен перевищувати допустимого значення.

Головними елементами робочого місця програміста є письмовий стіл і крісло. Основним робочим положенням є положення сидячи.

Робоча поза сидячи викликає мінімальне стомлення програміста. Раціональне планування робочого місця передбачає чіткий порядок і сталість розміщення предметів, засобів праці і документації. Те, що потрібно для виконання робіт частіше, розташоване в зоні легкої досяжності робочого простору.

Моторне поле - простір робочого місця, в якому можуть здійснюватися рухові дії людини.

Максимальна зона досяжності рук - це частина моторного поля робочого місця, обмеженого дугами, що описуються максимально витягнутими руками при русі їх в плечовому суглобі.

Оптимальна зона - частина моторного поля робочого місця, обмеженого дугами, описуваними передпліччями при русі в ліктьових суглобах з опорою в точці ліктя і з відносно нерухомим плечем.

При проектуванні письмового столу варто враховувати наступне:

• висота столу повинна бути вибрана з урахуванням можливості сидіти вільно, в зручній позі, при необхідності спираючись на підлокітники;

• нижня частина столу повинна бути сконструйована так, щоб програміст міг зручно сидіти, ні змушений підбирати ноги;

• поверхня стола повинна мати властивості, що виключають появу відблисків в полі зору програміста;

• конструкція столу повинна передбачати наявність висувних ящиків (не менше 3 для зберігання документації, лістингів, канцелярських приналежностей, особистих речей).

Важливим елементом робочого місця програміста є крісло. При проектуванні крісла виходять з того, що при будь-якому робочому положенні програміста його поза повинна бути фізіологічно правильно обгрунтованої, тобто положення частин тіла повинно бути оптимальним. Для задоволення вимог фізіології, що випливають з аналізу положення тіла людини в положенні сидячи, конструкція робочого сидіння повинна відповідати таким основним вимогам:

• Допускати можливість зміни положення тіла, тобто забезпечувати вільне переміщення корпуса і кінцівок тіла один щодо одного

• Допускати регулювання висоти в залежності від росту працюючої людини (у межах від 400 до 550 мм)

• Мати злегка увігнуту поверхню

• Мати невеликий нахил назад

Створення сприятливих умов праці і правильне естетичне оформлення робочих місць на виробництві має велике значення як для полегшення праці, так і для підвищення його привабливості, позитивно впливає на продуктивність праці. Забарвлення приміщень і меблів повинна сприяти створенню сприятливих умов для зорового сприйняття, гарного настрою. У

службових приміщеннях, в яких виконується одноманітна розумова робота, що потребує значної нервової напруги і великого зосередження, фарбування повинна бути спокійних тонів - малонасичені відтінки холодного зеленого або блакитного кольорів.

При розробці оптимальних умов праці програміста необхідно враховувати освітленість, шум і мікроклімат.

4.2 Освітленість робочого столу

Раціональне освітлення робочого місця є одним з найважливіших факторів, що впливають на ефективність трудової діяльності людини, що попереджають травматизм і професійні захворювання. Правильно організоване освітлення створює сприятливі умови праці, підвищує працездатність і продуктивність праці. Освітлення на робочому місці програміста повинно бути таким, щоб працівник міг без напруги зору виконувати свою роботу. Стомлюваність органів зору залежить від ряду причин:

- недостатність освітленості;
- надмірна освітленість;
- неправильний напрямок світла.

Недостатність освітлення призводить до напруги зору, послаблює увагу, приводить до настання передчасної стомленості. Надмірно яскраве освітлення викликає осліплення, роздратування і різь в очах. Неправильний напрямок світла на робочому місці може створювати різкі тіні, відблиски, дезорієнтувати працюючого. Всі ці причини можуть призвести до нещасного випадку або профзахворювань, тому настільки важливий правильний розрахунок освітленості.

Штучне освітлення виконується за допомогою електричних джерел світла двох видів: ламп розжарювання і люмінесцентних ламп. Будемо використовувати люмінесцентні лампи, які в порівнянні з лампами розжарювання мають суттєві переваги:

• по спектрального складу світла вони близькі до денного, природного освітлення;

• володіють більш високим ККД (у 1.5-2 рази вище, ніж ККД ламп розжарювання);

• мають підвищену світловіддачу (в 3-4 рази вище, ніж у ламп розжарювання);

• більш тривалий термін служби.

Розрахунок освітлення проводиться для кімнати площею 15 м^2, ширина якої 3.5 м, висота - 4 м. Скористаємося методом світлового потоку.

Для визначення кількості світильників визначимо світловий потік, падаючий на поверхню за формулою:

$$F = \frac{E \cdot K \cdot S \cdot Z}{n}, \text{ де}$$

F - розраховується світловий потік, Лм;

E - нормована мінімальна освітленість, Лк (визначається за таблицею). Роботу програміста, відповідно до цієї таблиці, можна віднести до розряду точних робіт, отже, мінімальна освітленість буде E = 300 Лк при газорозрядних лампах; S - площа освітлюваного приміщення (у нашому випадку S = 15 м^2); Z - відношення середньої освітленості до мінімальної (зазвичай приймається рівним 1.1-1.2); K - коефіцієнт запасу, що враховує зменшення світлового потоку лампи в результаті забруднення світильників у процесі експлуатації (його значення визначається за таблицею коефіцієнтів запасу для різних приміщень і в нашому випадку K = 1.5); n - коефіцієнт використання світлового потоку (η = 1,1 ... 1.2).

4.3 Безпека в надзвичайних ситуаціях

Небезпека – це явища, процеси, об’єкти, інформація і самі люди, які можуть викликати небажані наслідки і призводити до погіршення стану здоров’я чи смерті людини, завдавати шкоди навколишньому середовищу й об’єктам господарської діяльності. Життєвий досвід людини показує, що

шкоду людині може нанести будь-яка діяльність: робота на виробництві (трудова діяльність), різні види відпочинку, розваги та навіть діяльність, пов’язана з навчанням.

Джерелами небезпек є природні процеси і явища, техногенне

середовище і людські дії.

Небезпека об’єктивно існує в просторі і часі та реалізується у вигляді потоків енергії, речовини, інформації.

Здебільшого небезпека має прихований характер і може перетворюватися в реальну небезпеку за наявності таких умов:

- небезпека реально існує;
- людина перебуває в зоні дії небезпеки;
- людина не має ефективних засобів захисту, не використовує їх або ці засоби неефективні.

Усяка діяльність людини є потенційно небезпечною. Потенційна небезпека – це така небезпека, яка має прихований характер і може перетворитися в реальну небезпеку за наявності трьох умов, зазначених вище. Потенційна небезпека може реалізуватися у формі хвороб або травм. Але наявність потенційної небезпеки не завжди супроводжується її негативним впливом на людину. Для реалізації негативного впливу небезпеки необхідне виконання всіх трьох умов.

Умови, за якими небезпека може реалізуватися в подію, називаються небезпечною ситуацією.

Основними критеріями переходу небезпеки в надзвичайну ситуацію є:

- наявність або загроза загибелі людей чи значне погіршення умов їх життя.
- заподіяння економічних збитків.
- істотне погіршення стану довкілля.

Під час експлуатації ЕОМ, можуть мати місце наступні надзвичайні ситуацій: пожежі, аварії теплопроводу, водопроводу, ураження електричним струмом.

Сам ЕОМ може стати причиною таких надзвичайних ситуацій як пожежа та ураження електричним струмом.

При виникненні надзвичайної ситуації користувачу необхідно негайно припинити роботу, вимкнути ЕОМ, інше електрообладнання і доповісти керівнику, якщо:

- помічено механічні пошкодження та інші дефекти електрообладнання і електропроводки;
- помітно підвищений рівень шумів при роботі на обладнанні;
- помітно підвищене тепловиділення від обладнання;
- постійно блимає екран монітора;
- стрибає текст на екрані монітора;
- відчувається запах горілого та диму;
- припинилася подача електроенергії.

Не приступати до роботи до повного усунення несправностей.

У випадку загорання або пожежі співробітники повинні негайно припинити роботу, відімкнути електроприлади, викликати пожежну команду, повідомити керівника робіт і приступити до ліквідації місця загорання, наявними засобами пожежогасіння.

При аварії водопроводу або тепломережі необхідно негайно визвати слюсаря-сантехніка, прибрати речовини та реактиви, які бурхливо реагують із водою, щоб на них не попала вода. Берегти від псування водою обладнання та прилади. Якщо усунути аварію неможливо, визвати міську аварійну службу.

При травмі у першу чергу звільнити постраждалого від травмую чого фактора, повідомити керівника робіт, викликати медичну допомогу, надати першу долікарняну допомогу постраждалому і, по можливості, зберегти незмінною ситуацію до початку розслідування причин нещасного випадку.

4.3 Висновки до розділу

У цій частині бакалаврської роботи були викладені вимоги до робочого

місця програміста. Створені умови повинні забезпечувати комфортну роботу. Дотримання умов, що визначають оптимальну організацію робочого місця програміста, дозволить зберегти гарну працездатність протягом усього робочого дня, підвищить, як у кількісному, так і в якісному відносинах продуктивність праці програміста.

ЗАГАЛЬНИЙ ВИСНОВОК

Метою даної кваліфікаційної роботи було проектування системи автоматичного керування насосною станцією другого підйому для водопостачання котеджного селища та побудова математичної моделі її перехідних процесів. У процесі дослідження та проектування було виконано комплекс завдань, результати яких дозволяють зробити низку важливих висновків.

На основі вихідних даних для селища з населенням 500 осіб було розраховано ключові технологічні параметри. Встановлено, що для забезпечення стабільного водопостачання необхідний натиск становить 38,4 м, а максимальна годинна подача — 9 м³/год. Відповідно до цих даних розраховано необхідну потужність електродвигуна насоса, яка склала 1,482 кВт.

Для реалізації проекту було проведено порівняльний аналіз двох варіантів комплектації: на базі обладнання Metabo (комбінована система) та Grundfos (професійна система). Вибір було зроблено на користь системи Grundfos завдяки її надійності та ширшому функціоналу. Основним виконавчим агрегатом обрано занурювальний насос Grundfos SP 17-4N, керований інтелектуальним перетворювачем частоти Grundfos CUE.

Застосування частотного перетворювача CUE дозволило відмовитися від використання окремого програмованого логічного контролера, оскільки вбудовані функції перетворювача повністю забезпечують потреби системи, що суттєво зменшує загальну вартість проекту. Для підвищення безпеки та зручності експлуатації систему доповнено модулем захисту від «сухого ходу» LiqTec, високоточним датчиком тиску MBS-3000 та підтримкою мобільного додатка «Grundfos GO» для дистанційного моніторингу.

У рамках дослідження було успішно розроблено математичну модель частотно-регульованого електроприводу з асинхронним двигуном та реалізовано її у середовищі MatLab (Simulink). На основі розрахованих параметрів схеми заміщення були налаштовані коефіцієнти ПІД-регулятора.

Отримані осцилограми перехідних процесів довели, що розроблена система здатна ефективно стабілізувати натиск і плавно реагувати на зміну технологічних режимів.

Крім того, у роботі було проаналізовано умови праці інженера-програміста. Розраховано та спроектовано раціональне освітлення робочого місця, де мінімальна нормована освітленість становить 300 Лк, а також визначено комплекс дій для забезпечення безпеки у надзвичайних ситуаціях, таких як пожежі, затоплення чи ураження електричним струмом.

У підсумку, теоретичні та практичні завдання роботи повністю виконані. Запропонована система управління є енергоефективною, економічно обґрунтованою та надійною, що робить її готовою до впровадження на реальних об'єктах водопостачання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи / [Попович М.Г., Борисюк О.В., Гаврилюк В.А.]: Навчальний посібник. — Київ: 2015. — 680 с.
2. Теорія автоматичного керування: лінійні системи / [Пересада С.М., Ковбаса С.М.]: Підручник. — Київ: 2018. — 312 с.
3. Динаміка електромеханічних систем з нелінійностями / [Клепіков В.Б.]: Монографія. — Харків: 2014. — 300 с.
4. Системи підпорядкованого регулювання координат електроприводів / [Островерхов М.Я., Бур'ян С.О.]: Навчальний посібник— Київ: 2017 — 256 с.
5. Системи оптимального керування електромеханічними об'єктами / [Садовой О.В., Дерев'янко Ю.М.]: Монографія. — Дніпро: 2019. — 215 с.
6. Засоби автоматизації та керування в енергетиці / [Михальський В.М.]: Підручник. — Київ: 2016. — 410 с.
7. Теорія автоматичного керування / [Кузнецов В.І.]: Навчальний посібник. — Львів: 2015. — 345 с.
8. Математичне моделювання електромеханічних систем / [Ромашко В.Я.]: Підручник. — Харків: 2020. — 288 с.
9. Моделювання електромеханічних систем / [Чорний О.П., Луговой А.В., Родькін Д.Й.]: Навчальний посібник. — Кременчук: 2015. — 380 с.
10. Електричні машини та апарати / [Загірняк М.В., Невзлін Б.І.]: Підручник. — Київ: 2014. — 450 с.
11. Насоси та насосні станції / [Тульчинський В.Г., Смирнов В.О.]: Навчальний посібник. — Рівне: 2018. — 320 с.
12. Гідравліка та аеродинаміка / [Левченко О.М., Ковальчук В.А.]: Підручник. — Київ: 2016. — 415 с.
13. Енергоощадне керування насосними установками / [Потапенко О.Г., Сидоренко В.М.]: Монографія. — Одеса: 2019. — 198 с.
14. Автоматизація систем водопостачання та водовідведення / [Соколовський В.І.]: Навчальний посібник. — Харків: 2021. — 275 с.

15.Проектування автоматизованих насосних станцій / [Коваленко В.О., Шевченко М.М.]: Посібник. — Дніпро: 2017. — 240 с.
16.Частотно-регульований електропривод турбомеханізмів / [Мартинов А.В.]: Монографія. — Львів: 2015. — 210 с.
17.Режими роботи відцентрових насосів / [Гулий М.В., Романюк Р.Я.]: Підручник. — Полтава: 2018. — 305 с.
18.Системи автоматичного регулювання тиску / [Білоус В.М.]: Навчальний посібник. — Вінниця: 2020. — 185 с.
19.Електромеханічні системи насосних станцій / [Ткаченко А.А., Іванов С.В.]: Підручник. — Запоріжжя: 2016. — 290 с.
20.Гідропривід та гідропневмоавтоматика / [Григор'єв О.С.]: Навчальний посібник. — Київ: 2014. — 340 с.
21.Основи теорії систем / [Шинкаренко В.Ф.]: Навчальний посібник. — Київ: 2018. — 215 с.
22.Комп'ютерне моделювання складних систем у середовищі MATLAB /Simulink [Петров В.В., Ільїн О.М.]: Практикум. — Одеса: 2019. — 250 с.
23.Моделювання динамічних процесів в електроприводах / [Сидоренко А.М.]: Монографія. — Харків: 2017. — 188 с.
24.Мікроконтролери в системах керування електроприводами / [Козаченко В.Ф.]: Підручник. — Київ: 2021. — 420 с.
25.Програмовані логічні контролери в автоматизації / [Морозов В.І., Лисенко О.А.]: Навчальний посібник. — Львів: 2020. — 310 с.
26.Системи управління з ПІД-регуляторами / [Павленко О.В.]: Монографія. — Дніпро: 2015. — 175 с.
27.Енергоефективність електромеханічних систем / [Чернов О.В., Радченко М.О.]: Підручник. — Миколаїв: 2018. — 260 с.
28.Математичне моделювання технологічних об'єктів / [Бондаренко М.О.]: Навчальний посібник. — Суми: 2016. — 225 с.
29.Сучасні інформаційні технології в автоматизації / [Литвин В.В.]: Підручник. — Тернопіль: 2019. — 290 с.
30.Перехідні процеси в асинхронних двигунах / [МазуренкоЛ.І., ДжураО.В.]:

Монографія. — Київ: 2017. — 210 с.
31.Control of Electrical Drives / [Leonhard W.]: Monograph. — Berlin: Springer-Verlag, 2001. — 460 p.
32.Vector Control of AC Drives / [Boldea I., Nasar S.A.]: Textbook. — London: CRC Press, 2010. — 350 p.
33.Modern Power Electronics and AC Drives / [Bose B.K.]: Textbook. — Oxford: Prentice Hall, 2002. — 711 p.
34.Control in Power Electronics / [Kazmierkowski M.P., Krishnan R., Blaabjerg F.]: Monograph. — Amsterdam: Academic Press, 2002. — 530 p.
35.Sensorless Vector and Direct Torque Control / [Vas P.]: Monograph. — Oxford: Oxford University Press, 1998. — 729 p.
36.Control of Electric Machine Drive Systems / [Sul S.K.]: Textbook. — New York: John Wiley & Sons, 2011. — 399 p.
37.Analysis of Electric Machinery and Drive Systems / [Krause P.C., Wasynczuk O., Sudhoff S.D.]: Textbook. — Piscataway: IEEE Press, 2013. — 680 p.
38.Modern Control Systems / [Dorf R.C., Bishop R.H.]: Textbook. — Harlow: Pearson Education, 2017. — 1082 p.
39.Modern Control Engineering / [Ogata K.]: Textbook. — London: Pearson, 2010. — 904 p.
40.Advanced PID Control / [Astrom K.J., Hagglund T.]: Monograph. — Research Triangle Park: ISA, 2006. — 460 p.
41.Pumping Station Design / [Jones G.M., Sanks R.L., Tchobanoglous G.]: Textbook. — Oxford: Butterworth-Heinemann, 2006. — 1104 p.
42.Pump Handbook / [Karassik I.J., Messina J.P., Cooper P.]: Handbook. — London: McGraw-Hill Education, 2007. — 1632 p.
43.Electrical Machines and Drives: A Space-Vector Theory Approach / [Vas P.]: Monograph. — Oxford: Clarendon Press, 1992. — 808 p.
44.System Identification: Theory for the User / [Ljung L.]: Textbook. — Linköping: Prentice Hall, 1999. — 609 p.
45.Control Systems Engineering / [Nise N.S.]: Textbook. — Hoboken: John Wiley & Sons, 2015. — 944 p.