

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

(повне найменування закладу вищої освіти)

Навчально-науковий інститут інформаційних технологій і робототехніки

(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра автоматичної, електроніки та телекомунікацій

(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи

магістра

(ступінь вищої освіти)

на тему «Оптимізація режимів роботи електропривода циркуляційного насосу на базі частотного регулювання»

Виконав: студент 2 курсу, групи 601МЕ
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Тарасенко С.М.

(прізвище та ініціали)

Керівник Ігнат'єв С.Є.

(прізвище та ініціали)

Рецензент Шефер О. В.

(прізвище та ініціали)

Полтава - 2025 рік

АНОТАЦІЯ

Магістерська робота присвячена дослідженню та оптимізації режимів роботи електропривода циркуляційного насоса на основі застосування частотного регулювання. Актуальність теми зумовлена необхідністю підвищення енергоефективності насосних установок, забезпечення стабільності технологічних процесів та зниження експлуатаційних витрат у промислових системах водопостачання та тепlopостачання. У роботі проаналізовано сучасні підходи до побудови систем керування електроприводами, обґрунтовано вибір асинхронного двигуна та перетворювача частоти як ключових елементів приводу.

Проведено детальне моделювання роботи електропривода з використанням математичних моделей двигуна та частотного перетворювача. Здійснено синтез регуляторів, побудову структурної схеми керування та досліджено перехідні процеси в системі. Отримані результати демонструють можливість зниження енергоспоживання та покращення динамічних характеристик приводу шляхом застосування оптимізованих режимів роботи та реалізації ПІД-регулятора з подальшою цифровою реалізацією.

У роботі також розглянуто питання надійності й безпеки електропривода, зокрема проведено розрахунок захисного заземлення та визначено відповідність системи нормативним вимогам. Результати дослідження підтверджують доцільність використання частотного регулювання у насосних установках та можуть бути застосовані в промислових системах водопостачання, теплових мережах і технологічних комплексах, де необхідне стабільне й економічне керування подачею рідини.

Ключові слова: електропривод, частотне регулювання, циркуляційний насос, асинхронний двигун, перетворювач частоти, ПІД-регулятор, математичне моделювання, енергоефективність.

ABSTRACT

The master's thesis is devoted to the research and optimization of operating modes of a circulation pump electric drive based on frequency regulation. The relevance of the topic is determined by the growing need to increase the energy efficiency of pumping systems, ensure the stability of technological processes, and reduce operating costs in industrial water supply and heating systems. The work analyzes modern approaches to the design of electric drive control systems and substantiates the choice of an induction motor and a frequency converter as the key components of the drive.

A detailed simulation of the electric drive operation was carried out using mathematical models of the motor and the frequency converter. The synthesis of controllers, development of the control structure, and analysis of transient processes were performed. The obtained results demonstrate the possibility of reducing energy consumption and improving the dynamic performance of the drive through optimized operating modes and the implementation of a PID controller with subsequent digital realization.

The thesis also addresses the issues of reliability and safety of the electric drive, including the calculation of protective grounding and verification of compliance with regulatory requirements. The results confirm the feasibility and effectiveness of applying frequency regulation in pumping installations and can be used in industrial water supply systems, heating networks, and technological complexes requiring stable and energy-efficient fluid flow control.

Keywords: electric drive, frequency regulation, circulation pump, induction motor, frequency converter, PID controller, mathematical modeling, energy efficiency.

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
 Інститут Навчально-науковий інститут інформаційних технологій та
 робототехніки
 Кафедра Автоматики, електроніки та телекомунікацій
 Рівень вищої освіти Магістр
 Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри автоматичної,
 електроніки та телекомунікацій

“ _____ ” О.В. Шефер
 “ ____ ” _____ 2025 р.

З А В Д А Н Н Я НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ Тарасенку Сергію Миколайовичу

1. Тема проекту (роботи) **«Оптимізація режимів роботи електропривода циркуляційного насоса на базі частотного регулювання»**

керівник проекту (роботи) Ігнат'єв Станіслав Євгенович, к.т.н., професор
 затверджена наказом вищого навчального закладу від “03” 09 2025 року №1025 ф,а

2. Строк подання студентом проекту (роботи) 22.12.2025 р.

3. Вихідні дані до проекту (роботи) Вихідними даними до кваліфікаційної роботи є матеріали зібрані під час проходження практики.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Аналіз технічних вимог до перехідних процесів циркуляційного насосу. Визначення та вибір параметрів елементів АЕП та його характеристик. Розроблення структурних схем САК, математичний опис об'єкта й системи керування. Розроблення динамічної математичної моделі АЕП. Синтез математичної моделі електромеханічної системи для впровадження векторного керування. Аналіз статичних і динамічних режимів роботи електропривода. Математичне моделювання й дослідження статичної й динамічної САК. Розрахунок штучного заземлення. Висновки по роботі.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових плакатів): Актуальність теми, мета, предмет та об'єкт дослідження. Класифікація сучасних систем керування АД. Функціональна схема перетворювача частоти з ланкою постійного струму. Функціональна схема та часові діаграми ПЧ на базі транзисторів IGBT. Схеми заміщення та структурна схема моделі асинхронного двигуна. Математична модель системи векторного керування. Структурна схема асинхронного електропривода циркуляційного насоса з частотним керуванням. Результати імітаційного моделювання математичної моделі АД-ПЧ. Математична модель САК з нейрорегулятором. Перехідні процеси швидкості АД та напору води в системі. Модель системи АД-ПЧ з фільтром.

Частотно-керований асинхронний електропривод циркуляційного насосу. Схема керування інвертором. Функціональна схема насосної станції. Принципова електрична схема силової системи керування насосами. Алгоритм автоматичного керування насосної станції. Висновки.

6. Дата видачі завдання 15.09.2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів магістерської роботи	Термін та обсяг виконання етапів роботи			Примітка (плакати)
		Термін	Категорія	Обсяг	
1	Аналіз технічних вимог до перехідних процесів циркуляційного насосу. Аналіз варіантів використання перетворювача частоти.	07.10.25		15%	Пл. 1, 2
2	Визначення та вибір параметрів елементів АЕП та його характеристик.	21.10.25	I	25%	Пл. 3, 4
3	Розроблення структурних схем САК, математичний опис об'єкта й системи керування.	04.11.25		40%	Пл. 5, 6
4	Розроблення динамічної математичної моделі АЕП.	11.11.25		50 %	Пл. 7, 8
5	Синтез математичної моделі електромеханічної системи для впровадження векторного керування.	18.11.25	II	60%	Пл. 9-11
6	Аналіз статичних і динамічних режимів роботи електропривода. Математичне моделювання й дослідження статички й динаміки САК.	25.11.25		70%	Пл. 12,13
7	Розрахунок штучного заземлення.	09.12.25		90%	Пл. 14,15
8	Оформлення пояснювальної записки.	22.12.25	III	100%	Пл. 16,17

Магістрант _____ Тарасенко С. М.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ Ігнат'єв С. Є.
(підпис) (прізвище та ініціали)

ЗМІСТ

Вступ.....	8
1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА.....	10
1.1 Технічні вимоги до електропривода циркуляційного насосу.....	10
1.2 Вимоги до перехідних процесів циркуляційного насосу.....	10
1.3 Переваги використання перетворювачів частоти.....	10
1.4 Варіанти використання перетворювача частоти.....	14
1.5 Принципи керування перетворювачами частоти.....	16
1.6 Висновки за розділом.....	22
2. КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА.....	24
2.1.Визначення основних параметрів елементів автоматизованого електроприводу циркуляційного насосу та його характеристик.....	24
2.1.1 Вибір приводного електродвигуна.....	24
2.1.2 Розрахунок і вибір перетворювача частоти.....	26
2.1.3 Вибір обладнання для оптимізації режимів роботи електроприводу циркуляційного насосу.....	29
2.2 Висновки за розділом.....	31
3 РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА.....	33
3.1 Розроблення структурних схем САК, математичний опис об'єкта й системи керування.....	33
3.1.1Принципи частотного керування асинхронним електродвигуном.....	33
3.1.2 Побудова динамічної моделі асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором	35
3.2 Розроблення динамічної математичної моделі АД - ПЧ із проміжною ланкою постійного струму.....	43
3.3 Висновки за розділом.....	49

4. ДОСЛІДНИЦЬКА ЧАСТИНА.....	51
4.1 Синтез математичної моделі електромеханічної системи для впровадження векторного керування.....	51
4.2 Аналіз статичних і динамічних режимів роботи електропривода.....	54
4.3 Математичне моделювання й дослідження статичної й динамічної САК.....	57
4.4 Моделювання системи АД-ПЧ із додаванням фільтруючого елемента.....	61
4.5 Будова та принцип роботи основних функціональних частин частотного електропривода.....	64
4.6 Синтез дискретного ПД-регулятора у додатку SIMULINK.....	68
4.7 Опис системи частотного регулювання електропривода циркуляційного насоса на базі.....	73
4.8 Висновки за розділом.....	79
5. ІНЖЕНЕРНІ РІШЕННЯ З ТЕХНІКИ БЕЗПЕКИ.....	81
5.1 Розрахунок штучного заземлення в електроустановках напругою до 1000 В методом коефіцієнта використання електродів.....	81
5.2 Висновок за розділом.....	85
ВИСНОВКИ.....	87
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	89
ДОДАТКИ.....	91

ВСТУП

Сучасні тенденції розвитку енергетичних систем та промислових технологій визначають підвищені вимоги до ефективності, надійності та автоматизації електроприводів насосного обладнання.

Циркуляційні насоси є ключовими елементами систем водопостачання, тепlopостачання, технологічних та промислових установок, від роботи яких залежить стабільність багатьох технологічних процесів. Значна частка енергоспоживання припадає саме на електроприводи насосів, що зумовлює актуальність застосування енергоощадних систем керування, здатних забезпечити оптимальні режими роботи обладнання в умовах змінних навантажень.

Одним із найбільш ефективних інструментів підвищення енергоефективності електроприводів насосних агрегатів є частотне регулювання, яке дозволяє плавно змінювати швидкість обертання асинхронного двигуна відповідно до потреб технологічного процесу. Використання перетворювачів частоти забезпечує значне зниження енергоспоживання, зменшення гідравлічних втрат, підвищення ресурсу механічних вузлів і створення можливостей для точного автоматичного регулювання тиску чи витрати. Разом із тим удосконалення систем частотного керування потребує комплексного підходу, що включає оптимізацію конструктивних, енергетичних та керуючих параметрів електропривода.

Актуальність теми зумовлена необхідністю забезпечення стабільної роботи циркуляційних насосів у динамічних режимах, зменшення експлуатаційних витрат, підвищення надійності та адаптивності систем автоматичного керування. Оптимізація режимів частотно-керованого електропривода дає змогу забезпечити як відповідність сучасним вимогам енергоефективності, так і можливість інтеграції у цифрові системи моніторингу та диспетчеризації.

Метою магістерської роботи є оптимізація режимів роботи електропривода циркуляційного насоса на основі частотного регулювання, розроблення математичних моделей та системи автоматичного керування, здатної забезпечити стабільність, швидкодію та енергоефективність роботи насосної установки.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання:

- провести аналіз сучасних методів керування електроприводами насосних установок та обґрунтувати вибір оптимальної структури електропривода;

- визначити технічні параметри двигуна, перетворювача частоти та датчиків, необхідних для автоматизованої роботи системи;

- побудувати математичну модель асинхронного двигуна та перетворювача частоти у системі частотного керування;

- синтезувати та дослідити систему автоматичного керування із застосуванням ПД-регулювання та векторного керування;

- провести моделювання перехідних процесів у MATLAB/Simulink, проаналізувати стійкість, точність і динамічні властивості системи;

- виконати розрахунки із забезпечення електробезпеки та обґрунтувати конструкцію захисного заземлення.

Об'єктом дослідження є електропривод циркуляційного насоса на базі асинхронного двигуна.

Предметом дослідження є методи й алгоритми частотного та автоматичного керування для оптимізації режимів роботи електропривода.

Новизна роботи полягає у комплексному підході до оптимізації частотно-керованого електропривода з урахуванням його електромеханічних характеристик, параметрів перетворювача частоти та динаміки насосного агрегату. Практична значущість полягає у можливості використання результатів для модернізації існуючих насосних станцій та створення нових енергоефективних систем керування.

1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.2 Технічні вимоги до електропривода циркуляційного насосу

Для реалізації завдання керування насосної установки електропривод повинен забезпечувати [1]:

- пуск і зупинку насоса;
- автоматичну зміну частоти обертання вала двигуна для підтримки постійним тиску в споживчій мережі;
- екстрену зупинку насоса у випадку надходження аварійного сигналу від датчика (при відхиленні параметрів від припустимих технологічних меж);
- захист від аварійних режимів роботи електродвигуна.

1.3 Вимоги до перехідних процесів циркуляційного насосу

Характеристики перехідних процесів повинні задовольняти наступним вимогам [2]:

- статична помилка в сталих режимах роботи дорівнює 0;
- перерегулювання при пуску не більше 5%;
- перерегулювання при збільшенні або скиданні навантаження не більше 10%.
- час перехідного процесу при пуску менше 1с.

1.4 Переваги використання перетворювачів частоти

Відомо, що регулювання швидкості обертання виконавчого механізму, котрий приводиться від асинхронного двигуна, можна здійснювати за допомогою різних пристроїв (способів), серед яких найбільше відомі й поширені наступні [3]:

- механічний варіатор;
- гідравлічна муфта;
- електромеханічний перетворювач частоти (системи Г-Д);
- зміною додаткового опору в статорі або у фазному роторі;
- статичний перетворювач частоти.

Перші чотири способи відрізняються різними комбінаціями з наступних недоліків: складності в застосуванні, обслуговуванні, експлуатації, низька якість і малий діапазон регулювання, неекономічність.

Всі зазначені недоліки відсутні при використанні перетворювачів частоти [4].

Регулювання швидкості обертання асинхронного електродвигуна в цьому випадку здійснюється шляхом зміни частоти й величини напруги живлення двигуна. ККД такого перетворення становить близько 98 %, з мережі споживається практично тільки активний струм навантаження, мікропроцесорна система керування забезпечує високу якість керування електродвигуном і контролює безліч його параметрів, запобігаючи можливості розвитку аварійних ситуацій.

Особливий економічний ефект від використання перетворювачів частоти дає застосування частотного регулювання на об'єктах, забезпечуючих транспортування рідин.

По сьогоднішній день подача води регулюється за допомогою засувки [5]. Це приводить до значної перевитрати електроенергії: якщо витрата води знижується, насоси як і раніше працюють на повну силу. Набагато ефективніше обсяг подачі (який залежить від часу доби) регулювати зміною швидкості обертання насоса за допомогою перетворювача частоти.

При ухваленні рішення про доцільність впровадження ПЧ варто враховувати, що, крім економічного ефекту від економії електроенергії, застосування частотних перетворювачів додатково забезпечує наступне:

- знижується зношування запірної арматури, тому що більшу частину

часу засувки повністю відкриті;

- насоси працюють при оптимальному тиску, не допускаючи його перевищення, що знижує витрати в системі водопостачання;

- знижується зношування комутаційної апаратури, тому що її перемикання відбуваються при відсутності струму;

- знижується зношування підшипників двигуна й насоса, а також крильчатки за рахунок плавної зміни числа обертів, відсутності великих пускових струмів;

- зменшується небезпека аварій за рахунок виключення гідравлічних ударів;

- забезпечується одночасний захист двигуна від короткого замикання, замикання на землю, струмоперевантаження, неповнофазного режиму, перенапруг;

- спрощується подальша комплексна автоматизації об'єктів системи водопостачання.

Перспективність частотного регулювання наочно видно з наведеного нижче рис. 1.1.

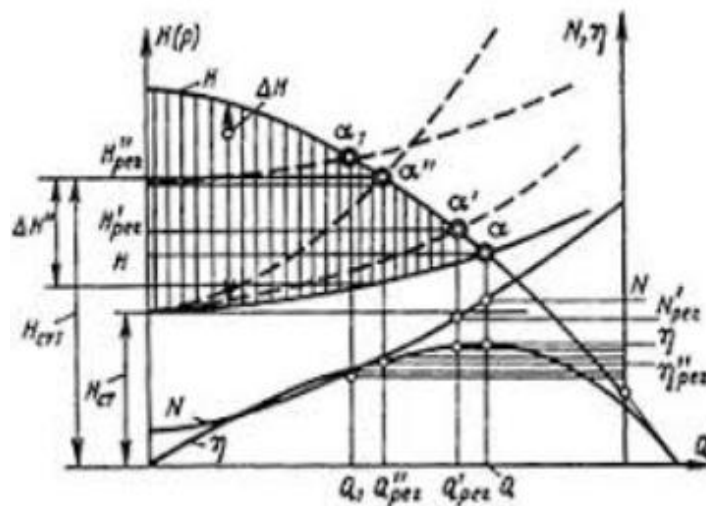


Рисунок 1.1 – Втрати потужності при регулюванні способом дроселювання

Можна помітити, що при дроселюванні енергія потоку речовини, стримуваного засувкою або клапаном, просто губиться, не роблячи ніякої

корисної роботи. Застосування перетворювача частоти в складі насосного агрегату або вентилятора дозволяє просто задати необхідний тиск або витрату, що забезпечить не тільки економію електроенергії, але й зниження втрат речовини, що транспортується.

У промислово розвинених країнах уже практично неможливо знайти асинхронний електродвигун без перетворювача частоти [2].

При побудові перетворювачів частоти для асинхронних двигунів використовуються сучасні керовані напівпровідникові прилади високої надійності (біполярні транзистори з ізольованим затвором - IGBT-транзистори) рис. 1.2. Елементи силової електроніки в основному й визначають якість і цінові показники, у структурі ціни вони становлять сьогодні до 70% від вартості.

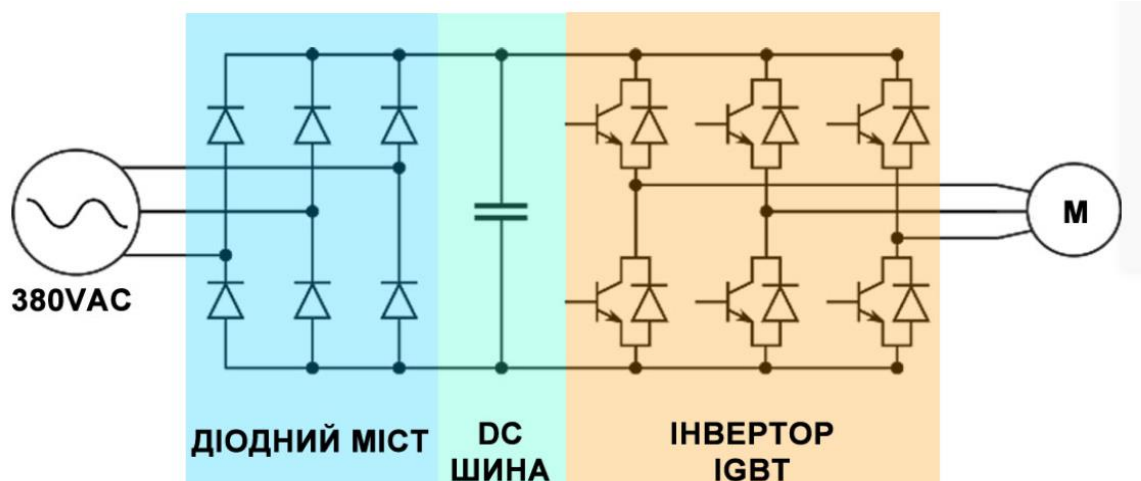


Рисунок 1.2 – Схема побудови перетворювача частоти на IGBT-транзисторах

Фахівці прогнозують високі темпи зниження ціни на IGBT-транзистори і перетворювачі частоти стануть ще більш доступними для споживачів, масштаби їхнього впровадження вже в найближчі роки стануть масовими, як показує досвід високорозвинених країн іншої альтернативи просто немає [3-5].

1.5 Варіанти використання перетворювача частоти

Найбільш простий варіант використання ПЧ - коли одним перетворювачем керується один електродвигун, наприклад, електродвигун ліфта, верстата-качалки, димососа й т.інш. У цьому випадку перетворювач підключається безпосередньо до одного електродвигуну й керує його роботою залежно від заданих параметрів і одержуваної від датчиків інформації. При цьому ефект від роботи електропривода визначається зниженням витрати електроенергії й підвищенням якості регульованого технологічного параметра, що найчастіше й визначає якість продукції. При такому варіанті використання ПЧ питома вартість перетворювача на 1 кВт потужності максимальне й рішення про установку ПЧ, як правило, приймається по необхідності регулювання технологічних параметрів, хоча розрахунки показують, що складова економії електроенергії часто дозволяє окупити витрати на установку ПЧ менш ніж за 1 рік і далі приносити чисту економію [5].

Якщо на об'єкті розташовані кілька електроприводів, що працюють у взаємозв'язному режимі, то доцільно розглянути установку перетворювача в комплексі із системою керування електроприводів - так звану станцію керування електроприводами. Типова станція керування (СК) містить:

- шафи керування, у яких розміщуються комутаційна апаратура, частотний перетворювач, додатковий програмований логічний контролер (при необхідності вирішувати складні завдання керування), апаратура захистів і сигналізації;

- датчики контрольованих параметрів і виконавчі механізми системи керування.

Типовим прикладом такого варіанта використання ПЧ є станція керування групою насосів [7], коли діапазон регулювання по витраті змінюється в широких межах і, залежно від витрати, працює один, два або три насоси, забезпечуючи заданий рівень тиску. Використовуючи наявні

резервні потужності вбудованого в перетворювач частоти мікроконтролера, засобами програмного забезпечення, у станціях керування, реалізована можливість керування групою електродвигунів на два або три насоси. При цьому керування може здійснюватися в будь-якому заданому режимі: при малих витратах заданий тиск забезпечується автоматично регульованою роботою одного насоса, при збільшенні витрат контролер (ПЧ) управляє роботою комутаційної апаратури, підключаючи другий і, при необхідності, третій насос, забезпечуючи заданий рівень тиску, постійне регулювання, виключення гідравлічних ударів. Програмним способом можна регулювати ресурс роботи кожного насосного агрегату з перемиканням через задані проміжки часу. Керування від перетворювача частоти забезпечує обмеження пускового струму та підтримання крутного моменту на належному рівні, на рис. 1.3.

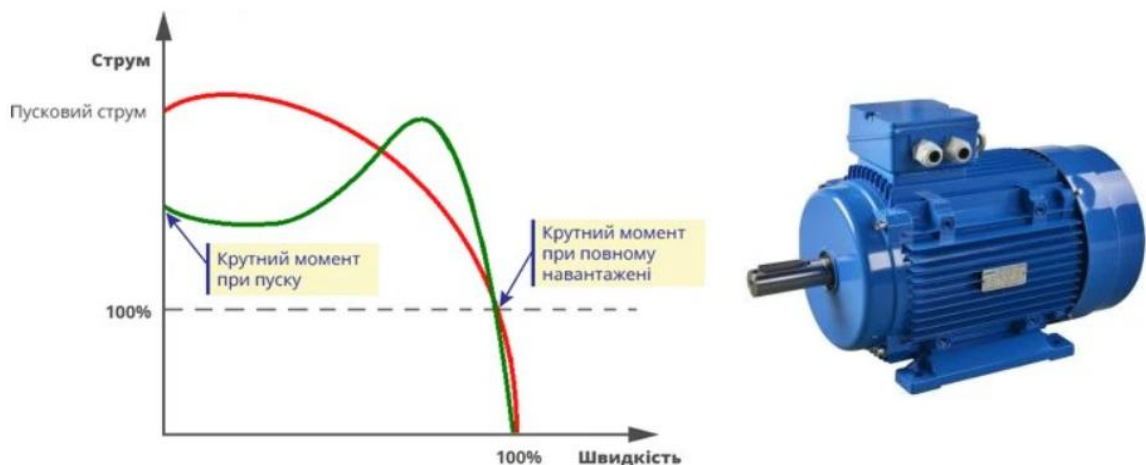


Рисунок 1.3 – Графік зміни крутного моменту під час пуску та зміни навантаження

При більш складних схемах регулювання, коли потрібен контроль і регулювання по декількох параметрах, використовуються програмувальні логічні контролери.

1.6 Принципи керування перетворювачами частоти

Переважна більшість керованих електроприводів будуються на базі асинхронних електродвигунів і перетворювачів частоти, де перетворювач частоти виконаний за схемою: некерований випрямляч - автономний керований інвертор напруги; тобто спочатку електрична енергія мережі перетвориться в постійний струм, а потім інвертор створює трифазний електричний струм змінної частоти. Розрізняють два основних принципи керування перетворювачами частоти [8-10].

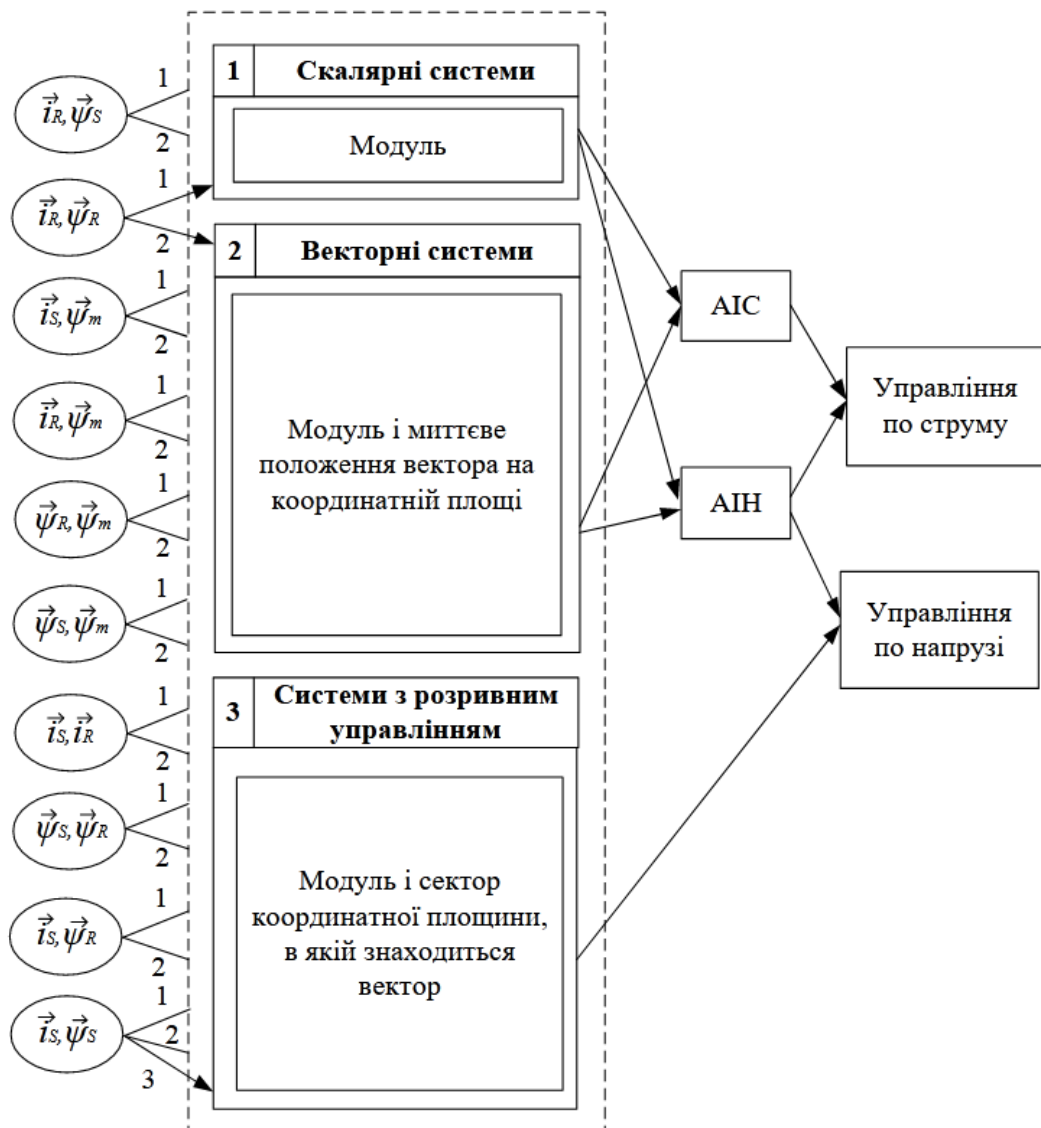


Рисунок 1.4 – Класифікація систем керування асинхронними двигунами

До першого типу відноситься система скалярного керування, часто називаного частотним керуванням, основним завданням якої є формування фазних напруг на основі заданих значень амплітуди й частоти, одержуваних шляхом широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) інвертора, що являють собою трифазну напругу для живлення асинхронного електродвигуна. Даний принцип є найбільш простим способом реалізації частотного керування й завдяки відносно низкій вартості та широко використовується для привода механізмів, що не пред'являють високих вимог до якості регулювання швидкості [11].

Для реалізації даного способу керування найчастіше використовуються перетворювачі частоти з ланкою постійного струму, які складаються з керованого випрямляча, фільтра, автономного інвертора. Величина напруги статора U_1 змінюється УВ, а частоти f_1 – АІ, рис. 1.2. Для невеликих потужностей замість керованого випрямляча використовується некерований, а з допомогою АІ із системою широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) одночасно регулюється й напруга й частота.

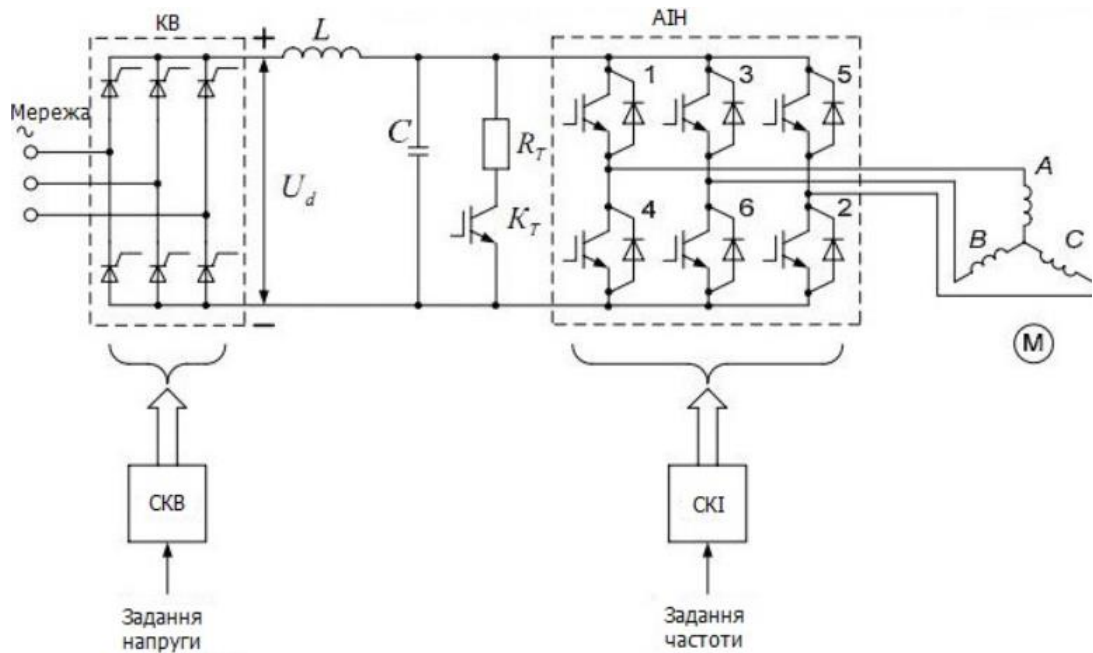


Рисунок 1.5 – Схема перетворювача частоти з ланкою постійного струму: КВ – керований випрямляч; АІН – автономний інвертор напруги; СКВ – система керування випрямлячем; СКІ – система керування інвертором

Цей спосіб частотного управління швидкості асинхронного двигуни є основним. Його застосовують до електроприводів насосів, вентиляторів, компресорів. Даний клас механізмів має широкі потенційні можливості енергозбереження та ресурсозбереження, які успішно реалізуються при впровадженні зазначеного типу перетворювачів [12].

До другого типу систем керування відноситься система векторного керування, що забезпечує характеристики асинхронного електропривода, близькі до характеристик привода постійного струму. Ці властивості системи досягаються за рахунок поділу каналів регулювання потокощеплення й швидкості обертання електродвигуна, не досяжного при використанні скалярного керування. При побудові зазначених систем використовується векторне подання фізичних величин.

Система реалізує векторне регулювання швидкості, математичний апарат якого, заснований на диференціальних рівняннях динаміки асинхронного двигуна й векторних співвідношень. Метод, застосований у даній системі, однаково коректний, як для перехідних, так і для сталих процесів. Дана обставина істотно підвищує динамічний діапазон роботи системи, що приводить, наприклад, до відсутності провалів швидкості при різкій зміні навантаження.

Суть методу безпосереднього регулювання вектора струму. Цей метод мінімізує частоту перемикань інвертора при заданих гармонійних перекручуваннях статорного струму. Він використовується в замкнутому контурі керування вектором струму статора $i_s(t)$.

Для синтезу систем керування використовується математичний опис асинхронного двигуна на основі узагальненої машини. Рівняння записуються з використанням методу просторового вектора [7]:

$$\begin{aligned} \vec{u}_S &= R_S \vec{i}_S + \frac{d\vec{\psi}_S}{dt} + j\psi_k \vec{\psi}_S; \\ \vec{u}_R &= R_R \vec{i}_R + \frac{d\vec{\psi}_R}{dt} + j(\omega_k - \omega_{el}) \vec{\psi}_R; \\ \vec{\psi}_S &= L_S \vec{i}_S + L_m \vec{i}_R; \\ \vec{\psi}_R &= L_S \vec{i}_S + L_R \vec{i}_R; \\ M &= k_M \cdot \text{Mod}(\vec{\psi}_S \times \vec{i}_S); \\ \frac{d\omega}{dt} &= (M - M_C) / J. \end{aligned}$$

де $\omega_{el} = p\omega$; p - число пар полюсів двигуна; ω - кутова швидкість (частота обертання) ротора; $\vec{\psi}_S, \vec{\psi}_R$ - результуючі вектори потокозчеплення статора і ротора асинхронної машини відповідно; \vec{u}_S, \vec{i}_S і \vec{u}_R, \vec{i}_R - вектори напруг і струмів статора і ротора відповідно, для асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором $\vec{u}_R = 0$; R_S, R_R, L_S, L_R і L_m - активні опори, повні індуктивності обмоток статора і ротора, індуктивність від головного потоку відповідно (параметри ротора і L_m приведені до статора); M - електромагнітний момент двигуна; M_C - момент опору на валу; J - сумарний момент інерції ротора і пов'язаних з ним мас; (ω_k - частота обертання системи координат; Mod - модуль векторного добутку; k_M - коефіцієнт пропорційності, свій для кожної пари векторів).

Критерій оптимізації використовуваний у системі для вибору наступного стану інвертора дозволяє: мінімізувати частоту перемикання інвертора при малій амплітуді помилки; зменшити короткочасно виникаючу більшу струмову помилку за мінімальний час при мінімальній кількості комутацій інвертора.

Перетворювачі, що використовують даний принцип керування, мають порівняно високу вартість і застосовуються в механізмах з підвищеними вимогами до якості регулювання швидкості, наприклад, приводи у верстатах, ліфтах, кранах. Хоча за наявності датчиків зворотного зв'язку - датчиків положення, швидкості - у великій кількості випадків з цими

завданнями можуть упоратися й перетворювачі скалярного принципу керування. Слід також зазначити, що існує чітка тенденція до відмови від датчиків швидкості й розробці алгоритмів визначення стану двигуна по вимірюваних фазних струмах і напругах, що веде до зниження вартості й підвищенню надійності системи.

Новим напрямком в області розробки високоякісних систем керування є системи із прямим керуванням моментом. Основна ідея керування полягає в тому, що на кожному кроці розрахунку визначається оптимальний стан інвертора напруги за значенням моменту й потоку статора, із системи виключається широтно-імпульсний модулятор як окрема ланка.

Система реалізує векторне регулювання швидкості, математичний апарат якого заснований на диференціальних рівняннях динаміки асинхронного двигуна й векторних співвідношень. Метод однаково коректний як для перехідних, так і для сталих процесів, що істотно підвищує динамічний діапазон роботи системи, приводить, наприклад, до відсутності провалів швидкості при перегонах навантаження. Завдання контуру швидкості - задати миттєве положення вектора струму, необхідне для підтримки заданої швидкості. Завдання контуру струму - забезпечити реальне положення й амплітуду вектора струму рівними заданим значенням.

Момент перемикання інвертора не прив'язаний до періоду ШІМ, а залежить від реальної помилки вектора струму. Визначальною в роботі контуру є критерій вибору стану інвертора при перемиканнях, він дозволяє:

- мінімізувати частоту перемикань інвертора при малій амплітуді помилки;
- зменшити короткочасно виникаючу більшу струмову помилку за міні-мальний час при мінімальній кількості комутацій інвертора.

Даний метод керування струмом має істотні переваги в порівнянні із

ШІМ - керуванням. Він дозволяє будувати більше швидкісні системи, що миттєво реагують на впливи збурення і одночасно розсіювати менше енергії в силових ключах, у порівнянні з методом ШІМ. Наприклад, заявлено, що привод відпрацьовує 100%-ний стрибок завдання на момент за час, що не перевищує 2 мс, що є природною межею асинхронного двигуна. У більшості випадків ПЧ із таким типом керування дозволяє відмовитися від датчика швидкості, тому що убудований обчислювач швидкості оцінює частоту обертання вала двигуна 40000 разів за секунду з точністю 2 об/хв. [13].

Досвід роботи показує, що в переважній більшості розв'язуваних на сьогоднішній день завдань досить перетворювача частоти зі скалярним принципом керування й ШІМ - модуляцією інвертора, а іноді досить використовувати пристрої плавного пуску (ППП) або, як їх ще називають, м'які пускачі.

Нижче наведена функціональна схема перетворювача частоти з векторним керуванням.

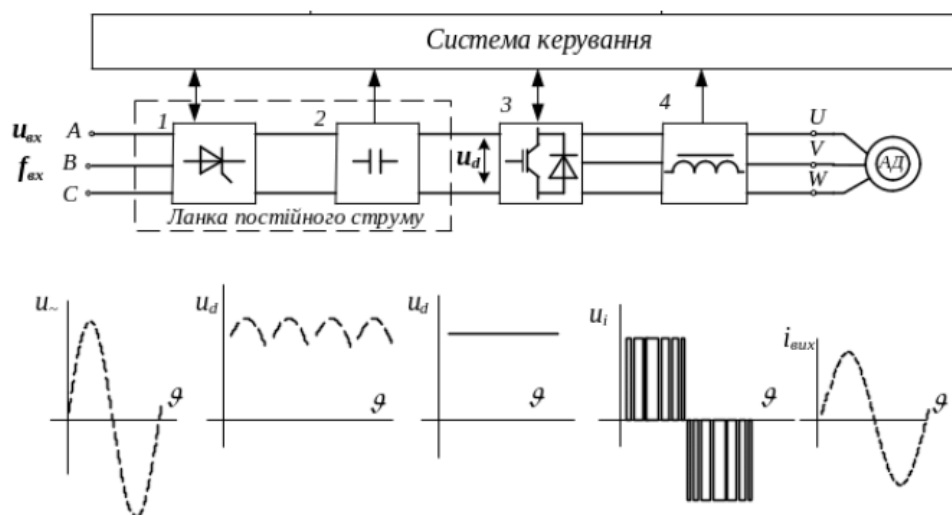


Рисунок 1.6 – Функціональна схема та часові діаграми перетворювача частоти на базі транзисторів IGBT

Досліджуючи тенденції в розвитку електроприводів насосних установок, можна зробити висновки:

- у переважній більшості, електропривод насоса реалізується за схемою ПЧ-АД;
- перетворювачі частоти виконуються на базі АІН на IGBT-транзисторах;
- для насосів великої потужності використовується векторне керування й використовується схема ПЧ із керованим випрямлячем;
- для насосів середньої потужності використовується скалярне керування й використовується схема ПЧ із некерованим випрямлячем;

У даній кваліфікаційній роботі магістра буде здійснюватися проєктування системи керування на базі перетворювача частоти з некерованим випрямлячем і керованим інвертором на IGBT-транзисторах зі скалярної ШІМ - модуляцією.

1.7 Висновки за розділом

У першому розділі кваліфікаційної роботи проведено детальний аналітичний огляд вимог, принципів функціонування та сучасних підходів до побудови електропривода циркуляційного насоса із застосуванням перетворювачів частоти. На основі аналізу технічних, енергетичних та експлуатаційних характеристик сформульовано ключові висновки.

Передусім встановлено, що електропривод циркуляційного насоса повинен забезпечувати широкий спектр функцій — від пуску та зупинки агрегату до автоматичного регулювання швидкості обертання для підтримання стабільного тиску в мережі. Також необхідними є високі вимоги до динамічних показників, зокрема відсутність статичної похибки, обмеження перерегулювань та мінімізація часу перехідних процесів.

Проведений огляд способів регулювання швидкості асинхронних двигунів підтвердив, що традиційні методи (механічні та гідравлічні варіатори, зміна опорів тощо) мають значні недоліки, які обмежують їхню ефективність та доцільність застосування у сучасних насосних установках.

Натомість використання перетворювачів частоти дає можливість реалізувати енергоощадне та високоякісне управління електроприводом, значно знижує зношування обладнання, мінімізує аварійні ситуації та забезпечує суттєвий економічний ефект при транспортуванні рідин.

Аналіз варіантів застосування перетворювачів частоти показав, що як індивідуальне керування одним двигуном, так і побудова станцій керування групою насосів забезпечують високий рівень гнучкості та адаптивності системи. Особливу увагу приділено перевагам плавного регулювання продуктивності та оптимізації ресурсу обладнання.

Порівняння принципів скалярного та векторного керування дозволило визначити, що для насосних установок середньої потужності оптимальним є застосування скалярного керування зі ШІМ-модуляцією, яке забезпечує достатню точність і стабільність процесів при нижчій вартості обладнання. Водночас системи векторного керування доцільні для потужних і високодинамічних приводів.

Узагальнюючи проведений аналіз, доцільним для реалізації поставленої задачі є використання перетворювача частоти з некерованим випрямлячем та керованим інвертором на IGBT-транзисторах зі скалярним принципом ШІМ-керування. Така структура забезпечує необхідну якість регулювання, енергоефективність та надійність електропривода циркуляційного насоса, що визначає її як оптимальний варіант для подальшого проектування у рамках кваліфікаційної роботи.

2 КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА

2.1 Визначення основних параметрів елементів автоматизованого електроприводу циркуляційного насосу та його характеристик

2.1.1 Вибір приводного електродвигуна

Основною ланкою в системі електропривода є електродвигун, у якості якого можуть бути використані електричні машини постійного або змінного струму. Відомо, що застосування останніх підвищує надійність електропривода, а також знижує капітальні й експлуатаційні витрати. Ці переваги, за інших рівних умов, і визначають перевага використання електропривода змінного струму на базі асинхронного двигуна із короткозамкненим ротором.

Виконаємо розрахунок необхідної потужності електродвигуна.

Потужність циркуляційного насосу можна визначити так:

$$P_H = \frac{Q\rho gH}{\eta} = \frac{0,140 \cdot 1000 \cdot 9,8 \cdot 38}{0,77} = 67,7 \text{ кВт} \quad (2.1)$$

де Q - продуктивність насоса (подача води), м³/с;

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

ρ - щільність рідини, що перекачується, кг/м³ ;

η - ККД насоса;

H - повний напір, м.

Визначимо необхідну потужність приводного електродвигуна:

$$P_{\text{роз.}} = k_3 \cdot P_H = 1,15 \cdot 67,7 = 77,9 \text{ кВт} \quad (2.2)$$

де $P_{роз.}$ - розрахункова потужність двигуна;

P_H - розрахункова потужність насоса;

$k_3 = 1.15$ - коефіцієнт запасу.

Вибираємо з каталогу асинхронний електродвигун серії 4А, а саме 4А280М6У3. Найближчий по потужності двигун - 90 кВт.



Рисунок 2.1 – Зовнішній вигляд асинхронного електродвигуна 4А280М6У3

Таблиця 2.1 - Параметри електродвигуна

Номінальна потужність	$P_{ном}, \text{кВт}$	90
Фазна напруга	$U_{фн}, \text{В}$	220
Синхронна частота обертання	$n_H, \text{об/хв}$	1000
Ковзання	$S_{ном}, \%$	1,8
Критичне ковзання	$S_k, \%$	8,3
ККД	$\eta, \%$	92,5
$\cos \varphi$		0,89
$m_{II} = M_{II} / M_{ном}$		1,2
$m_M = M_{min} / M_{ном}$		1,0
$m_K = M_K / M_{ном}$		2,2
$i_{II} = I_{II} / I_{ном}$		7,0
Індуктивний опір контуру намагнічування	$X_{\mu}, \text{о.е.}$	3,5
Активний опір статора	$R'_1, \text{о.е.}$	0,030
Індуктивний опір статора	$X'_1, \text{о.е.}$	0,11
Активний опір ротора	$R''_2, \text{о.е.}$	0,019

Індуктивний опір ротора	X_2'' , о.е.	0,12
Момент інерції двигуна	$J_{д,р}$, кг · м ²	3,4

Серія 4А включає двигуни основного виконання, ряд модифікацій. Перші відповідають загальним вимогам і призначені для експлуатації в нормальних умовах роботи; це трифазні асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором, розраховані на частоту живлення 50 Гц.

Серія 4А є масовою серією АД, розрахованих на застосування в різних областях промисловості. Вона охоплює діапазон потужностей від 0,06 до 400 кВт і виконана на 17 висотах осі обертання - від 50 до 355мм.

2.1.2 Розрахунок і вибір перетворювача частоти

Функцію перетворення параметрів електричної енергії мережі живлення до таких значень, які необхідні для нормальної роботи приводного електродвигуна, а також функцію дозування величини електричної енергії, яка надходить до двигуна, для регулювання його швидкості виконує перетворювальний пристрій. Як було розглянуто вище, у якості перетворювального використовується перетворювач частоти, на базі автономного інвертора напруги на IGBT-транзисторах зі скалярною ШІМ – модуляцією [15].

При виборі перетворювача частоти необхідно керуватися наступними основними вимогами:

- висока надійність при будь-яких режимах роботи;
- простота системи керування без погіршення основних параметрів вихідного струму, напруги й функціональних можливостей ПЧ;
- мінімально можлива вартість перетворювача в діапазоні потужностей до 200 кВт.

Виходячи зі знайденого номінального значення струму статора

$$I_{1\phi H} = \frac{P_H}{3U_{1\phi} \cdot \cos \varphi \cdot \eta_H} = \frac{90000}{3 \cdot 220 \cdot 0,89 \cdot 0,925} = 165,6 \text{ A} \quad (2.3)$$

Був обраний перетворювач частоти FDU фірми Emotron, розроблений спеціально для керування насосами й вентиляторами [16].



Рисунок 2.2 – Зовнішній вигляд перетворювач частоти FDU Emotron

Серед численних вбудованих функцій, розрахованих на насосне й вентиляторне застосування, варто виділити наступні:

- функція керування насосами;
- пуск електродвигуна;
- вбудований ПІД регулятор;
- подолання провалів напруги;
- копіювання налаштувань у переносну панель керування;
- оптимізація поля;

- автоматичний потенціометр;
- подвійний час розгону / уповільнення.

За необхідності перетворювачі можуть бути укомплектовані різними додатковими пристроями, що розширюють їхні можливості:

- інтерфейс послідовного зв'язку;
- переносна панель керування;
- виносна панель керування для установки на двері шафи;
- вихідний дросель;
- корпус виконання IP54.

Перетворювачі FDU не є спрощеною модифікацією інших серій, вони розроблялися з обліком всіх можливих вимог насосно-вентиляторного застосування, включаючи моніторинг навантаження й функції логічного компаратора.

Послідовна й інтуїтивно зрозуміла структура меню з можливістю застосування макросів робить введення в експлуатацію і керування простим та швидким.

Застосування перетворювачів серії FDU дає можливість регулювання швидкості двигуна й відповідно зниження споживаної потужності, а також забезпечує плавну роботу устаткування в режимах пуску й зупинки, що у свою чергу збільшує термін служби устаткування й знижує необхідність обслуговування.

Функціональність перетворювачів цієї серії підвищує використання двигуна. Контроль навантаження дозволяє подавати в зовнішній ланцюг сигнали при досягненні заданого рівня максимального й мінімального навантаження. Зокрема, у такий спосіб можна відстежити кавітацію або сухий хід насоса, роботу на закриту засувку або засмічений фільтр [17-20].

Функції компаратора дозволяють запрограмувати вихідні реле на перемикання не тільки при певних станах, але й при будь-яких сполученнях подій у системі. У стандартній комплектації в FDU уже убудовані пульт керування, вхід для підключення термістора

електродвигуна, ЕМС-Фільтр, вхідні й вихідний низькочастотні фільтри.

Основні параметри й характеристики електропривода занесені в таблицю 2.2:

Таблиця 2.2 Параметри електропривода

Номінальна потужність, кВт	90
Номінальний струм, А	175
Параметри мережі: число фаз	3
напруга, В	380, +10%, 15%
частота, Гц	50/60
Параметри вихідної напруги: число фаз	3
напруга, В	380, ±2
частота, Гц	50 ± 0,5%
Робочий діапазон регулювання частоти, Гц	0-400
Робочий діапазон регулювання напруги, В	0-380
Коефіцієнт потужності, не менш	0,95
Коефіцієнт корисної дії, не менш	95

2.1.3 Вибір обладнання для оптимізації режимів роботи електропривода циркуляційного насосу

Для коректної роботи автоматизованого електропривода циркуляційного насосу необхідно обрати датчик тиску.

Вибір датчика здійснимо виходячи з робочого тиску насоса $H_{\text{ном}} = 38 \text{ м} = 3,8 \text{ атм.}$, тоді максимально високий робочий тиск дорівнює:

$$P_{\text{макс}} = k \cdot H_{\text{ном}} = 1,2 \cdot 3,8 = 4,56 \text{ атм.} \quad (2.4)$$

За рекомендаціями з [6] обрано датчик тиску американської фірми «Метран» Метран-100 з найближчим більшим робочим тиском. З огляду

на, що 4,56 атм. ~ 0,456 МПа, вибираємо датчик 100-ДА-10501. Верхня межа виміру датчика: 0,6 МПа.

Датчики Метран-100 є багатограничними й можуть бути налаштовані на верхню межу вимірів або діапазон вимірів від $P_{\text{мин}}$ до $P_{\text{макс}}$, а також на верхню межу, або діапазон вимірів, що відрізняється від стандартного. Ряд верхніх меж вимірів даного датчика: 2.5; 1.6; 1.0; 0.6; 0.4; 0.25 МПа.



Рисунок 2.3 – Зовнішній вигляд датчика тиску Метран - 100

Датчики тиску «Метран-100» призначені для роботи в системах автоматичного контролю, регулювання й керування й забезпечують безперервне перетворення тиску в уніфікований аналоговий сигнал [21].

Принцип дії датчиків заснований на використанні п`езорезистивного ефекту в гетероепітаксiальній плівці кремнію, вирощеної на поверхні монокристалічної пластини зі штучного сапфіру. Чутливий елемент із монокристалічною структурою кремнію на сапфірі є основою всіх сенсорних блоків датчиків «Метран».

При деформації чутливого елемента під впливом вхідної вимірюваної величини (наприклад, тиску або різниці тисків) змінюється електричний

опір кремнієвих п'єзореzystорів мостової схеми на поверхні цього чутливого елемента, тобто відбувається розбаланс мостової схеми.

Таблиця 2.3 – Характериститки Датчики тиску «Метран-100»

Межа основної погрішності, що допускається, $\pm \gamma\%$	
$P_{\text{макс}} \geq P_{\text{в}} \geq P_{\text{макс}} / 10$	$P_{\text{макс}} / 10 \geq P_{\text{в}} \geq P_{\text{макс}} / 25$
0.1	0.5
0.15	

Електронний пристрій датчика перетворить електричний сигнал від тензоперетворювача в стандартний аналоговий сигнал «і/або» в цифровий сигнал у стандарті протоколу HART, або цифровий сигнал на базі інтерфейсу RS485.

Датчик тиску складається з вимірювального блоку й електронного перетворювача. Основним елементом вимірювального блоку є чутливий елемент - пластина монокристалічного сапфіра із кремнієвим плівковими тензореzystорами, з'єднана з металевією пластиною тензоперетворювача. Тензореzystори з'єднані в мостову схему. Деформація вимірювальної мембрани приводить до пропорційної зміни опору тензореzystорів, а відповідно й до розбалансу мостової схеми. Електричний сигнал з виходу мостової схеми датчиків надходить в електронний блок, де перетвориться в уніфікований фотополяриметричний сигнал.

2.2 Висновки за розділом

У другому розділі магістерської роботи виконано комплексне конструкторське опрацювання автоматизованого електропривода циркуляційного насосу, що включало розрахунок його основних параметрів, вибір обладнання та обґрунтування технічних рішень.

На основі аналізу умов роботи насосної установки визначено необхідну потужність приводу. Розрахунки показали, що для забезпечення надійної та ефективної роботи системи потрібна потужність, близька до 78 кВт, а з урахуванням коефіцієнта запасу обрано асинхронний двигун серії 4А типу 4А280М6У3 номінальною потужністю 90 кВт. Такий вибір є оптимальним з огляду на високі показники ККД, надійність, простоту конструкції та відповідність вимогам до експлуатації в умовах насосного обладнання.

Розглянуто та обґрунтовано вибір перетворювача частоти як основного керуючого пристрою електропривода. На підставі номінальних параметрів двигуна визначено необхідний струм та обрано перетворювач частоти серії FDU компанії Emotron. Даний ПЧ відповідає технологічним вимогам насосних систем, забезпечує широкий функціонал (вбудований ПІД-регулятор, захисні функції, оптимізація режимів роботи), високий рівень енергоефективності та надійності, а також дає можливість точного регулювання швидкості та плавного запуску електродвигуна.

Для забезпечення коректного функціонування системи автоматичного керування виконано вибір датчика тиску. На основі робочих параметрів насоса визначено максимальний тиск та обрано датчик серії Метран-100 з верхньою межею 0,6 МПа. Цей датчик забезпечує необхідну точність, стабільність вимірювання та сумісність із системами автоматизації завдяки використанню п'єзорезистивного перетворювача й можливості формування аналогових і цифрових сигналів виходу.

Таким чином, у другому розділі сформовано технічну основу автоматизованого електропривода циркуляційного насосу, визначено раціональні технічні рішення щодо вибору електродвигуна, перетворювача частоти та контрольно-вимірювального обладнання. Обрані елементи забезпечують підвищення енергоефективності, надійності та функціональної гнучкості приводу, що створює передумови для подальшого розроблення системи керування та її програмної реалізації.

3 РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА

3.1 Розроблення структурних схем САК, математичний опис об'єкта й системи керування

3.1.1 Принципи частотного керування асинхронним електродвигуном

При зміні частоти струму f_1 пропорційно буде змінюватися швидкість холостого ходу ω_0 :

$$\omega_0 = \frac{2\pi f_1}{\rho}, \quad (3.1)$$

де ρ - число пар полюсів обмотки статора.

Магнітний потік Φ змінюється пропорційно частоті:

$$U_\phi \approx E_{1\phi} = 4,47f_1 W_1 \Phi_1 \quad (3.2)$$

де $E_{1\phi}$ – електрорушійна сила статора;

W_1 - число витків обмотки фази статора.

В номінальному режимі магнітна система двигуна насичена, то при номінальній напрузі $U_{ном}$ припустиме тільки збільшення частоти напруги живлення. Тоді при значенні f_1 більшому $f_{ном}$, відповідно збільшується ω_0 і індуктивний опір короткого замикання X_k і зменшиться магнітний потік Φ збільшення ω_0 і X_k викликає зменшення критичного моменту $M_{кр}$:

$$M_{кр} = \frac{3U_{1\phi}^2}{2\omega_0[R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + X_k^2}]} \quad (3.3)$$

де R_1 - активний опір обмотки статора.

Критичне ковзання $S_{кр}$ зі збільшенням X_K зменшиться

$$S_{кр} = \pm \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + X_K^2}}, \quad (3.4)$$

де R_2 - активний опір обмотки ротора.

При зменшенні частоти $f_1 < f_{1ном}$ знижується кутова швидкість ω_0 , а магнітний потік Φ збільшується. Це приводить до глибокого насичення магнітного ланцюга й збільшення струму намагнічування I_μ , що у свою чергу, викликає зниження енергетичних показників двигуна ($\cos \varphi$, ККД).

Для того, щоб потік Φ при збільшенні або зменшенні частоти f_1 залишався постійним, необхідно при зміні частоти в цій же кратності змінити напруга U_1 , тобто змінювати ці величини так, щоб

$$\frac{U_1}{f_1} = \text{const}. \quad (3.5)$$

При дотриманні цієї умови критичний момент змінюється - збільшується з ростом частоти й зменшується з її зниженням.

Регулювання при $U_1/f_1 = \text{const}$ доцільно для електроприводів з $M_c = \text{const}$, тобто з постійним статичним моментом. Якщо M_c виробничого механізму змінюється при регулюванні швидкості так, що потужність $P_c = M_c \omega$, то регульоване джерело змінного струму повинно забезпечувати зміну U_1 і f_1 у таких межах, щоб $U_1/\sqrt{f_1} = \text{const}$. Для насосного навантаження ($M_c = \text{var}$) при регулюванні кутової швидкості значення U_1 і f_1 повинні змінюватися так, щоб $U_1/f_1^2 = \text{const}$.

Таким чином, закон зміни напруги визначається не тільки частотою f_1 але й характером зміни моменту статичного навантаження M_c на валу двигуна. На рис.3.1 а наведені характеристики при $M_c = \text{const}$, на рис.3.1 б - при $P_c = \text{const}$, на рис.3.1 в - при $M_c = \text{var}$.

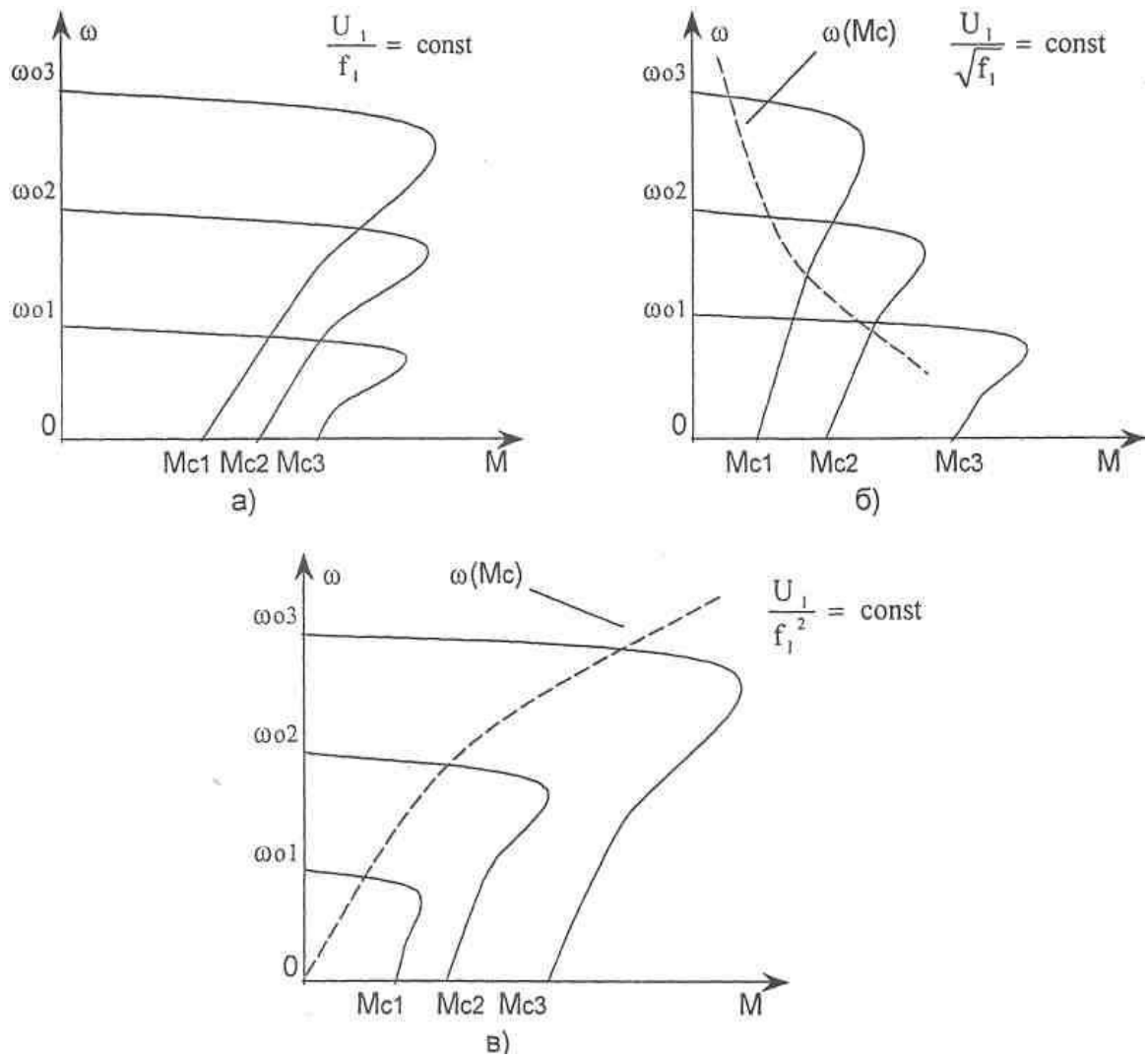


Рисунок 3.1 – Механічні характеристики асинхронного двигуна при регулюванні зміною частоти мережі живлення

3.1.2 Побудова динамічної моделі асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором

На основі Т-подібної схеми заміщення і схеми динамічно узагальненої електричної машини здійснюється математичний опис асинхронного двигуна з короткозамкненим роторів і розробка його динамічної моделі [18-22].

Визначимо параметри схеми заміщення:

$$U = \frac{U_{\text{сл}}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 219,393 \text{ В.}$$

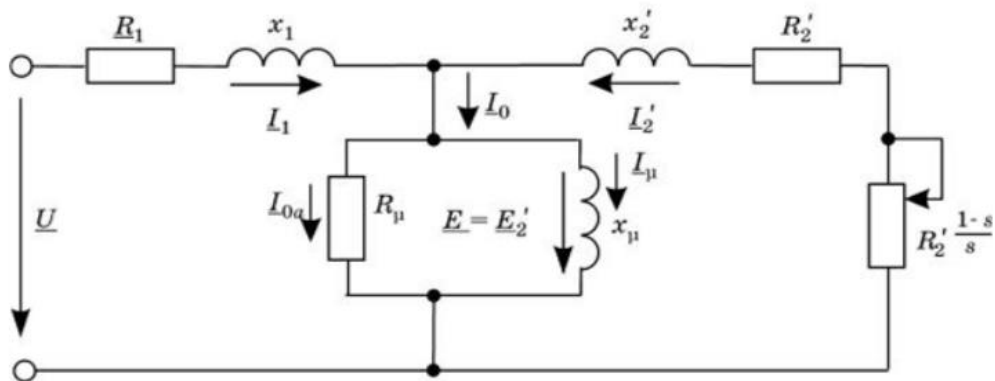


Рисунок 3.2 – Т-подібна схема заміщення динамічно узагальненого асинхронного електродвигуна

$$I_{1\phi} = \frac{P_{2\text{н}}}{3 \cdot U_{\phi} \cdot \eta_{\text{н}} \cdot \cos(\varphi)} = \frac{90000}{3 \cdot 220 \cdot 0,925 \cdot 0,89} = 165,64 \text{ А;}$$

де $P_{2\text{н}}$ - номінальна потужність; U_{ϕ} - фазна напруга.

Параметри схеми заміщення в абсолютних одиницях:

$$R_1 = R_1' \frac{U_{\phi}}{I_{1\phi}} = 0,03 \cdot \frac{220}{165,64} = 0,0398 \text{ Ом;} \quad (3.6)$$

$$R_2 = R_2'' \frac{U_{\phi}}{I_{1\phi}} = 0,019 \cdot \frac{220}{165,64} = 0,02524 \text{ Ом;} \quad (3.7)$$

$$X_1 = X_1' \frac{U_{\phi}}{I_{1\phi}} = 0,11 \cdot \frac{220}{165,64} = 0,1461 \text{ Ом;} \quad (3.8)$$

$$X_2 = X_2'' \frac{U_{\phi}}{I_{1\phi}} = 0,12 \cdot \frac{220}{165,64} = 0,1594 \text{ Ом;} \quad (3.9)$$

$$X_{\mu} = X_{\mu}^{\prime} \frac{U_{\phi}}{I_{1\phi}} = 3.5 \cdot \frac{220}{165.64} = 4.65 \text{ Ом.} \quad (3.10)$$

де X_{μ} - головний індуктивний опір;

R_1, X_1 - активний та індуктивний опір обмотки статора;

R_2, X_2 - активний та індуктивний опір обмотки ротора, приведенний до обмотки статора;

X_1, X_2, R_1, R_2 - опір статора і ротора, Ом;

$U_{1\phi n}, I_{1\phi n}$ - нормальне значення фазної напруги, В і струму, А.

Визначемо індуктивності полів розсіювання статора та ротора і індуктивність статорної та роторної обмотки, а також індуктивність контуру намагнічування.

Індуктивність поля розсіювання статора:

$$L_{1\sigma} = \frac{X_1}{\omega_{33}} = \frac{0.1465}{314.159} = 0.000466 \text{ Гн.} \quad (3.11)$$

Індуктивність поля розсіювання ротора:

$$L_{2\sigma} = \frac{X_2}{\omega_{33}} = \frac{0.1594}{314.159} = 0.000507 \text{ Гн.} \quad (3.12)$$

Індуктивність контуру намагнічування:

$$L_T = \frac{X_{\mu}}{\omega_{33}} = \frac{3.5}{314.159} = 0.0111 \text{ Гн.} \quad (3.13)$$

Індуктивність статорної та роторної обмотки:

$$L_1 = \frac{X_1 + X_{\mu}}{\omega_{33}} = \frac{0.1465 + 3.5}{314.159} = 0.01161 \text{ Гн.} \quad (3.14)$$

$$L_2 = \frac{X_2 + X_\mu}{\omega_{33}} = \frac{0.1594 + 3.5}{314.159} = 0.01165 \text{ Гн}; \quad (3.15)$$

$$\alpha = \frac{R'_2}{L_2} = \frac{0.02524}{0.01165} = 2.176; \quad (3.16)$$

$$\sigma = L_1 - \frac{L_m^2}{L_2} = 0.01161 - \frac{0.0111^2}{0.01165} = 0.001034; \quad (3.17)$$

Сумарний індуктивний опір короткого замикання визначимо по формулі:

$$X_k = X_1 + X'_2 = 0.1461 + 0.1594 = 0.3055 \text{ Ом}. \quad (3.18)$$

При математичному описі АД, як об'єкта керування, приймаються наступні припущення:

- сили, що намагнічують, обмотку двигуна розподіляються синусоїдально уздовж кола повітряного проміжку;
- втрати в "сталі" статора й ротора відсутні;
- обмотки статора й ротора симетричні зі зрушенням осі на 120° ;
- насичення магнітного ланцюга відсутнє.

Одержимо динамічну модель АД з короткозамкненим ротором.

Для опису електричної частини машини скористаємося рівняннями електричної рівноваги у формі рівнянь Кірхгофа:

$$\vec{U}_1 = R_1 \vec{I}_1 + \frac{d\vec{\Psi}_1}{dt} \quad (3.19)$$

$$\vec{U}_2 = R_2 \vec{I}_2 + \frac{d\vec{\Psi}_2}{dt} - J\omega p_n \vec{\Psi}_2,$$

де $\vec{\Psi}_1$ і $\vec{\Psi}_2$ – потокозчеплення відповідно статора й ротора, які визначаються дією струмів всіх обмоток машини:

$$\vec{\Psi}_1 = L_1 \vec{I}_1 + L_m \vec{I}_2; \quad (3.20)$$

$$\vec{\Psi}_2 = L_2 \vec{I}_2 + L_m \vec{I}_1.$$

Виключимо з рівнянь (3.20) \vec{i}_2 і $\vec{\psi}_1$. для цього виразимо \vec{i}_2 з останнього рівняння й підставимо у формулу для $\vec{\psi}_1$ одержимо:

$$\vec{i}_2 = \frac{\vec{\psi}_2 - L_m \vec{i}_1}{L_2} \quad (3.21)$$

$$\vec{\psi}_1 = L_1 \vec{i}_1 + L_m \left(\frac{\vec{\psi}_2 - L_m \vec{i}_1}{L_2} \right) = \left(L_1 - \frac{L_m^2}{L_2} \right) \vec{i}_1 + \frac{L_m}{L_2} \vec{\psi}_2. \quad (3.22)$$

Підставимо (3.21) у друге рівняння (3.22):

$$\vec{U}_2 = R_2 \frac{\vec{\psi}_2 - L_m \vec{i}_1}{L_2} + \frac{d\vec{\psi}_2}{dt} - J\omega p_n \vec{\psi}_2, \quad (3.23)$$

з (3.23) виражаємо $\frac{d\vec{\psi}_2}{dt}$:

$$\frac{d\vec{\psi}_2}{dt} = -\frac{R_2}{L_2} \vec{\psi}_2 + J\omega p_n \vec{\psi}_2 + \frac{R_2 L_m}{L_2} \vec{i}_1 + \vec{U}_2. \quad (3.24)$$

Для одержання $\frac{d\vec{i}_1}{dt}$ скористаємося першим рівнянням (3.19)

підставивши в це рівняння значення $\vec{\psi}_1$:

$$\vec{U}_1 = R_1 \vec{i}_1 + \frac{d}{dt} \left(\left(L_1 - \frac{L_m^2}{L_2} \right) \vec{i}_1 + \frac{L_m}{L_2} \vec{\psi}_2 \right);$$

$$\vec{U}_1 = R_1 \vec{i}_1 + \left(L_1 - \frac{L_m^2}{L_2} \right) \frac{d\vec{i}_1}{dt} + \frac{L_m}{L_2} \frac{d\vec{\psi}_2}{dt},$$

$$\frac{d\vec{i}_1}{dt} = \frac{R_1 \vec{i}_1}{\sigma} - \frac{L_m}{\sigma L_2} \left(-\frac{R_2}{L_2} \vec{\psi}_2 + J\omega p_n \vec{\psi}_2 + \frac{R_2 L_m}{L_2} \vec{i}_1 + \vec{U}_2 \right) + \frac{\vec{U}_1}{\sigma}. \quad (3.25)$$

Увівши наступні позначення для рівнянь (3.24) і (3.25) з урахуванням

$\alpha = \frac{R_2}{L_2}$; $\beta = \frac{L_m}{\sigma L_2}$; $\sigma = L_1 - \frac{L_m^2}{L_2}$ одержимо:

$$\frac{d\vec{i}_1}{dt} = -\frac{R_1}{\sigma} \vec{i}_1 - \alpha \beta L_m \vec{i}_1 + \alpha \beta \vec{\psi}_2 - \beta J\omega p_n \vec{\psi}_2 - \beta \vec{U}_2 + \frac{\vec{U}_1}{\sigma};$$

$$\frac{d\vec{\psi}_2}{dt} = -\alpha\vec{\psi}_2 + J\omega p_n \vec{\psi}_2 + \alpha L_m \vec{i}_1 + \vec{U}_2.$$

Запишемо похідні за часом для компонентів струмів статора й потокозчеплення ротора з урахуванням вище отриманих виразів:

$$\frac{di_{1a}}{dt} = -\frac{R_1}{\sigma} i_{1a} - \alpha\beta L_m i_{1a} + \alpha\beta\psi_{2a} - \beta\omega p_n \psi_{2b} - \beta U_{2a} + \frac{U_{1a}}{\sigma};$$

$$\frac{di_{1b}}{dt} = -\frac{R_1}{\sigma} i_{1b} - \alpha\beta L_m i_{1b} + \alpha\beta\psi_{2b} - \beta\omega p_n \psi_{2a} - \beta U_{2b} + \frac{U_{1b}}{\sigma};$$

$$\frac{d\psi_a}{dt} = -\alpha\psi_{2a} - \omega p_n \psi_{2b} + \alpha L_m i_{1a} + U_{2a};$$

$$\frac{d\psi_b}{dt} = -\alpha\psi_{2b} + \omega p_n \psi_{2a} + \alpha L_m i_{1b} + U_{2b}.$$

Рівняння моменту електромеханічного перетворювача виражене в системі координат статора (a-b) має вигляд:

$$M = L_m \cdot \vec{i}_1^T \cdot J \cdot \vec{i}_2 = \frac{L_m}{L_2} \cdot \vec{i}_1^T \cdot J (\vec{\psi}_2 - L_m \vec{i}_1) = \frac{L_m}{L_2} \cdot \vec{i}_1^T \cdot J \cdot \vec{\psi}_2 - \frac{L_m}{L_2} \cdot \vec{i}_1^T \cdot J \cdot \vec{i}_1.$$

$$\text{Оскільки } \vec{i}_1^T J \vec{i}_1 = 0, \text{ тоді } M = \frac{L_m}{L_2} \cdot \vec{i}_1^T \cdot J \cdot \vec{\psi}_2 = \frac{L_m}{L_2} \cdot (\psi_{2a} i_{1b} - \psi_{2b} i_{1a}).$$

Динамічна модель АД з короткозамкненим ротором матиме такий вигляд:

$$\omega = \frac{1}{J} \left[\frac{3}{2} p_n \frac{L_m}{L_2} (\psi_{2a} i_{1b} - \psi_{2b} i_{1a}) - M_c \right];$$

$$\frac{di_{1a}}{dt} = -\frac{R_1}{\sigma} i_{1a} - \alpha\beta L_m i_{1a} + \alpha\beta\psi_{2a} + \beta\omega p_n \psi_{2b} + \frac{U_{1a}}{\sigma} \quad (3.26)$$

$$\frac{di_{1b}}{dt} = -\frac{R_1}{\sigma} i_{1b} - \alpha\beta L_m i_{1b} + \alpha\beta\psi_{2b} - \beta\omega p_n \psi_{2a} + \frac{U_{1b}}{\sigma}$$

$$\frac{d\psi_a}{dt} = -\alpha\psi_{2a} - \omega p_n \psi_{2b} + \alpha L_m i_{1a}$$

$$\frac{d\psi_b}{dt} = -\alpha\psi_{2b} + \omega p_n \psi_{2a} + \alpha L_m i_{1b}$$

$$\text{де } \alpha = \frac{R_2}{L_2}; \quad \beta = \frac{L_m}{\sigma L_2}; \quad \sigma = L_1 - \frac{L_m^2}{L_2}; \quad L_1 = L_m + L_{1\sigma}; \quad L_2 = L_m + L_{2\sigma};$$

У рівняннях:

ω - кутова швидкість;

i_{1a}, i_{1b} - компоненти вектора струму статора;

ψ_{2a}, ψ_{2b} - компоненти вектора потокозчеплення ротора;

U_{1a}, U_{1b} - компоненти вектора напруги статора;

M_c - момент навантаження;

R_1, R_2 - активні опори статора й ротора;

L_1, L_2 - індуктивності статора й ротора;

L_m - індуктивність контуру, що намагнічує;

$L_{1\sigma}, L_{2\sigma}$ - індуктивності розсіювання статора й ротора;

p_n - число пар полюсів;

$M = \frac{3}{2} P_n \cdot \frac{L_m}{L_2} (\psi_{2a} \cdot i_{1b} - \psi_{2b} \cdot i_{1a})$ - момент, що розвивається двигуном.

Структурна схема моделі асинхронного двигуна в dq координатах представлена на рис. 3.2.

Для налаштування регуляторів системи керування буде використовуватися, так звана, лінерізована модель АД (рис. 3.3). Вона будується виходячи з того, що нелінійна механічна характеристика двигуна представляється лінійною на робочій ділянці.

При цьому передатна функція регульованого двигуна може бути записана у вигляді аперіодичної ланки:

$$W(p) = \frac{M_d}{\omega_c - \omega} = \frac{\beta}{T_E p + 1}.$$

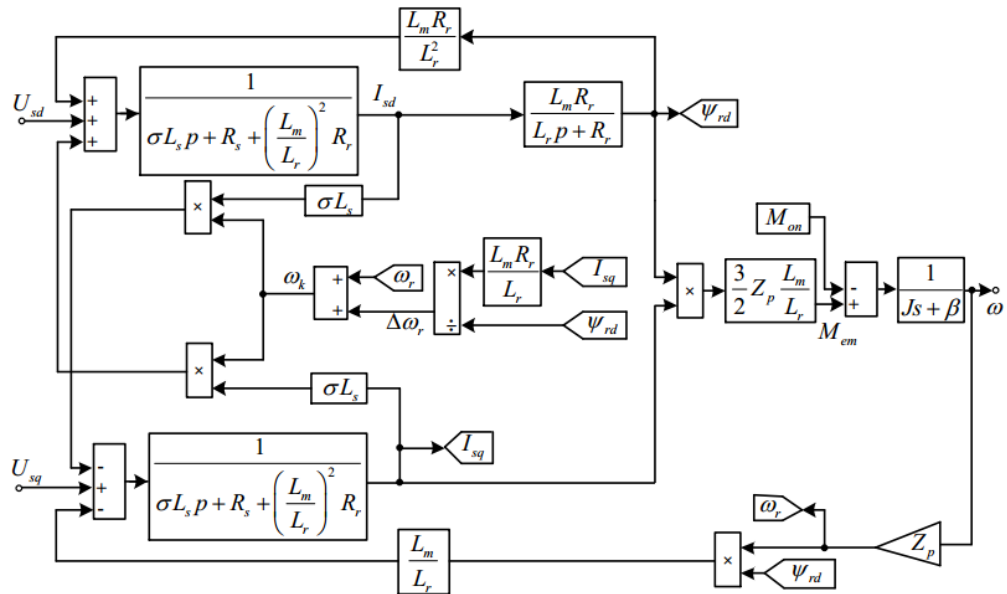


Рисунок 3.2 – Структурна схема моделі асинхронного двигуна в dq координатах

У цьому випадку вихідною координатою є момент на валу двигуна, тобто двигун розглядається як джерело моменту. Момент інерції самого двигуна доцільно віднести до передавального пристрою ЕП. Це дозволяє забезпечити зручність в узгодженні математичної моделі двигуна й технологічного об'єкта, особливо для багатомасової ЕМС.

Якщо доповнити передавальну функцію двигуна $W(p)$ ланкою $K_D = \frac{2\pi}{p_n}$, що зв'яже керуючий вплив, у нашому випадку частоту, з різницею $\omega_c - \omega$, а також передавальною функцією механічної частини у вигляді одномасової схеми, то одержимо структурну схему асинхронного двигуна.

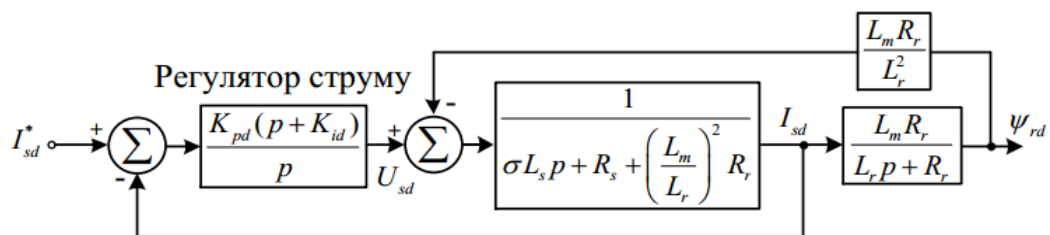


Рисунок 3.3 – Лінійзована модель АД

Для знаходження передавальної функції із замкненим контуром внутрішні контури можуть бути спрощені до структури, наведеної на рис. 3.4. З рисунку видно, що передавальна функція контуру має два нулі, один в зворотній величині постійної часу ротора, а інший в зворотній величині постійної часу інтегратора. Передавальна функція також має три полюси, один на початку координат і два біля квадратних коренів.

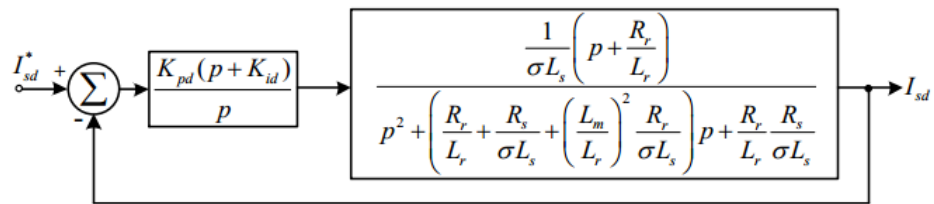


Рисунок 3.4 – Спрощена структурна схема контуру регулювання

3.2 Розроблення динамічної математичної моделі АД - ПЧ із проміжною ланкою постійного струму

До складу перетворювача частоти з ланкою постійного струму входить некерований випрямляч, фільтр і керований інвертор із ШІМ [22].

Для двофазної моделі АД в координатах статор (а-в) використовується структурна схема перетворювача частоти, зображена на рис.3.5.

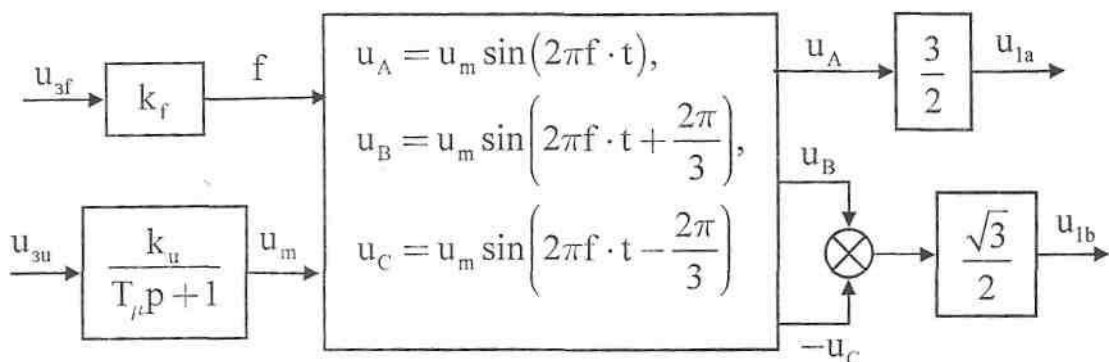


Рисунок 3.5 – Структурна схема ПЧ

u_m - амплітуда напруги;

u_A, u_B, u_C - фазні напруги статора;

u_{1a}, u_{1b} - проекції вектора напруги статора на осі а, у системи координат статора;

k_f - коефіцієнт передачі по частоті;

k_u - коефіцієнт передачі по амплітуді;

$T_\mu = 0.01$ с - мала постійна часу;

$$k_f = \frac{f_H}{U_{3f\max}} = \frac{50}{10} = 5; \quad (3.27)$$

$$k_U = \frac{U_{m\max}}{U_{3U\max}} = \frac{\sqrt{2}U_{H\phi}}{U_{3U\max}} = \frac{\sqrt{2} \cdot 220}{10} = 31. \quad (3.28)$$

Структурна схема асинхронного електропривода із частотним керуванням представлена на рис.3.6

Аперіодичний фільтр використовується для забезпечення плавності пуску (T_f - постійна часу фільтра). ФП - функціональний перетворювач реалізує один із законів $\frac{U_1}{f_1} = \frac{U_{1H}}{f_{1H}} = \text{const}$, $\frac{U_1}{f_1^2} = \frac{U_{1H}}{f_{1H}^2} = \text{const}$, $\frac{U_1}{\sqrt{f_1}} = \frac{U_{1H}}{\sqrt{f_{1H}}} = \text{const}$.

Передатна функція перетворювача частоти (ПЧ) може бути представлена у вигляді:

$$W_{\text{ПЧ}}(p) = \frac{k_{\text{ПЧ}}}{T_\mu p + 1} = \frac{5}{0,01p + 1}, \quad (3.29)$$

$T_\mu = 0.01$ с - постійна часу ПЧ (для реальних систем: $T_\mu = 0,008 - 0,01$ с).

У САК насосними установками регулювання здійснюється по напору. Отже, коефіцієнт підсилення насоса буде дорівнює (3.30):

$$k_{\text{нас}} = k_2 = \frac{H_H}{\omega_H^2}. \quad (3.30)$$

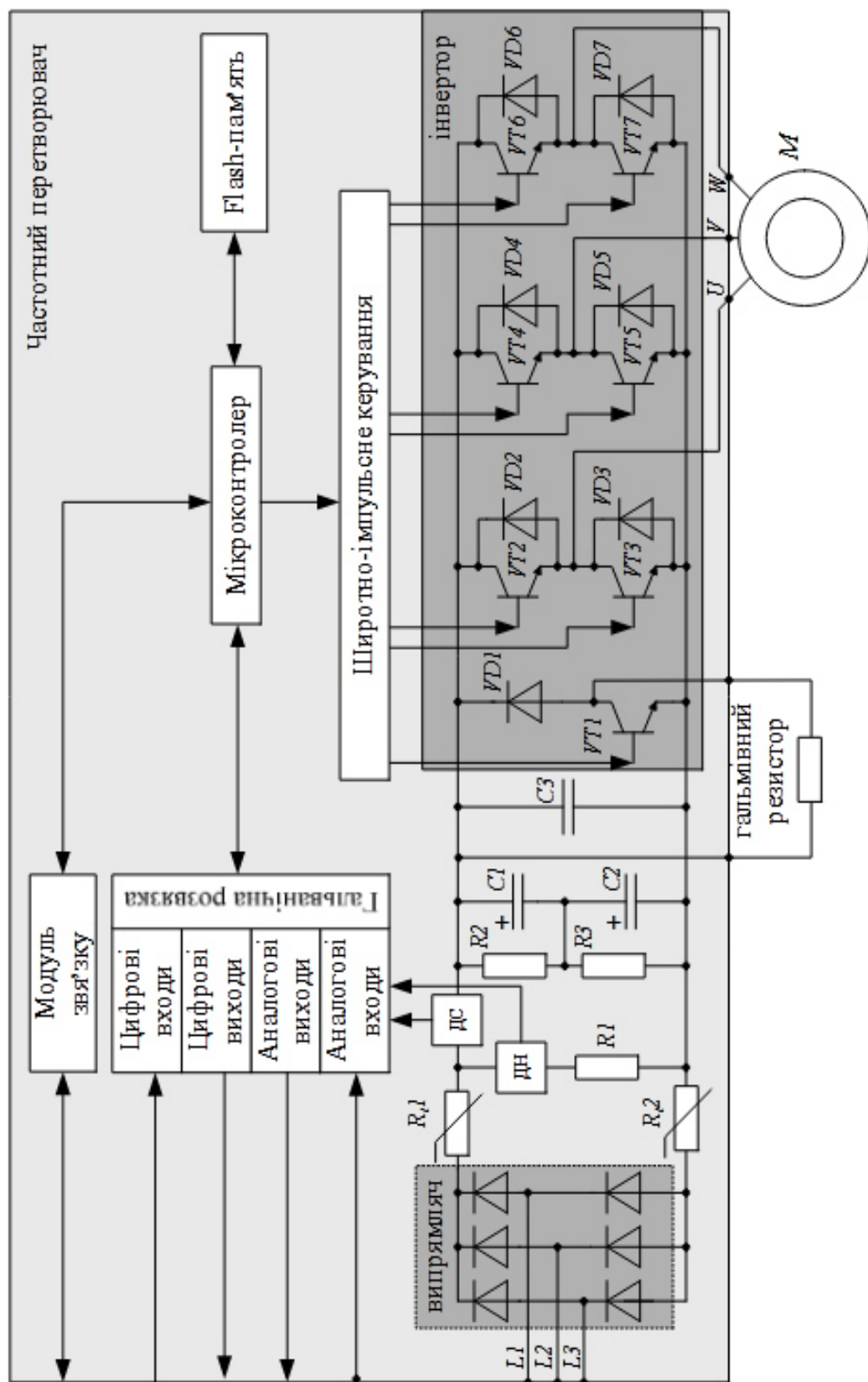


Рисунок 3.6 – Структурна схема асинхронного електропривода із частотним керуванням

Для настроювання регуляторів системи керування буде використовуватися лінеризована модель перетворювача (рис. 3.7):

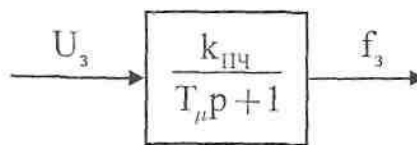


Рисунок 3.7 – Лінеризованна модель перетворювача частоти

Тоді структурна схема САК насосної установки буде мати вигляд показаний на рис. 3.8.

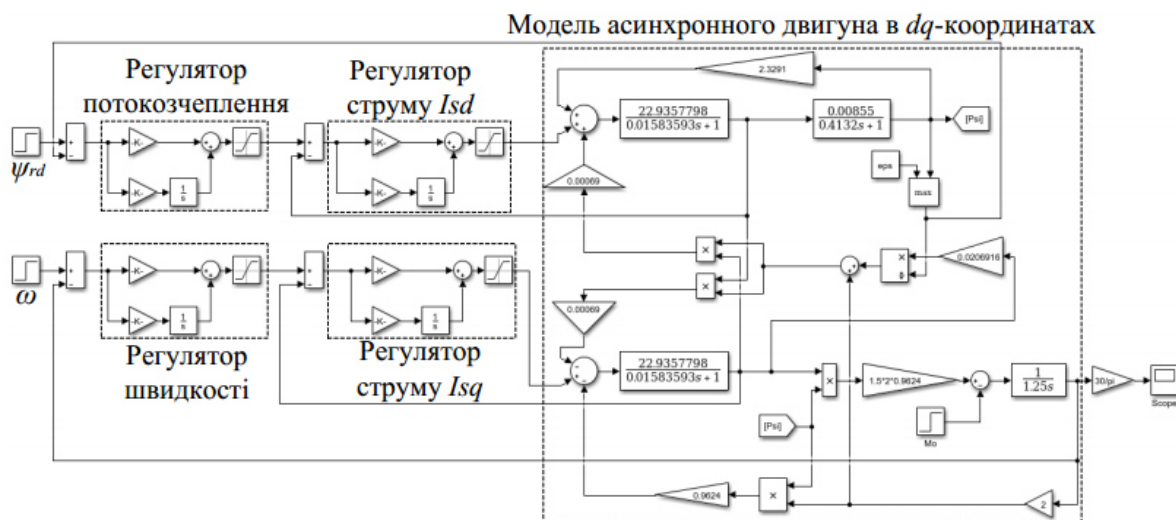


Рисунок 3.8 – Модель системи векторного керування

K_{33} - коефіцієнт зворотного зв'язку по тиску.

$$K_{33} = \frac{U_3}{H_H}. \quad (3.31)$$

Номінальна швидкість ідеального холостого ходу:

$$\omega_{0H} = \frac{2\pi f_{1H}}{p} = \frac{2 \cdot 3.14 \cdot 50}{30} = 104.72 \frac{\text{рад}}{\text{с}} \text{ або}$$

$$\omega_{0H} = \frac{\pi n_H}{30} = \frac{3.1416 \cdot 1000}{30} = 104.72 \frac{\text{рад}}{\text{с}},$$

де $p=3$ - число пар полюсів обмотки статора;

$n_H = 1000$ об/хв - номінальна швидкість ідеального холостого ходу.

Коефіцієнт передачі двигуна:

$$k_D = \frac{2\pi}{P_H} = \frac{2 \cdot 3,14}{3} = 2,093 ; \quad (3.32)$$

Номінальна швидкість двигуна:

$$\omega_H = \omega_{0H} \cdot (1 - S_H) = 104.72 \cdot (1 - 0.018) = 102.84 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$$

де $S_H = 0.018$ - номінальне ковзання;

Номінальний момент двигуна:

$$M_H = \frac{P_H}{\omega_H} = \frac{90000}{102.84} = 875.15 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (3.33)$$

Модуль статичної твердості:

$$\beta = \frac{M_H}{\omega_{0H} - \omega_H} = \frac{875.15}{104.72 - 102.84} = 465.5 \quad (3.34)$$

Електромагнітна постійна часу двигуна:

$$T_E = \frac{1}{\omega_{0C} \cdot S_{KH}} = \frac{1}{314.159 \cdot 0.083} = 0.03835 \text{ с}. \quad (3.35)$$

Сумарний момент інерції:

$$J_{\Sigma} = J_{д,р} + 0.5 \cdot J_{д,р} = 3.4 + 0.5 \cdot 3.4 = 5.1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2. \quad (3.36)$$

Електромеханічна постійна часу двигуна:

$$T_M = \frac{J_\Sigma}{\beta} = \frac{5.1}{465.5} = 0.0110 \text{ с}; \quad (3.37)$$

Розрахуємо параметри передавальної функції насоса:

$$k_{\text{нас}} = \frac{H_H}{\omega_H^2} = \frac{38}{102.84^2} = 0.00359, \quad (3.38)$$

де $H_H = 38$ м - номінальний напір;

Коефіцієнт зворотного зв'язку по напору:

$$K_{33} = \frac{U_3}{H_H} = \frac{10}{38} = 0.263; \quad (3.39)$$

Коефіцієнт, що враховує залежність моменту навантаження від швидкості:

$$K_{31} = 2 \cdot \omega_H = 2 \cdot 102.8 = 209.4. \quad (3.40)$$

Залежність моменту навантаження від швидкості насоса має квадратичний вигляд, але для спрощення й, з огляду на, те що швидкість буде змінюватися в невеликих межах, лінеаризуємо механічну характеристику насоса.

$$K_{\text{нав}} = \frac{M_H}{\omega_H} = \frac{875.15}{102.84} = 8.51. \quad (3.41)$$

Розрахунок параметрів динамічної моделі асинхронного двигуна (двофазної моделі АД в координатах статора а-в)

Коефіцієнт розсіювання:

$$\sigma_1 = \frac{L_1 \sigma}{L_M} = \frac{0.000466}{0.0111} = 0.420 ; \quad (3.42)$$

$$\sigma_2 = \frac{L_2 \sigma}{L_M} = \frac{0.000507}{0.0111} = 0.0457 ; \quad (3.43)$$

$$\sigma = 1 - \frac{1}{(1+\sigma_1) \cdot (1+\sigma_2)} = 1 - \frac{1}{(1+0.420) \cdot (1+0.0457)} = 0.9178. \quad (3.44)$$

Параметри динамічної моделі:

$$\alpha = \frac{R_2}{L_2} = \frac{0.02524}{0.01165} = 2.167 ; \quad (3.45)$$

$$\beta = \frac{L_M}{L_2 \cdot \sigma} = \frac{0.0111}{0.01165 \cdot 0.9178} = 1.038 ; \quad (3.46)$$

$$\sigma' = L_1 - \frac{L_M^2}{L_2} = 0.01161 - \frac{0.0111^2}{0.01165} = 0.001034 ; \quad (3.47)$$

$$\gamma = \frac{R_1}{\sigma'} + \alpha \cdot \beta \cdot L_M = \frac{0.0398}{0.001034} + 2.167 \cdot 1.038 \cdot 0.0111 = 38.52 ; \quad (3.48)$$

$$\mu = \frac{3 \cdot p \cdot L_M}{2 \cdot L_2 \cdot J_{д,р}} = \frac{3 \cdot 3 \cdot 0.0111}{2 \cdot 0.01165 \cdot 3.4} = 1.26 . \quad (3.49)$$

3.3 Висновки за розділом

У цьому розділі було виконано повний комплекс розрахунків, необхідних для побудови системи автоматичного керування асинхронним електроприводом циркуляційного насоса та формування його математичної моделі. На основі аналізу принципів частотного керування асинхронним двигуном встановлено закономірності взаємозв'язку між частотою живлення, магнітним потоком, крутним моментом та робочими характеристиками

двигуна. Показано, що підтримання струмо-частотного співвідношення $U_1/f_1 = \text{const}$ є необхідною умовою стабільності магнітного потоку та забезпечення оптимальних енергетичних характеристик електроприводу в широкому діапазоні швидкостей.

Виконано розрахунок параметрів Т-подібної схеми заміщення та визначено всі необхідні величини, що дозволило сформулювати точний математичний опис асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором. На основі рівнянь Кірхгофа та електромагнітних співвідношень отримано повну динамічну модель АД, включаючи рівняння потокозчеплень, струмів та електромагнітного моменту. Це забезпечує можливість моделювання перехідних процесів та подальшої розробки системи регулювання.

Для спрощення подальшого синтезу регуляторів виконано лінеаризацію моделі та представлено двигун у вигляді аперіодичної ланки з відповідними параметрами інерційності. Це дало змогу побудувати структурні схеми електропривода у dq-координатах та визначити передавальні функції, необхідні для проектування системи векторного керування.

Окрему увагу приділено перетворювачу частоти з проміжною ланкою постійного струму, для якого проведено розрахунок коефіцієнтів підсилення та побудовано структурну схему ПЧ у складі електропривода. Встановлено передавальні характеристики інвертора з ШІМ і наведено лінеаризовану модель ПЧ, придатну для використання у контурі частотного регулювання.

У підсумку було сформовано інтегровану структурну модель САК насосної установки, яка включає електродвигун, перетворювач частоти, механічну частину та канал зворотного зв'язку по тиску. Розраховані параметри – номінальний момент, електромагнітна стала часу та коефіцієнти підсилення – забезпечили можливість коректного узгодження всіх елементів системи.

4 ДОСЛІДНИЦЬКА ЧАСТИНА

4.1 Синтез математичної моделі електромеханічної системи для впровадження векторного керування

На основі отриманих параметрів лінеризованих моделей, передавальна функція двигуна буде мати вигляд:

$$W_{\text{дв}}(p) = \frac{k_d}{T_m \cdot T_e \cdot p^2 + \left(T_m + \frac{K_{\text{навл}} \cdot T_e}{\beta}\right) \cdot p + \left(1 + \frac{K_{\text{навл}}}{\beta}\right)}$$

$$= \frac{2.093}{0.001264p^2 + 0.0131p + 1.0183}$$

Передатна функція об'єкта регулювання тиску:

$$W_{\text{ор}}(p) = \frac{k_{\text{пч}} \cdot k_{\text{нас}} \cdot k_d}{(T_{\mu} \cdot p + 1) \cdot \left(T_m \cdot T_e \cdot p^2 + \left(T_m + \frac{K_{\text{нагр}} \cdot T_e}{\beta}\right) \cdot p + \left(1 + \frac{K_{\text{нагр}}}{\beta}\right)\right)} \quad (4.1)$$

Налаштуємо контур тиску на модульний оптимум.

Регулятор швидкості будемо вибирати з наступних міркувань.

Прийmemo, що передатна функція об'єкта регулювання має вигляд:

$$W_{\text{ор}} = \frac{K_1 K_2 K_3 \dots K_n}{\prod_{i=1}^m (1 + T_i p) \cdot \prod_{j=m+1}^n (1 + T_j p)} ; \quad (4.2)$$

де T_1, T_2, T_m - більші постійні часу;

$T_{m+1}, T_{m+2}, \dots, T_n$ - малі постійні часу.

При оптимізації контуру регулювання здійснюється компенсація більших постійних часу. Малі постійні часу незначно позначаються на динамічних властивостях системи, однак, компенсація останніх приводить до

зменшення завадостійкості системи. У цьому випадку оптимізація контуру регулювання зводиться до вибору необхідної передатної функції регулятора, який би забезпечував необхідний рівень динамічних характеристик замкнутого контуру.

$$W_p = \frac{\prod_{i=1}^m (1+T_i p)}{K_1 K_2 K_3 \dots K_n T_0 p}. \quad (4.3)$$

Отже, передавальна функція для ПД - регулятора тиску буде мати вигляд:

$$\begin{aligned} W_{рд}(p) &= \frac{T_M \cdot T_e \cdot p^2 + \left(T_M + \frac{K_{нагр} \cdot T_e}{\beta}\right) \cdot p + \left(1 + \frac{K_{нагр}}{\beta}\right)}{2K_c k_{ос} T_\mu k_{пч} k_{нас} k_{др}} = \frac{0.001264p^2 + 0.0131p + 1.0183}{0.041p} = \\ &= 0.0403p + 0.2927 + \frac{24.83}{p}. \end{aligned} \quad (4.4)$$

Передавальна функція розімкнутої системи з регулятором:

$$W_p(p) = W_{ор}(p)W_{рд}(p) = \frac{1}{2T_\mu p(T_\mu p + 1)}. \quad (4.5)$$

Передавальна функція замкнутої системи:

$$\begin{aligned} W_{зам}(p) &= \frac{1}{1 + \frac{K_{ос}}{2T_\mu p(T_\mu p + 1)}} = \frac{1}{2 \cdot T_\mu^2 \cdot p^2 + 2T_\mu p + K_{ос}} = \\ &= \frac{1}{2 \cdot 10^{-4}p^2 + 0.02p + 0.263}; \end{aligned}$$

Реалізація ПД - регулятора на основі операційних підсилювачів (ОП) виглядає так:

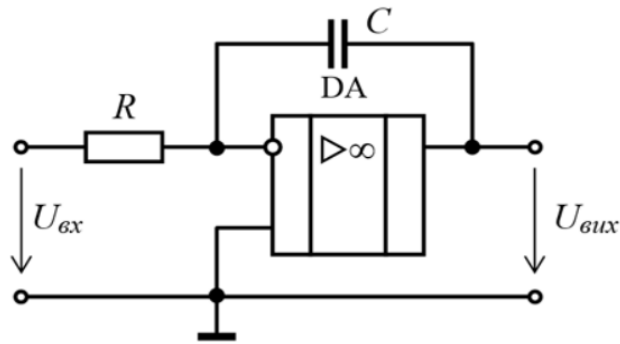


Рисунок 4.1 – Схема електрична принципова ПІД - регулятора

Розрахуємо параметри ПІД – регулятора тиску на базі операційного підсилювача ДО140УД6.

Оскільки $R_1 = R_2, C_1 = C_2$:

$$W_{\text{ПІД}}(p) = \frac{(R_3 C_3 p + 1) \cdot (R_1 C_1 p + 1)}{R_1 C_3 p} = K_{\text{п}} + \frac{1}{T_{\text{ІП}}} + K_{\text{д}} p ; \quad (4.6)$$

$$K_{\text{п}} = \frac{R_3 C_3 + R_1 C_1}{R_1 C_3} = 0.2927;$$

$$T_{\text{І}} = R_1 C_3 = 0.0403 ;$$

$$K_{\text{д}} = R_3 C_1 = \frac{0}{01028} .$$

Приймемо $C_3 = 1 \text{ мкФ}$, тоді $R_1 = \frac{T_{\text{І}}}{C_3} = \frac{4.03 \cdot 10^{-2}}{1 \cdot 10^{-6}} = 403 \cdot 10^4 \text{ Ом} .$

Зі стандартного ряду [12] E24 приймаємо $R = 43 \text{ кОм}$.

З рівняння $C_1^2 R_1 - K_{\text{п}} R_1 C_3 C_1 - K_{\text{д}} C_3 = 0$ знайдемо C_1 :

$$C_1 = 6.57 \cdot 10^{-7} \text{ Ф};$$

Зі стандартного ряду [12] E12 приймаємо $C_1 = 6.8 \cdot 10^{-7} \text{ Ф}$.

Тоді R_3 :

$$R_3 = \frac{K_d}{C_1} = \frac{0.01028}{6.8 \cdot 10^{-7}} = 1.512 \cdot 10^4.$$

Зі стандартного ряду E12 приймаємо $R_3 = 1.8 \cdot 10^4$ Ом.

4.2 Аналіз статичних і динамічних режимів роботи електропривода

Для побудови механічної характеристики двигуна, що використовується в даній дипломній роботі, скористаємося формулою Клосса:

$$M(S) = \frac{2M_K \left(1 + S_K \frac{R_1}{R_2'}\right)}{\frac{S}{S_K} + \frac{S_K}{S} + 2S_K \frac{R_1}{R_2'}}, \quad (4.7)$$

де $M_K = M_{HmK} = 875.15 \cdot 2.2 = 1925$ Н · м - критичний момент;

$$S_K = \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + X_K^2}} = \frac{0.02524}{\sqrt{0.0398^2 + 0.3055^2}} = 0.0819 - \text{критичн ковзання.}$$

Кутова швидкість АД: $\omega(S) = \omega_c(1 - S)$.

Кутова швидкість АД при критичному ковзанні:

$$\omega(S_K) = \omega_c(1 - S_K) = 104.7 \cdot (1 - 0.083) = 96.01 \frac{\text{рад}}{\text{с}}. \quad (4.8)$$

Механічна характеристика даного двигуна буде мати вигляд:

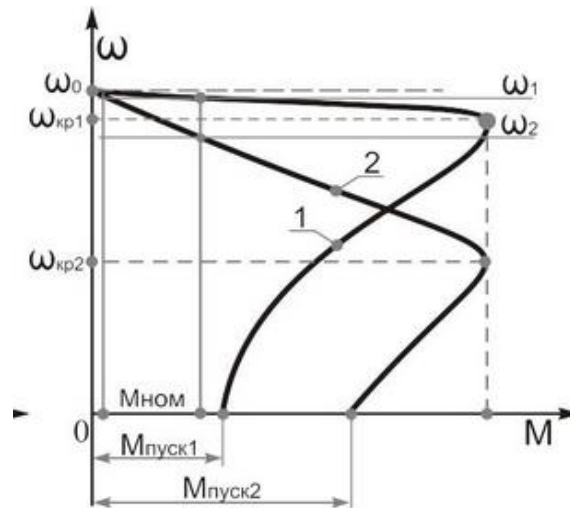


Рисунок 4.2 – Механічні характеристики АД при векторному керуванні: 1 - природна характеристика; 2 – регульовальна характеристика

Для побудови механічної характеристики замкнутої системи, що містить синтезований ПД – регулятор, для цього виведемо рівняння для механічної характеристики. Для цього в структурній схемі приймемо (для статичного режиму $p = 0$).

$$\omega(M) = \frac{-\beta + \sqrt{\beta^2 - 4\beta K_d K_p K_{rd} K_{zz} K_{нас} M + 4\beta^2 K_d^2 K_p^2 K_{rd}^2 K_{zz} K_{нас} U_3}}{2\beta K_d K_p K_{rd} K_{zz} K_{нас}}, \quad (4.9)$$

де $K_{рд}$ - коефіцієнт ПД – регулятора.

Результати імітаційного моделювання математичної моделі АД-ПЧ будуть мати вигляд:

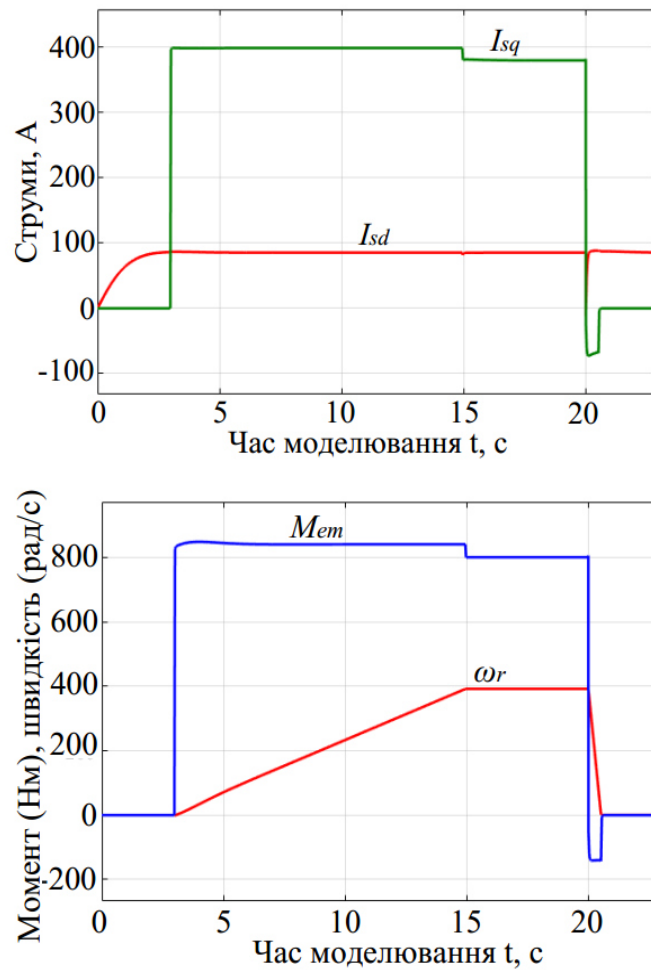


Рисунок 4.3 – Результати імітаційного моделювання математичної моделі АД-ПЧ

З рис. 4.3 видно, що d -вісь струму тримається в значенні 85.38, гарантуючи, що d -вісь потокозчеплення ротора ψ_{rd} залишається постійною при необхідній номінальній величині 0.73. Струм q -вісі безпосередньо регулює крутний момент двигуна і q -вісь потокозчеплення ротора підтримується при значенні практично рівним нулю, для виключення помилок інтегрування [18, 22].

4.3 Математичне моделювання й дослідження статички й динаміки САК

Для моделювання системи керування насосної установки скористаємося додатком SIMULINK пакета прикладного програмного забезпечення MATLAB. Перехідні процеси будемо моделювати за допомогою двох схем: зі спрощеною (лінеризованою) моделлю АД й ПЧ; з двофазною (динамічною) моделлю АД в координатах статора [22].

Моделі складені з окремих блоків. Кожен блок реалізує певний елемент структурної схеми. Модель містить і інші компоненти, призначені для забезпечення працездатності й візуалізації результатів моделювання.

Запропоновано застосовувати нейронні мережі для ідентифікації параметрів та оцінки стану САК. Повний векторний контроль асинхронним електроприводом на основі штучних нейромереж ускладнюється складністю контролера рис. 4.4.



Рисунок 4.4 – Використання нейрорегулятора для керування моделлю асинхронного двигуна

Аналіз динаміки й статички буде здійснюватися в режимах: пуск до номінальної швидкості; робота при номінальних параметрах системи; різке зменшення споживання води (стрибок тиску), $H=2$ м.; різке збільшення споживання води, $H=2$ м.

Слід зазначити той факт, що при реальних умовах роботи пуск насосної установки, зміна тиску в споживчій мережі, не відбувається стрибкоподібно, а досить плавно й довгостроково. Метою даного розділу є дослідження роботи установки в критичних режимах роботи, перевірка правильності вибору компонентів системи.

Моделювання системи керування проводилося на наступному часовому інтервалі:

при $t = 0.1$ с був зроблений пуск двигуна на неробочому ході;

при $t = 0.8$ с зроблена імітація різкого збільшення споживання води (збільшенні тиску);

при $t = 1.4$ с скидання тиску;

при $t = 2$ с кінець досліджень.

У результаті проведеного моделювання отримані криві зміни тиску (напору) води в споживчій мережі (рис. 4.5) і швидкості асинхронного двигуна (рис. 4.6).

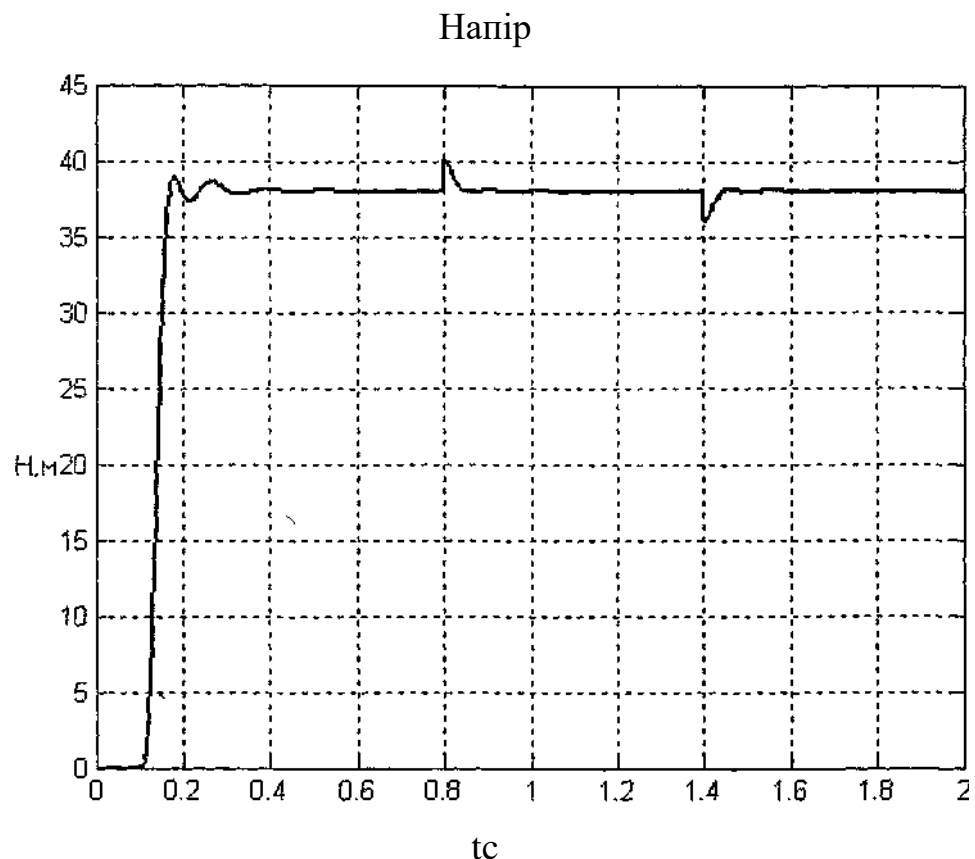


Рисунок 4.5 – Перехідний процес напору води в системі

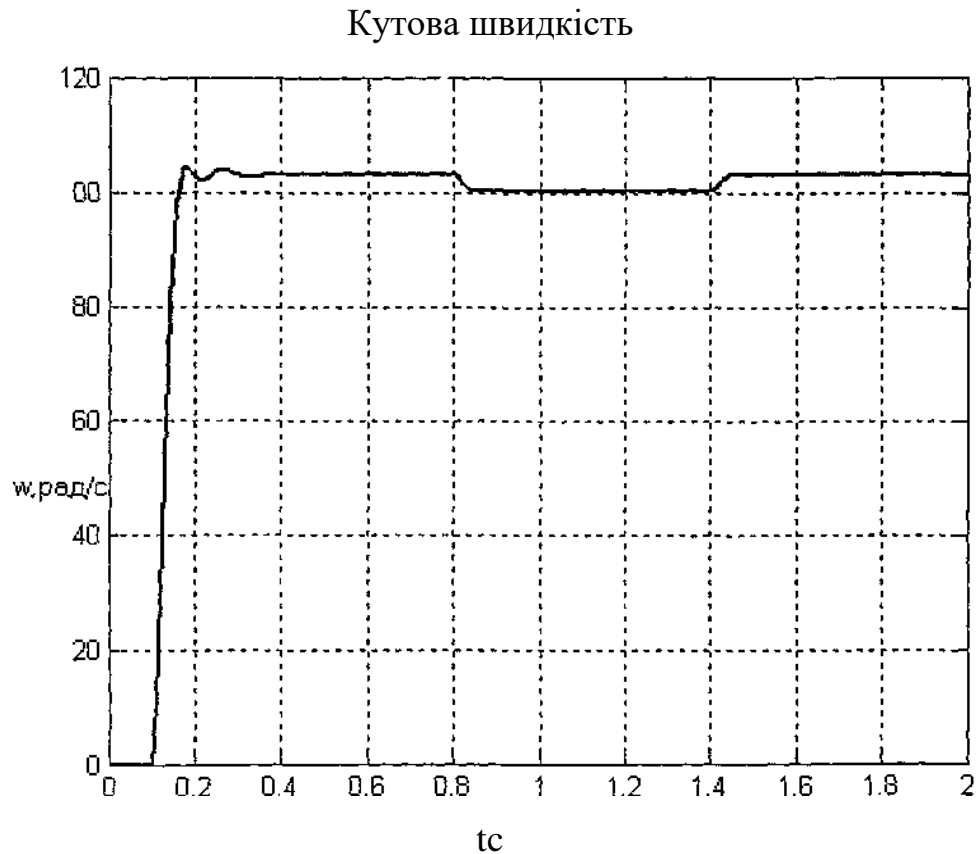


Рисунок 4.6 – Перехідний процес швидкості АД

Визначимо деякі показники якості перехідних процесів:

- час перехідного процесу при пуску $t_{п.п.пуск} = 0,22$ с;
- час перехідного процесу при збільшенні тиску $t_{п.п.збиль.т.} = 0,05$ с;
- час перехідного процесу при скиданні тиску $t_{п.п.скид.} = 0,05$ с.

Перерегулювання в контурі тиску:

$$\sigma = \frac{H_{max} - H_H}{H_H} \cdot 100\%, \quad (4.10)$$

де $H_{max} = 38.9$ м - максимальне значення напору при пуску двигуна.

Тоді:

$$\sigma = \frac{38.9 - 38}{38} \cdot 100\% = 2.37.$$

Статична помилка в контурі тиску:

$$\Delta H = H_H - H_{уст} \text{ або } \Delta H_{\%} = \frac{H_H - H_{уст}}{H_H} \cdot 100\% , \quad (4.11)$$

де $H_{уст}$ - 38 м - стале значення напору після скидання або накидання навантаження.

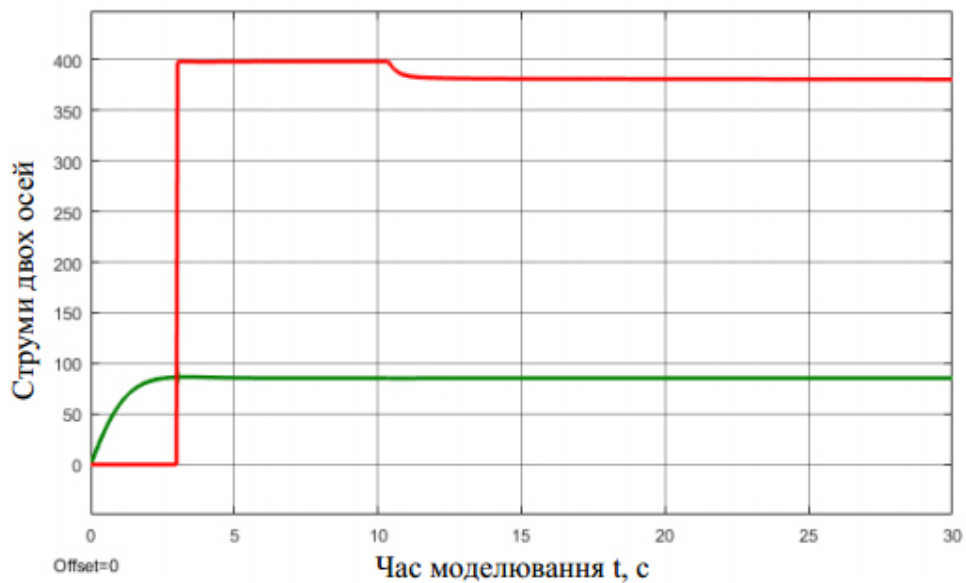
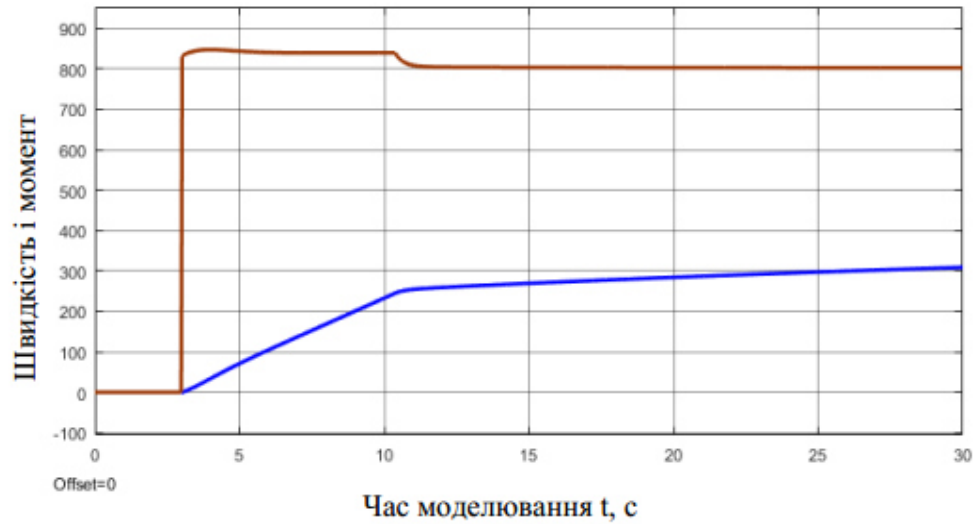


Рисунок 4.7 – Графіки зміни параметрів електропривода від зміни навантаження

Тоді $\Delta H = 38 - 38 = 0$ м або $\Delta H_{\%} = \frac{0}{38} \cdot 100\% = 0\%$.

Перерегулювання при збільшенні або скиданні тиску.

$$\sigma_D = \frac{\Delta N_D}{N_H} \cdot 100\% = \frac{2}{38} \cdot 100\% = 5.26\% . \quad (4.12)$$

Всі отримані параметри перехідних процесів задовольняють технічним вимогам до ЕП.

4.4 Моделювання системи АД-ПЧ із додаванням фільтруючого елементу

Аналіз динаміки й статички буде здійснюватися в режимах

- пуск до номінальної швидкості;
- робота при номінальних параметрах системи;
- різке зменшення споживання води (стрибок тиску), $H=2$ м.;
- різке збільшення споживання води, $H=2$ м.

Моделювання системи керування проводилося на наступному часовому інтервалі:

при $t = 0.1$ с був зроблений пуск двигуна на холостому ході;

при $t = 2$ с зроблена імітація різкого зменшення споживання води (збільшення тиску);

при $t = 3$ с скидання тиску;

при $t = 4$ с кінець досліджень.

У результаті проведеного моделювання отримані криві зміни тиску (напору) води в споживчій мережі (рис.4.9) і швидкості асинхронного двигуна (рис.4.10).

Внаслідок того, що синтез регулятора проводився для спрощеної схеми, що не враховує всіх нелінійностей у двигуні, то графіки перехідних процесів, отримані за допомогою схеми із двофазною моделлю АД, не задовольняють заданим вимогам. Для того, щоб привести графіки перехідних процесів до потрібного виду додамо на вході перетворювача частоти фільтр - аперіодичну ланку 1 -го порядку.

Визначимо деякі показники якості перехідних процесів:

- час перехідного процесу при пуску $t_{п.п. пуск} = 1,0$ с;
- час перехідного процесу при збільшенні тиску $t_{п.п. збіль.т.} = 0,09$ с;
- час перехідного процесу при скиданні тиску $t_{п.п.скид.} = 0,09$ с .

Через те, що в систему доданий фільтр, тривалість перехідних процесів збільшилася.

Перерегулювання в контурі тиску при пуску двигуна:

$$\sigma = \frac{H_{\max} - H_H}{H_H} \cdot 100\% = \frac{38.45 - 38}{38} \cdot 100\% = 1.18\%.$$

Статична помилка в контурі тиску:

$$\Delta H = H_H - H_{уст} \text{ або } \Delta H_{\%} = \frac{H_H - H_{уст}}{H_H} \cdot 100\% ,$$

де $H_{уст} = 38$ м - стає значення напору після скидання або збільшення навантаження.

$$\text{Тоді } \Delta H = 38 - 38 = 0 \text{ м або } \Delta H_{\%} = \frac{0}{38} \cdot 100\% = 0\% .$$

Перерегулювання при збільшення або скиданні тиску:

$$\sigma_d = \frac{\Delta H_d}{H_H} \cdot 100\% = \frac{2}{38} \cdot 100\% = 5.26\% .$$

Всі отримані параметри перехідних процесів задовольняють технічним вимогам до ЕП.

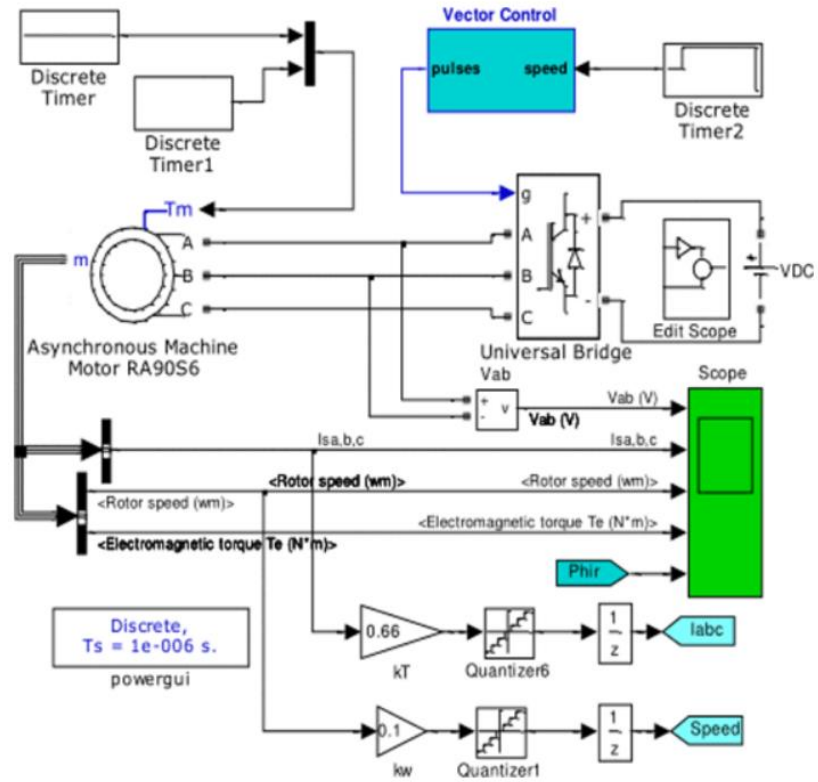


Рисунок 4.8 – Модель системи АД-ПЧ із додаванням фільтруючого елемента в Simulink

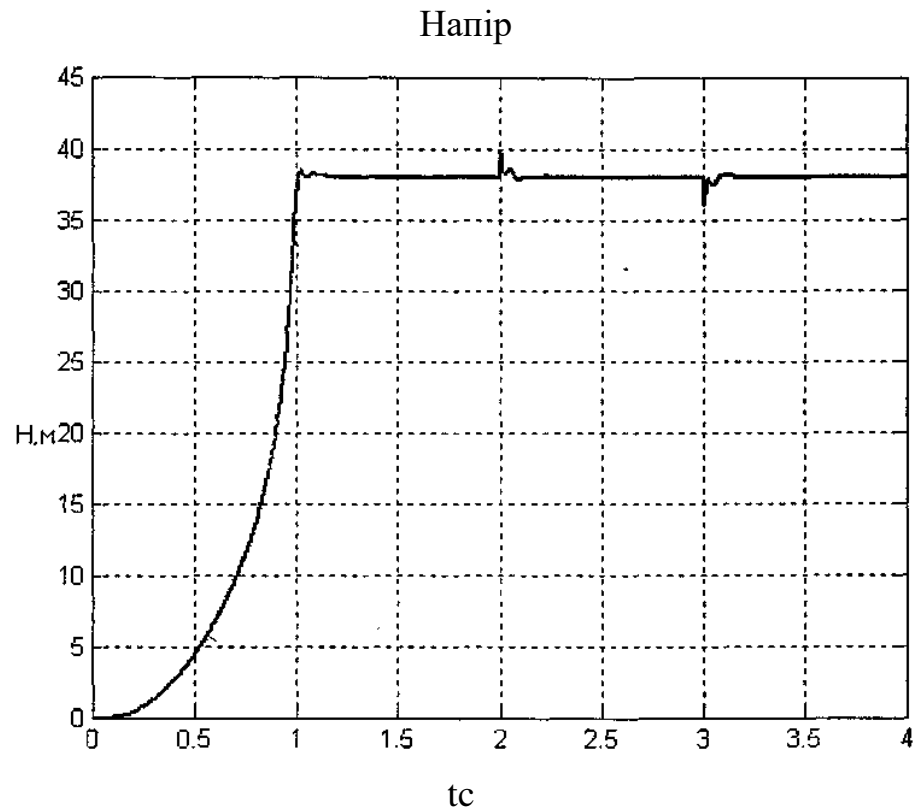


Рисунок 4.9 – Перехідний процес напору води в системі

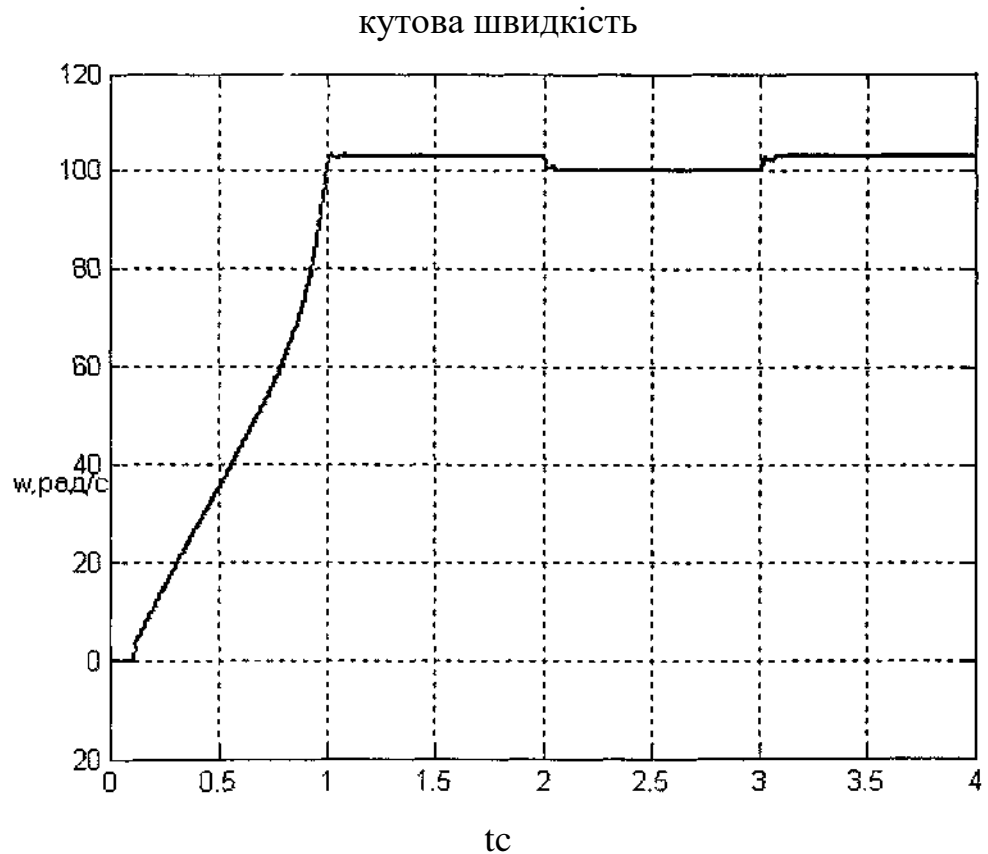


Рисунок 4.10 – Перехідний процес швидкості АД

4.5 Будова та принцип роботи основних функціональних частин частотного електропривода

Електропривод складається з наступних основних функціональних частин: силової частини, системи керування інвертором (СКІ), системи керування гальмівним пристроєм (СКГП).

Спрощена принципова електрична схема силової частини електропривода зображена на рис. 4.11. На схемі наведені позначення:

QF - силовий вимикач автоматичний (пускач);

I- інвертор;

ДС - датчик струму;

ДТ - датчик тиску;

М - асинхронний двигун;

В - випрямляч;

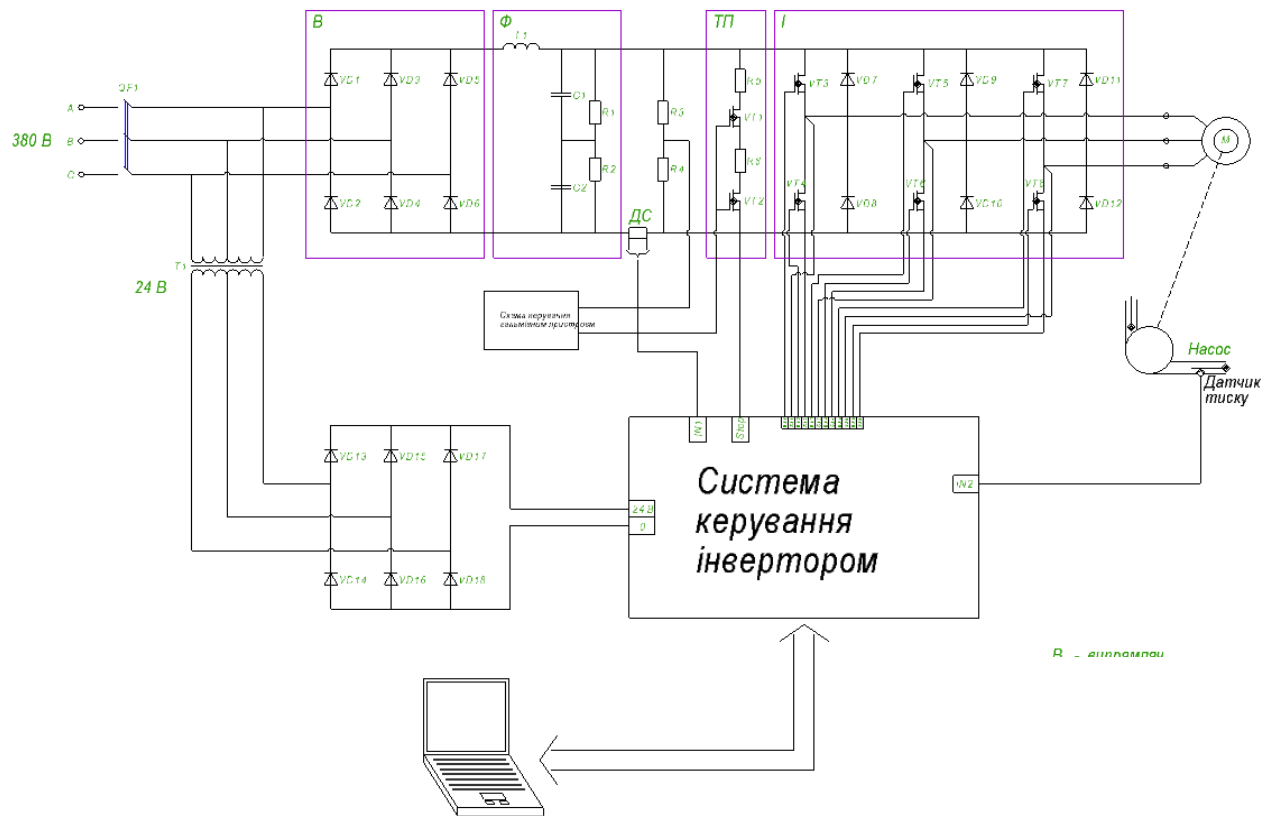


Рисунок 4.11 – Частотно-керований асинхронний електропривод циркуляційного насосу

Ф - силовий LC- фільтр;

Насос - відцентровий насос типу Д;

ГП - гальмовий пристрій.

Силова схема електропривода призначена для перетворення змінної напруги живильної мережі в змінну напругу регульованої частоти й амплітуди. Силова схема містить наступні функціональні вузли: В, Ф, І.

Силовий випрямляч виконаний по трифазній мостовій схемі. До його виходу підключений LC - фільтр (Ф), що виконує функцію згладжування пульсацій випрямленого струму й напруги й струмообмеження в аварійних режимах.

В електроприводі використаний інвертор із ШІМ. Він є найбільш складним вузлом. Завдання інвертора - одержання з постійної напруги регульованої по частоті й діючому значенні трифазної напруги. Регулювання частоти особливої складності не викликає, але для регулювання діючого

значення напруги необхідно застосовувати ШІМ модуляцію, що є складним завданням.

Трифазний IGBT-інвертор перетворює постійну напругу в змінну 380 В, що надходить на обмотки статора трифазного асинхронного двигуна. Інвертор складається із трьох напівмостів і гальмового пристрою. На резистори R5 і R6 відбувається «зливання» енергії, що виходить у результаті частотного гальмування двигуна.

Керування силовими ключами інвертора здійснює по певному алгоритмі спеціальний керуючий контролер - схема керування. Алгоритм керування не тільки реалізовує функцію регуляції частоти й діючого значення вихідної напруги, але й реалізацію захисту силових ключів від перевантажень і КЗ.

В схемі використовується мікроконтролер Atmega 32. Він реалізовує всі необхідні функції по спеціально розробленій програмі. Мікроконтролер живиться напругою +5 В від внутрішнього джерела живлення, побудованого на мікросхемі Uс2843. Принцип дії схеми живлення наступний (рис. 4.12):

Мікросхема керування Uс2843 подає послідовність ШІМ сигналів на керований MOSFET транзистор Vt1. Вхідна напруга живлення U_{VX} подається на послідовно з'єднаних первинну обмотку w1 трансформатора T1 і ключ, реалізований на транзисторі Vt1. Схема керування Dal подає на затвор МОП - транзистора керуючі імпульси, величина яких достатня для надійного відкриття транзистора Vt1. У період відкритого стану t_V транзистора на обмотці w1 і конденсаторі 31 існує постійна напруга U_{VX}.

На вторинних обмотках w2 - w6 трансформатори T1 протягом часу t_V відкритого стану транзистора Vt1 існує таке ж за формою напруга, що має величину відповідно до коефіцієнта трансформації. Вхідні діоди Vd2 - Vd6 закриті негативною напругою, що надходить із обмоток w2 - w6.

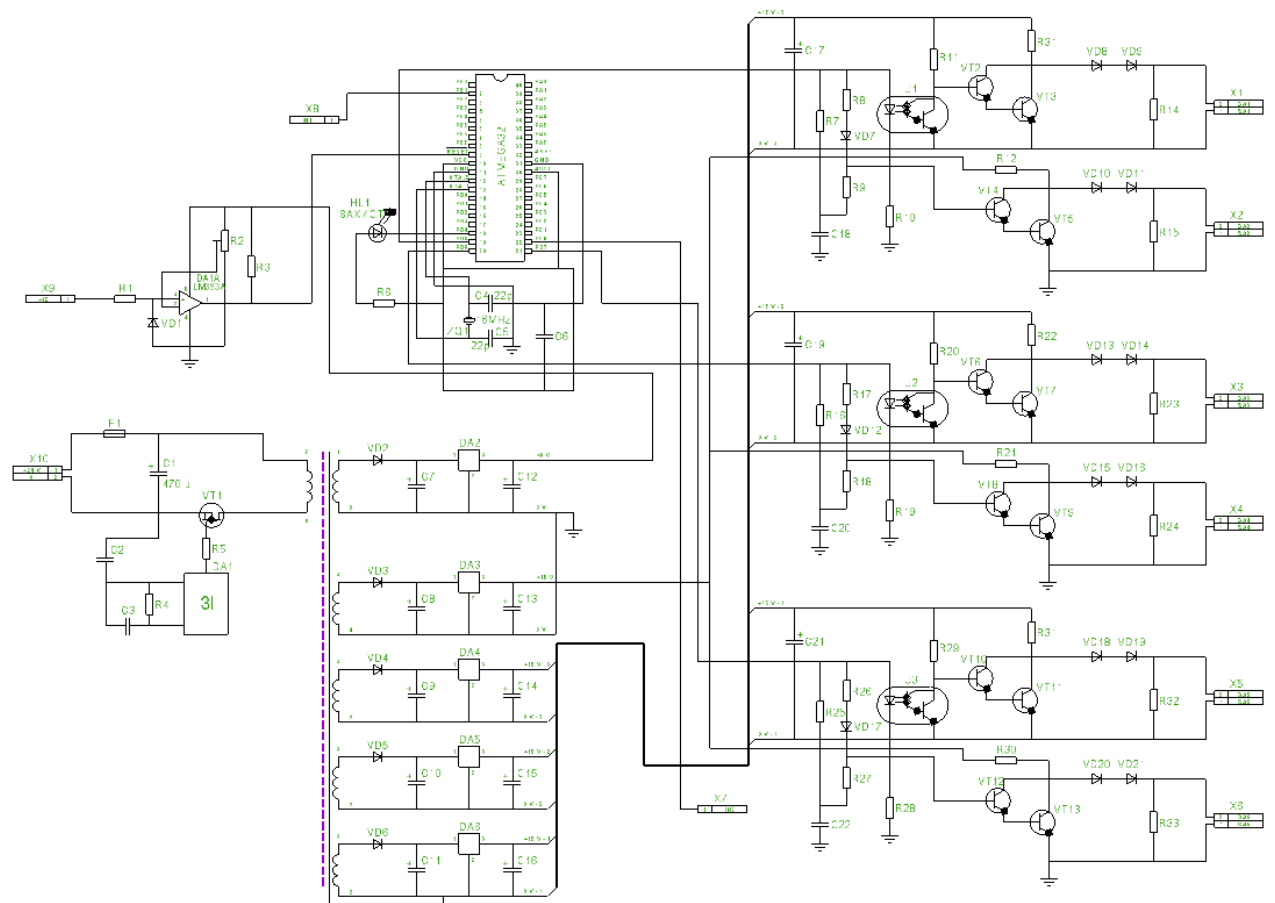


Рисунок 4.12 – Схема керування інвертором

У відповідності з формулою для індуктивності, струм через індуктивність обмотки w_1 за цей час tB лінійно наростає. Тому що передача енергії в навантаження не відбувається (закритий вхідний діод), те в індуктивності обмотки w_1 накопичується енергія $W = L_1 \cdot I^2 / 2$

При вимиканні транзистора $Vt1$ під час tB вимикання й спад струму через транзистор $Vt1$ відбуваються «миттєво», розряджається до нуля конденсатор 31, тому що в цей момент часу він віддає великий робочий струм обмотці w_1 (тобто короткочасно виконує роль джерела вхідної напруги). Але тому що струм в індуктивності миттєво зникнути не може, то він майже миттєво перезаряджає конденсатор $C1$ у протилежній полярності до напруги $U_{вих}$. При цьому через появу на обмотках $w_2 - w_6$ напруги із протилежною полярністю, миттєво відкриваються діоди $Vd2 - Vd6$. У

результаті обмотки w_2 - w_6 через діоди Vd_2 - Vd_6 приєднуються до конденсаторів відповідно C_7 , тобто до навантаження.

Накопичена в w_1 енергія практично нікуди не витратилася, вона з моменту часу t_B починає витрачатися на заряд конденсаторів і на живлення навантаження у вигляді спадаючого струму обмоток w_2 - w_6 .

Схема захисту побудована на компараторі Da_1 й тригері Dd_1 і працює в такий спосіб: напруга з датчика струму через захисну ланку R_1 - vd_1 попадає на вхід компаратора Da_1 . Коли напруга з датчика струму перевищить граничне значення, компаратор спрацює й переведе мікроконтролер у стан скидання.

4.6 Синтез дискретного ПІД-регулятора у додатку SIMULINK

Для моделювання системи керування насосної установки скористаємося додатком SIMULINK пакета прикладного програмного забезпечення MATLAB [22]. Структурна схема в додатку SIMULINK буде мати вигляд, зображений на рис. 4.13.

$$W_p(p) = \frac{K_{\text{п}}p + K_{\text{и}} + K_{\text{д}}p^2}{p} = \frac{(0.001264 \cdot p^2 + 0.0131 \cdot p + 1.0183)}{0.041 \cdot p}$$

Для визначення цифрового регулятора швидкості методом аналогового прототипу необхідно знайти дискретну передавальну функцію цифрового регулятора з урахуванням фіксатора нульового порядку.

Передавальна функція об'єкта регулювання має вигляд:

$$\begin{aligned} W_{\text{оп}}(p) &= \frac{k_c k_{\text{ос}} k_{\text{пч}} k_{\text{нас}} k_{\text{д}}}{(T_{\mu}p + 1) \cdot \left[T_{\text{м}} T_{\text{е}} p^2 \left(T_{\text{м}} + \frac{K_{\text{нагр}} T_{\text{е}}}{\beta} \right) p + \left(1 + \frac{K_{\text{нагр}}}{\beta} \right) \right]} \\ &= \frac{209.4 \cdot 0.263 \cdot 5 \cdot 0.00359 \cdot 2.093}{(0.01p + 1) \cdot \left[0.011 \cdot 0.03835 p^2 + \left(0.011 + \frac{8.51 \cdot 0.03835}{465.5} \right) p + \left(1 + \frac{8.51}{465.5} \right) \right]} \\ &= \frac{2.07}{4.22 \cdot 10^{-6} p^3 + 5.39 \cdot 10^{-4} p^2 + 2.19 \cdot 10^{-2} p + 1.018} \end{aligned}$$

Здійснивши заміну $p = j\omega$, одержимо:

$$\begin{aligned} W_{\text{оп}}(p) &= \frac{2.07}{4.22 \cdot 10^{-6} (j\omega)^3 + 5.39 \cdot 10^{-4} (j\omega)^2 + 2.19 \cdot 10^{-2} (j\omega) + 1.018} = \\ &= \frac{2.07}{-4.22 \cdot 10^{-6} j\omega^3 - 5.39 \cdot 10^{-4} j\omega^2 + 2.19 \cdot 10^{-2} j\omega + 1.018} = \\ &= \frac{2.07}{(1.018 - 5.39 \cdot 10^{-4} \omega^2) - j(4.22 \cdot 10^{-6} \omega^3 - 2.19 \cdot 10^{-2} \omega)} \end{aligned}$$

У результаті перетворень одержимо:

$$W_{\text{оп}}(p) = \frac{2.07 \cdot (1.018 - 5.39 \cdot 10^{-4} \omega^2 + j(4.22 \cdot 10^{-6} \omega^3 - 2.19 \cdot 10^{-2} \omega))}{(1.018 - 5.39 \cdot 10^{-4} \omega^2)^2 + (4.22 \cdot 10^{-6} \omega^3 - 2.19 \cdot 10^{-2} \omega)^2}$$

Амплітудно-частотна характеристика має наступну залежність:

$$A(\omega) = \sqrt{U^2(\omega) + V^2(\omega)},$$

$$\text{де } U(\omega) = \frac{2.07 \cdot (1.018 - 5.39 \cdot 10^{-4} \omega^2)}{(1.018 - 5.39 \cdot 10^{-4} \omega^2)^2 + (4.22 \cdot 10^{-6} \omega^3 - 2.19 \cdot 10^{-2} \omega)^2};$$

$$V(\omega) = \frac{2.07 \cdot (4.22 \cdot 10^{-6} \omega^3 - 2.19 \cdot 10^{-2} \omega)}{(1.018 - 5.39 \cdot 10^{-4} \omega^2)^2 + (4.22 \cdot 10^{-6} \omega^3 - 2.19 \cdot 10^{-2} \omega)^2}.$$

Використовуючи теорему Котельникова-Шеннона, одержимо:

$$A(\omega) = 0.1, \omega_{\text{нп}} = 165.4 \frac{\text{рад}}{\text{с}},$$

$$\text{Розрахуємо такт квантування: } T_0 = \frac{\pi}{3 \cdot 165.4} = 0.00633 \text{ с.}$$

Розрахований такт квантування є максимальним. При моделюванні приймаємо $T_0 = 1 \text{ мс}$.

Запишемо дискретну передавальну функцію з урахуванням фіксатора нульового порядку.

$$\begin{aligned} W_{\text{п}}(z) &= \frac{z-1}{T_0 \cdot z} + K_{\text{п}} + \frac{T_0 \cdot z}{z-1} = \frac{(z-1)^2 + K_{\text{п}} \cdot T_0 \cdot z \cdot (z-1) + (T_0 \cdot z)^2}{T_0 \cdot z \cdot (z-1)} \\ &= \frac{z^2(1 + K_{\text{п}} \cdot T_0 + T_0^2) - z(2 + K_{\text{п}} \cdot T_0) + 1}{T_0 \cdot z \cdot (z-1)} \\ &= \frac{1000.3 - 2000.3 + 1000}{z^2 - z} \end{aligned}$$

Аналіз динаміки й статички буде виконуватись в режимах:

- пуск системи;
- робота при номінальних параметрах системи;
- відпрацьовування стрибка завдання;
- різке зменшення споживання води (стрибок тиску), $H=2\text{м}$;

Слід зазначити той факт, що при реальних умовах роботи пуск насосної установки, зміна тиску в споживчій мережі, не відбувається стрибкоподібно, а досить плавно й довгостроково. Метою даного розділу є дослідження

роботи установки в критичних режимах роботи, перевірка правильності вибору компонентів системи.

Моделювання системи керування проводилося на наступному часовому інтервалі:

при $t = 0,1$ с, був зроблений пуск двигуна;

при $t = 0,8$ с, зроблена імітація стрибка завдання; різкого збільшення споживання води (зниження тиску);

при $t = 1,4$ с, різкого зменшення споживання води (збільшення тиску);

при $t = 2$ с, кінець досліджень.

У результаті проведеного моделювання отримані криві зміни тиску (напору) води в споживчій мережі (рис. 4.14) і швидкості асинхронного двигуна (рис. 4.15).

Для наочності на рисунках представлені також графіки зміни напору й швидкості при аналоговому регуляторі.

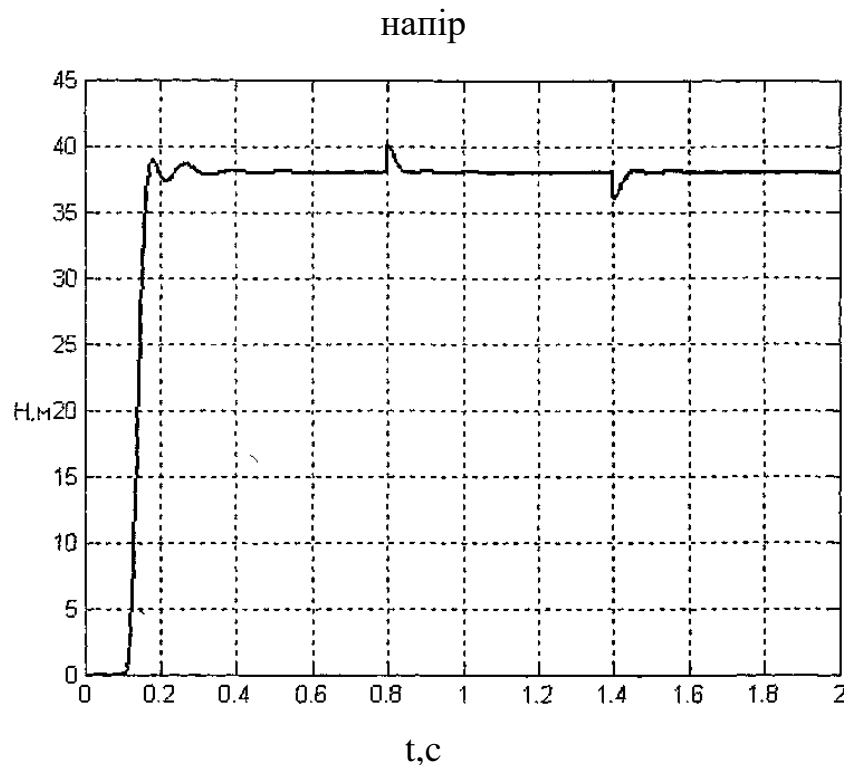


Рисунок 4.14 – Перехідні процеси зміни напору
кутова швидкість

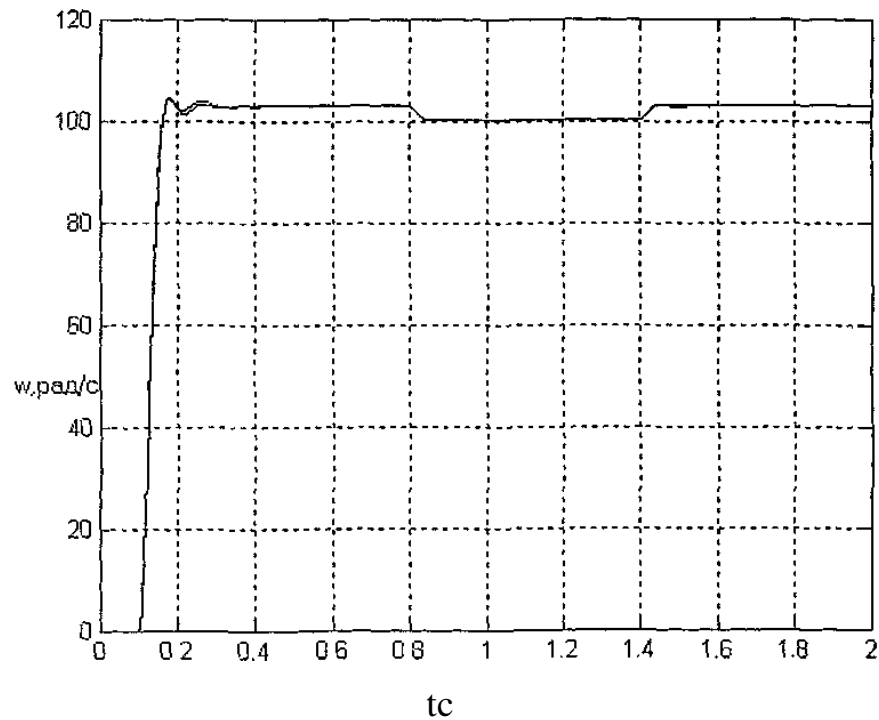


Рисунок 4.15 – Перехідні процеси зміни швидкості двигуна

Визначимо деякі показники якості перехідних процесів: Час перехідного процесу - проміжок часу від початку перехідного процесу й до моменту досягнення 5% відхилення від сталої величини.

- час перехідного процесу при пуску $t_{\text{пп.пуск}} = 0,22 \text{ с.};$
- час перехідного процесу при стрибку завдання $t_{\text{пп.ск.зд}} = 0,05 \text{ с.};$
- час перехідного процесу при збільшенні навантаження $t_{\text{пп.збіль.д}} = 0,05 \text{ с.};$

Перерегулювання в контурі тиску при пуску:

$$\sigma = \frac{H_{\text{max}} - H_{\text{н}}}{H_{\text{н}}} \cdot 100\% = \frac{39.3 - 38}{38} = 34.2$$

де $H_{\text{max}} = 39.3 \text{ м}$ - максимальне значення напору при пуску двигуна;

$H_{\text{н}} = 38 \text{ м}$ - значення завдання напору на певному відрізку часу (від 0 до 0,8 с).

Статична помилка в контурі тиску:

$$\Delta H = H_{\text{н}} - H_{\text{уст}}$$

де $H_{\text{уст}} = 38 \text{ м}$ - сталі значення напору після скидання або накидання навантаження (від 1,4 до 2с).

Тоді:

$$\Delta H = 38 - 38 = 0$$

Перерегулювання при накиданню або скиданні тиску:

$$\sigma_d = \frac{\Delta H_d}{H_n} \cdot 100\% = \frac{2}{38} \cdot 100\% = 5.26\%$$

Всі отримані параметри перехідних процесів задовольняють технічним вимогам до ЕП.

4.7 Опис системи частотного регулювання електропривода циркуляційного насосу на базі

Розглянемо систему автоматизації насосної станції, призначеної для водопостачання. Функціональна схема насосної станції показана на рис. 4.16.

Насосна станція працює таким чином. Холодна вода з фільтруючої станції заздалегідь нагрівається в теплообміннику 1 поступає на насосну станцію. З виходу насосної станції вода поступає в теплообмінник 2, де остаточно нагрівається, після чого йде далі на потреби тепло- і водопостачання житлових будівель.

Підтримка постійності тиску при витраті, що змінюється, на станції гарячої води здійснюється байпасним способом. Інформація про поточне значення тиску в напірній частині водопроводу поступає з датчика тиску P1, розташованого на виході насосної станції.

На насосній станції знаходяться три відцентрові насоси Н1...Н3 типу ЦН-150-16.5. Приводними двигунами насосів є двигуни М1 ... М3 серії 4А28084УЗ. Із сторони всмоктуючого і нагнітаючого патрубків насосів, а також на байпасній трубі розташовані засувки В1...В4, що приводяться в рух від двигунів М4...М7 серії 4А180М8УЗ.

Засувки В5...В7 є ручними. В напірній частині водопроводу знаходяться неозвратно-запорные клапани Х1...Х3.

Система управління насосної станції працює в автоматичному і ручному режимах. Перемикання режимів здійснюється з пульта управління.

У автоматичному режимі регулювання тиску здійснюється контроллером PLC. Поточне значення тиску в напірній частині водопроводу поступає від давця тиску P1. Відповідно до значення тиску, що поступило, контроллер дає завдання на перетворювач частоти U2 і підключає його до одного з трьох насосів. Одночасно можуть працювати два насоси, один з насосів знаходиться в резерві (він вибирається на пультах управління). Контроллер управляє всією електроавтоматикою, відкриває і закриває необхідні засувки. В режимі пуску системи контроллер перевіряє наявність тиску у всмоктуючій частині водопроводу за допомогою датчика тиску P2.

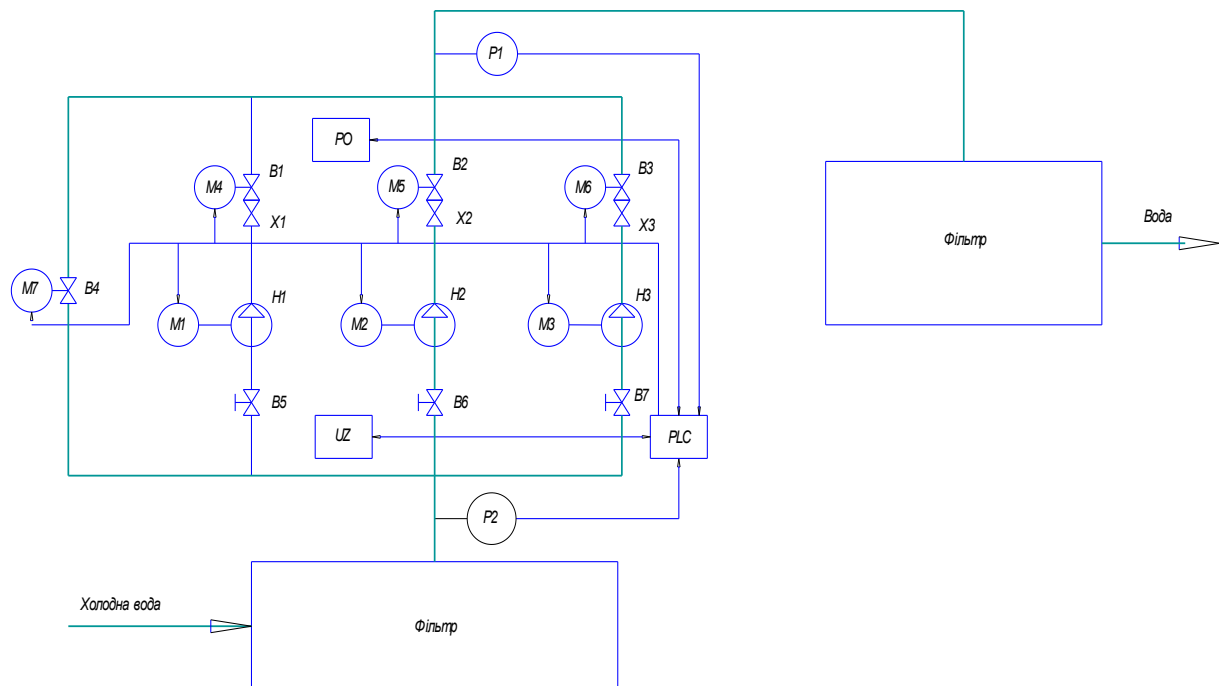


Рисунок 4.16 – Функціональна схема насосної станції

В ручному режимі станція управляється з поста оператора РО, куди поступає інформація про режим роботи станції, про аварію в системі, про працюючі насоси і стан засувки (відкрите або закрито).

У СК як програмований контролер застосовують контролер Omron CQM1 з наступними модулями: джерело живлення CQM1-PA206; процесорний модуль CQM1-CPU41-E (у процесорний модуль вбудовано 16 релейних входів, на які поступають сигнали про автоматичний режим роботи агрегатів); модуль аналогового введення CQM1-AD041 (чотири входи; на модуль аналогового введення поступають сигнали від датчиків тиску); модуль аналогового висновку CQM1-DA021 (два висновки, використовується один висновок – від модуля йде сигнал на вхід завдання частоти перетворювача частоти); модуль живлення аналогових пристроїв CQM1-IP502; два модулі дискретного введення CQM1-ID211; два модулі дискретного висновку COM 1-0S222.

У даній системі управління використовуються приводи AV-300 фірми «General Electric» з перетворювачем частоти AV-300 6KAV3110XB1 з режимом змінного моменту. Потужність перетворювача 110 кВт, вихідний струм 210 А, напруга живлення 380 В.

Принципова електрична схема силової частини системи управління насосами зображена на рис.4.17.

Живлення шафи з електроустаткуванням здійснюється з зовнішньої сторони підведенням до клем А, В, З клемника ХТ1 трьох фаз напруги 380 В частотою 50 Гц, нульового дроту до клеми РЕ і дроту заземлення до клеми G. Клеми А, В і С підключаються до силового автоматичного вимикача QS1.

Індикація наявності напруги усередині електрошафи здійснюється за допомогою лампи HL1, підключеної до однієї з фаз живлячої напруги за силовим автоматичним вимикачем QS1. Вона сигналізує обслуговуючому персоналу про те, що внутрішні ланцюги електрошафи знаходяться під напругою.

Перетворювач частоти (ПЧ) UZ підключений до електричної мережі через автоматичний вимикач Q1. Вхідний реактор L1 захищає перетворювач від комутаційних надструмів. Вихідний реактор L2

обмежує вихідні струми місткостей перетворювача і списа напруги на двигуні, обумовлені розподіленою потужністю кабелю.

Перетворювач частоти може підключатися до одного з трьох електродвигунів за допомогою вихідних клем (X1Y1Z1, X2Y2Z2, X3Y3Z3) клемника XT2 і контакторів K4...K6 відповідно. Можливе підключення електродвигунів безпосередньо до мережі через автоматичні вимикачі Q2...Q4 і за допомогою контакторів K1...K3.

Вибір режиму роботи (ручного або автоматичного) здійснюється оператором насосної станції з поста оператора. Для пуску або зупинки системи в автоматичному режимі або висновку СК з аварійного режиму використовуються кнопки «Пуск» або «Стоп». Постійно в роботі можуть знаходитися один або два насоси, третій насос є резервним (профілактичний огляд, плановий ремонт). Резервний насос вибирають положенням перемикача на посту оператора. Після вибору резервного насоса в автоматичному режимі закривається засувка, що знаходиться в напірній частині водопроводу цього насоса, дві інші засувки відкрито. В автоматичному режимі закрита засувка байпасної труби, вона відкрита тільки при ручному регулюванні.

Автоматичний режим показаний в структурній схемі алгоритму (рис.4.18). Тиск на виході з насосної станції знаходиться в заданих межах $p-x \leq p_{\text{тек}} \leq p+x$, де x – допустимий діапазон зміни тиску.

У цьому випадку СК перевіряє чи виробив насос добовий моторесурс, і якщо так, то проводить перемикання між насосами.

Якщо тиск менше норми, СК перевіряє число працюючих насосів. Якщо працює один насос, то робиться перевірка роботи ПЧ на максимальній частоті. Якщо ні, то дається команда на збільшення його частоти, інакше відбувається перемикання насоса, що працює від ПЧ, до мережі, а до ПЧ підключається інший насос (до цього не працюючий).

Якщо тиск більше норми $p+x \leq p_{\text{тек}} \leq p_{\text{max}}$, СК перевіряє число працюючих насосів. Якщо працюють два насоси, то робиться перевірка

роботи ПЧ на мінімальній частоті. Якщо ні, то дається команда на зменшення його частоти, інакше відбувається відключення насоса, що працює від ПЧ, а до ПЧ підключається насос, що працює від мережі.

Якщо тиск менше мінімальний допустимого $p_{\text{тек}} \leq p_{\text{мін}}$ СК перевіряє чи знаходиться який-небудь насос в роботі. Якщо ні, то СК здійснює пуск того насоса (від перетворювача частоти), який напрацював найменший моторесурс. Якщо так, то СК дає завдання на ПЧ на підвищення частоти обертання насоса. Якщо протягом заданого часу тиск на виході насосної станції не перевищує мінімально допустимого, то встановлюється прапор «Аварія» і СК зупиняє роботу насосної станції.

Якщо тиск на виході насосної станції більше максимально можливого значення $p_{\text{тек}} > p_{\text{мін}}$, то СК встановлює прапор «Аварія» і припиняє роботу.

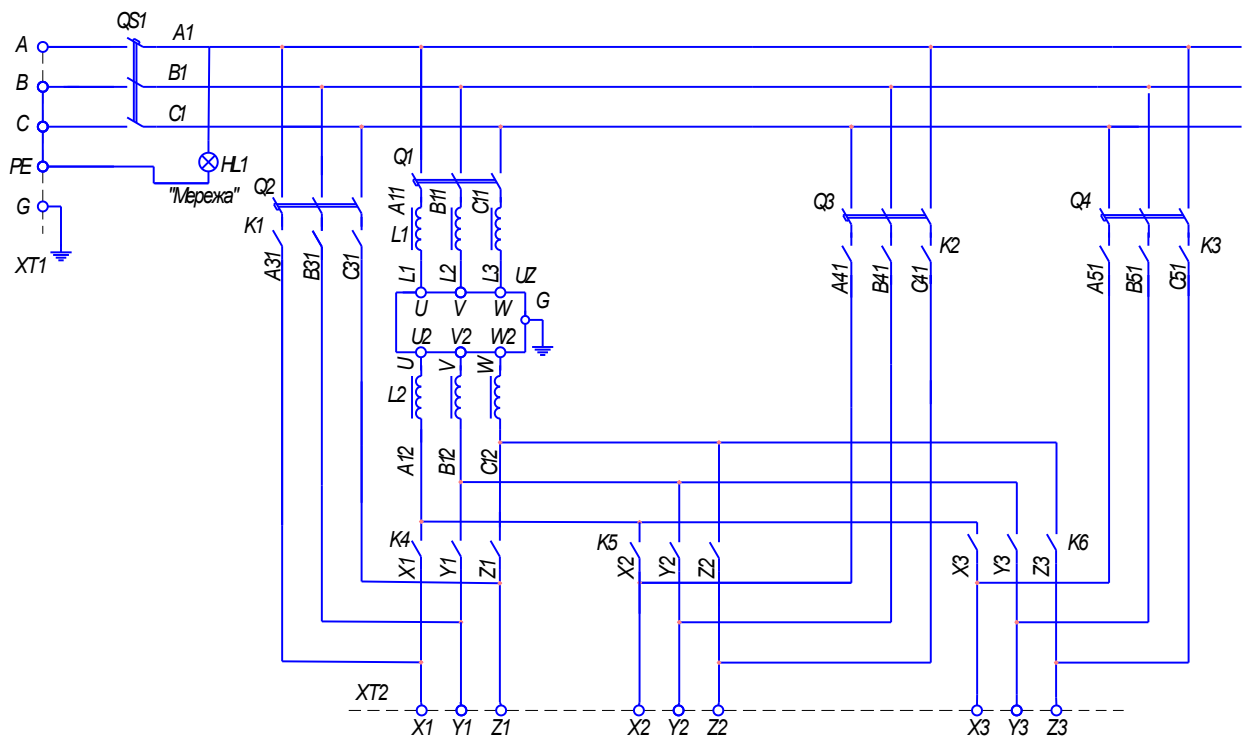


Рисунок 4.17 – Принципова електрична схема силової системи керування насосами

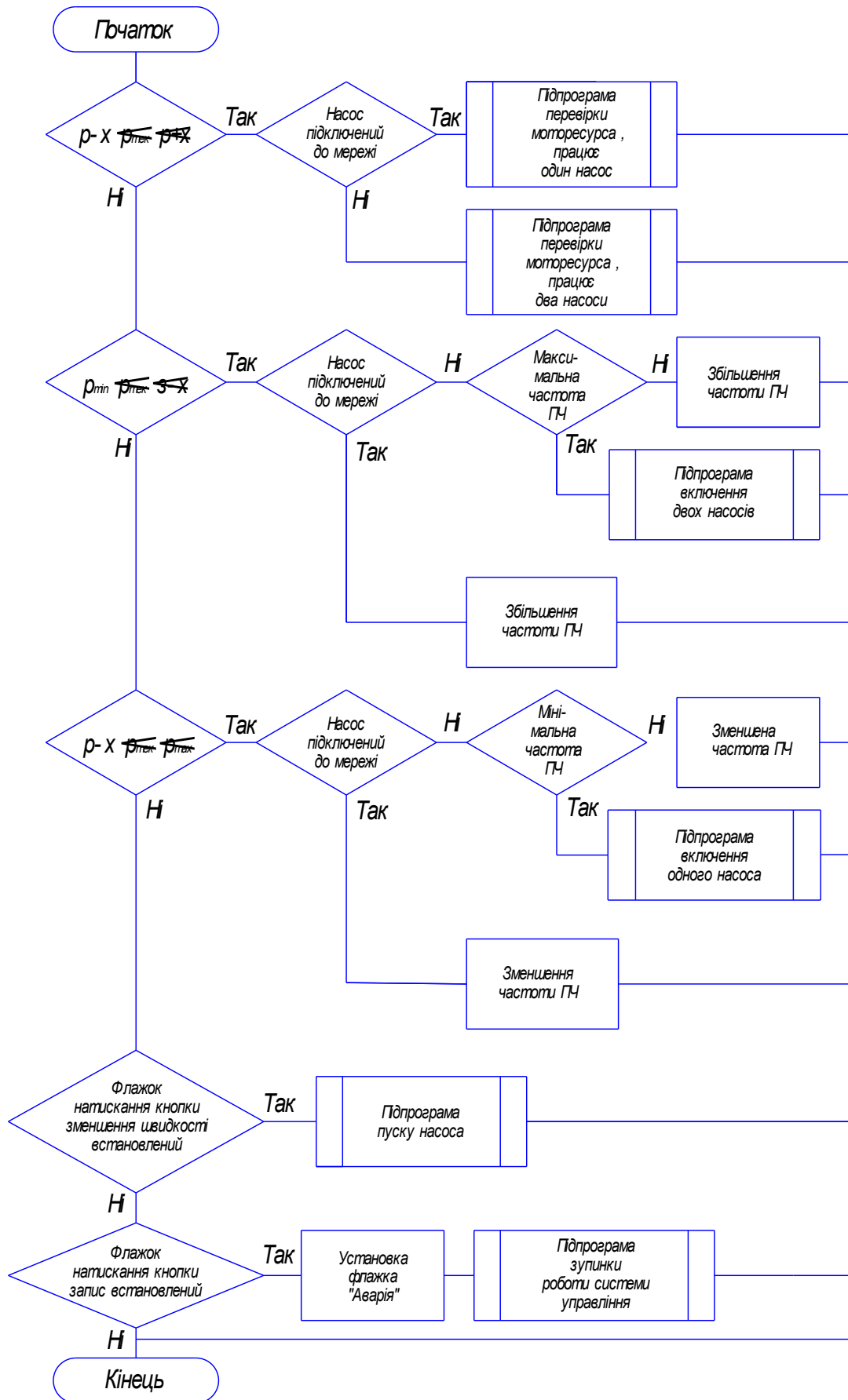


Рисунок 4.18 – Структурна схема алгоритму автоматичного режиму роботи насосної станції

Ручний режим є аварійним і необхідний тільки для роботи коли неможливий автоматичний режим роботи СК.

4.8 Висновки за розділом

У дослідницькій частині магістерської роботи виконано повний цикл синтезу, аналізу та моделювання системи автоматичного керування електроприводом циркуляційного насоса з використанням векторного керування асинхронним двигуном та ПІД-регулятора.

На основі лінеаризованої моделі електромеханічної системи отримано передавальні функції двигуна та об'єкта регулювання тиску. Це дозволило провести оптимізацію контурів керування за модульним оптимумом і синтезувати ПІД-регулятор із параметрами, що забезпечують необхідні динамічні властивості. Проведено апаратну реалізацію ПІД-регулятора на та визначено номінали елементів з урахуванням стандартних рядів.

Виконано формування механічних характеристик асинхронного двигуна у режимі векторного керування. Розрахунки показали, що застосована система забезпечує стабільність потокозчеплення та коректний поділ керування за d- та q-осями, що підтверджено результатами імітаційного моделювання.

У середовищі MATLAB/Simulink побудовано дві моделі електропривода: лінеаризовану та нелінійну двофазну модель АД. Проведено моделювання в критичних режимах роботи: під час пуску, різкого збільшення та зменшення споживання води. Результати свідчать, що система забезпечує:

- час перехідного процесу при пуску – 0,22 с;
- відсутність статичної помилки ($\Delta H = 0$);
- незначні значення перерегулювання в межах нормативів (до 5,26%).

Підтверджено, що синтезований регулятор дає стабільний та швидкодіючий перехідний процес, однак врахування нелінійностей у повній

моделі демонструє необхідність додаткового згладжування. Для цього введено аперіодичну ланку 1-го порядку, що забезпечило узгодження реальної та спрощеної моделей із прийнятним збільшенням тривалості перехідних процесів.

Окрему увагу приділено структурі частотно-керованого електропривода, зокрема принципам роботи випрямляча, інвертора з ШІМ, гальмового вузла та системи керування на базі мікроконтролера. Це дозволило всебічно охарактеризувати фізичну реалізацію САК.

Додатково виконано синтез дискретного ПД-регулятора методом аналогового прототипу, що відкриває можливості переходу до повної цифрової реалізації системи керування.

У підсумку проведені дослідження підтверджують, що синтезована система автоматичного керування електроприводом циркуляційного насоса забезпечує високі статичні та динамічні показники, відповідність вимогам до надійності, точності та швидкодії, що робить її придатною для практичної реалізації та подальшої модернізації, зокрема із застосуванням нейромережових підходів.

5. ІНЖЕНЕРНІ РІШЕННЯ З ТЕХНІКИ БЕЗПЕКИ

5.1 Розрахунок штучного заземлення в електроустановках напругою до 1000 В методом коефіцієнта використання електродів

Схеми підключення частотного електропривода до мережі має вигляд:

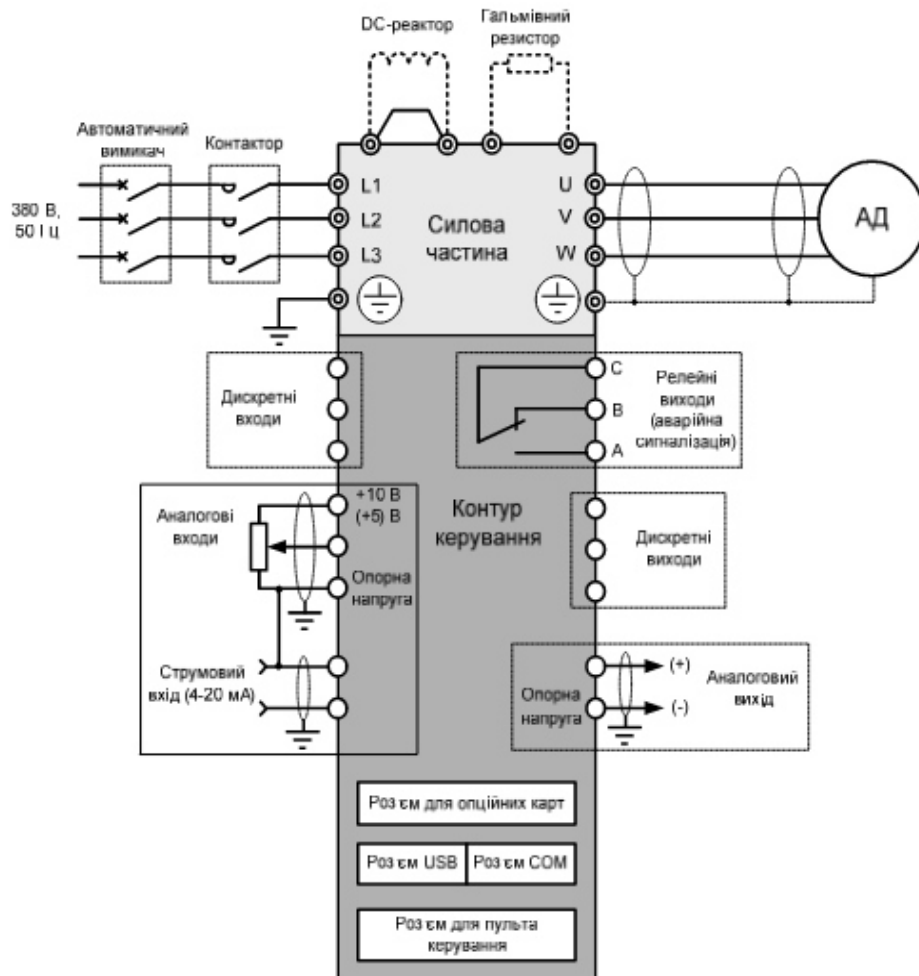


Рисунок 5.1 – Схеми підключення частотного електропривода до мережі

Дана схема передбачає обов'язкове заземлення [16]. Конструкція заземлення прийнята у вигляді системи вертикальних електродів-труб діаметром $d=50$ мм і довжиною $\ell=3$ м, з'єднаних горизонтальним електродом із сталі шириною 40 мм.

Вертикальні електроди розташовані в ряд з відстанню $a=6$ м.

- вимірний питомий опір ґрунту $\rho=100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$;
- кліматична зона III;
- стан ґрунту – малої вологості.

Захисне заземлення – це навмисне з'єднання із землею металевих частин обладнання, які в звичайних умовах знаходяться не під напругою, але можуть опинитися під напругою при порушенні ізоляції електроустановок [16].

Захисне заземлення призначається для захисту від ураження електричним струмом в електроустановках напругою до 1000 В змінного струму з ізолюваною нейтраллю та постійного струму з ізолюваною середньою точкою, а також із напругою, вищою ніж 1000 В, змінного і постійного струмів із будь-яким режимом нейтралі [18].

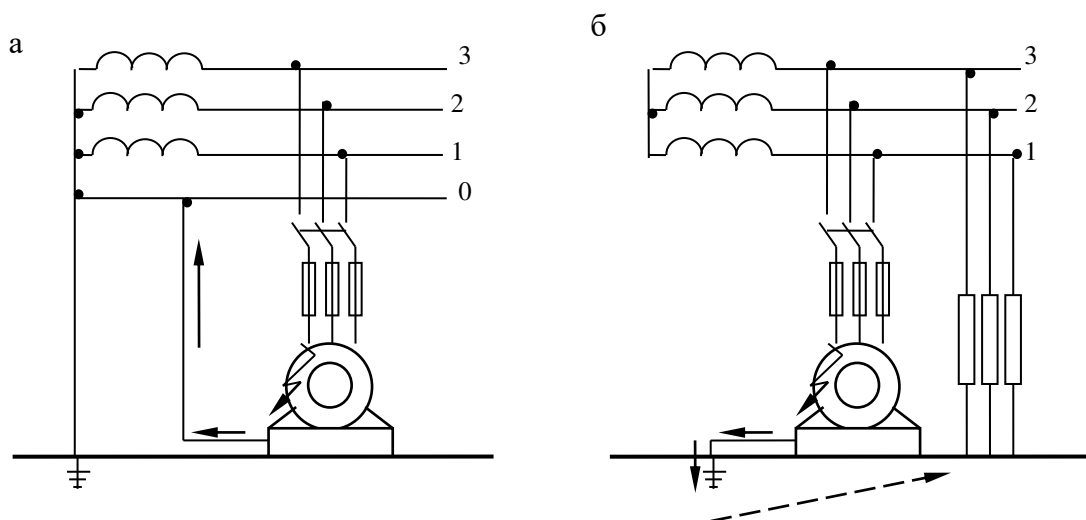


Рисунок 5.2 – Заземлення електроустановки у мережі трифазного струму: а – із глухозаземленою нейтраллю; б – з ізолюваною нейтраллю

В електроустановках напругою до 1000 В із глухозаземленою нейтраллю трансформаторів (або генераторів) захисне заземлення виконують приєднанням частин установки, що заземлюють, до заземленого нейтрального проводу електромережі. При ушкодженні ізоляції створюється коротке замикання однієї фази трансформатора (чи генератора) через нейтраль (рис. 5.2 а) та електроустановка автоматично відключається.

В електроустановках напругою до 1000 В з ізольованою нейтраллю трансформаторів (або генераторів), а також у всіх установках напругою, вищою за 1000 В, захисне заземлення виконують шляхом спорудження місцевого заземлюючого пристрою з малим опором, до якого приєднують заземлюючі частини установки (рис. 5.2 б). Опір місцевого заземлюючого пристрою нормується згідно з „Правилами устроювання електроустановок” (ПУЕ) [16].

Фізична суть захисного заземлення полягає в тому, що навмисно створене між металевим корпусом устаткування та землею електричне з'єднання має досить малий опір порівняно з тілом людини. Цей опір дозволяє знизити силу струму, що проходить через тіло людини, до допустимого значення.

Найбільш допустимий опір повторного заземлення R_n у мережах із глухозаземленою нейтраллю згідно вимог ПУЕ – 10 Ом.

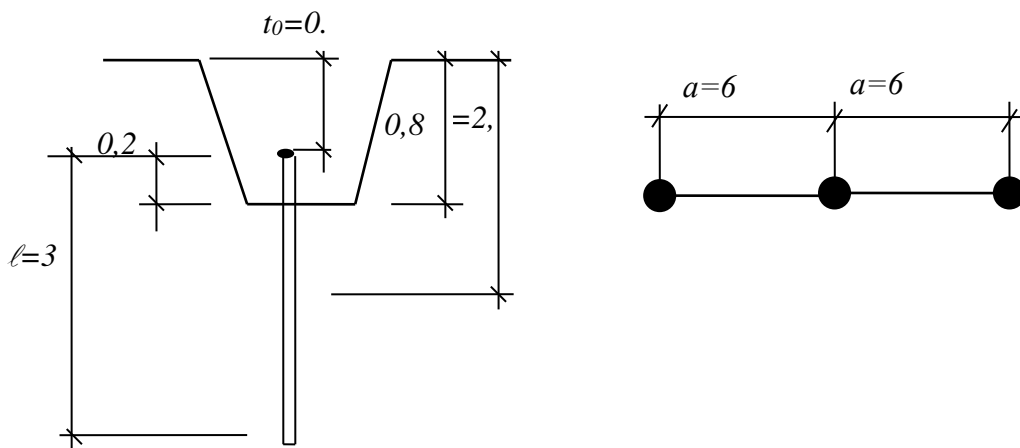


Рисунок 5.3 – Контур заземлення

Визначаємо розрахунковий питомий опір ґрунту:

$$\rho_g = \rho_{\text{вим}} \psi_g = 100 \times 1,2 = 120 \text{ Ом}\cdot\text{м};$$

Визначаємо опір розтіканню вертикальних електродів з круглої сталі:

$$R_g = \frac{\rho_g}{2\pi l} \left(\ln \frac{2l}{d} + 0,5 \ln \frac{4t_1 + 1}{4t_1 - 1} \right) = \frac{100}{2 \times 3,14 \times 3} \left(\ln \frac{2 \times 3}{0,048} + 0,5 \ln \frac{4 \times 2,1 + 3}{4 \times 2,1 - 3} \right) = 33,2 \text{ Ом};$$

де d – зовнішній діаметр електрода, для електродів із кутикової сталі
 $d=0.95 \times b_{\text{п}}$, м;

$b_{\text{п}}$ – ширина полицки кутика, м

ρ - розрахунковий питомий опір ґрунту, Ом×м.

ℓ - довжина електрода, м;

$t_1 = \ell/2 + t_0 = 3/2 + 0.6 = 2,1$ м – глибина закладання – відстань від поверхні землі до середини вертикального електрода;

Попередньо визначаємо необхідну кількість паралельно з'єднаних заземлювачів:

$$n = \frac{R_{\text{в}}}{R_{\text{в}} \eta_{\text{в}}} = \frac{33,2}{10 \times 1} = 3,32 \approx 4 \text{ шт};$$

де $\eta_{\text{в}}$ - коефіцієнт використання вертикальних електродів, для орієнтовного розрахунку приймається рівним 1 [1 табл. 8,5 стр. 111]

Визначаємо довжину горизонтального електрода:

- при рядовому влаштуванні $L_{\text{Г}} = a \times (n-1) = 6 \times (4-1) = 18$ м;

де $a = 6$ м – відстань між вертикальними електродами;

n – прийнята кількість вертикальних електродів, шт.

6. Визначаємо розрахунковий питомий опір ґрунту:

$$\rho_{\text{з}} = \rho_{\text{вим}} \psi_{\text{з}} = 100 \times 1,6 = 160 \text{ Ом} \times \text{м};$$

7. Визначаємо опір розтіканню струму для горизонтального електрода:

$$R_{\text{з}} = \frac{\rho_{\text{з}}}{2\pi L_{\text{з}}} \ln \frac{L_{\text{з}}^2}{b_{\text{з}} t_0} = \frac{160}{2 \times 3,14 \times 18} \ln \frac{18^2}{0,04 \times 0,6} = 13,46 \text{ Ом};$$

де $b_{\text{Г}} = 0,04$ – ширина, м.

8. Загальний опір заземлюючого пристрою

$$R_{\text{з}} = \frac{R_{\text{в}} R_{\text{з}}}{R_{\text{в}} \eta_{\text{в}} + R_{\text{з}} \eta_{\text{г}} n} = \frac{33,2 \times 13,46}{33,2 \times 0,83 + 13,46 \times 0,89 \times 4} = 6,02 \text{ Ом};$$

де $\eta_{\text{г}} = 0,83$ – коефіцієнт використання горизонтальних електродів з урахуванням вертикальних електродів;

$\eta_{\text{в}} = 0,89$ - коефіцієнт використання вертикальних електродів.

Виконуємо оптимізаційний розрахунок:

Приймаємо $n = 3$ шт.

Визначаємо довжину горизонтального електрода:

- при рядовому влаштуванні $L_r = a \times (n-1) = 6 \times (3-1) = 12$ м;

де $a = 6$ м – відстань між вертикальними електродами;

Визначаємо опір розтіканню струму для горизонтального електрода:

$$R_z = \frac{\rho_z}{2\pi L_z} \ln \frac{L_z^2}{b_z t_0} = \frac{100}{2 \times 3,14 \times 12} \ln \frac{12^2}{0,04 \times 0,6} = 18,47 \text{ Ом};$$

Загальний опір заземлюючого пристрою

$$R_3 = \frac{R_6 R_z}{R_6 \eta_r + R_z \eta_b n} = \frac{33,2 \times 18,47}{33,2 \times 0,915 + 18,47 \times 0,87 \times 3} = 7,8 \text{ Ом};$$

де $\eta_r = 0,915$ – коефіцієнт використання горизонтальних електродів з урахуванням вертикальних електродів;

$\eta_b = 0,87$ - коефіцієнт використання вертикальних електродів.

Оскільки необхідна умова $7,8 \text{ Ом} = R_3 \leq R_{н} = 10 \text{ Ом}$ виконується, то остаточно приймаємо захисне заземлення із трьох вертикальних електродів, то остаточно приймаємо контурне захисне заземлення із трьох вертикальних електродів з параметрами $\ell = 3$ м; $d_b = 0,05$ м; $a/\ell = 2$.

5.2 Висновок за розділом

У п'ятому розділі було виконано комплексний аналіз та інженерні розрахунки, спрямовані на забезпечення електробезпеки під час експлуатації частотного електропривода циркуляційного насосу. Основна увага приділена проектуванню захисного заземлення, що є ключовим елементом системи безпечної роботи електроустановок напругою до 1000 В.

На основі характеристик ґрунту, кліматичних умов та вимог ПУЕ здійснено розрахунок опору розтікання струму для вертикальних та горизонтальних електродів. Розглянуто варіанти конфігурації

заземлювального пристрою та визначено оптимальні параметри системи. Проведене порівняння показало, що при використанні трьох вертикальних електродів довжиною 3 м, з'єднаних горизонтальним сталевим електродом, загальний опір заземлення становить 7,8 Ом, що відповідає нормативним вимогам ($R \leq 10$ Ом для мереж із глухозаземленою нейтраллю).

Розрахунок підтвердив, що обране конструктивне рішення забезпечує надійне відведення струму у разі пошкодження ізоляції та мінімізує небезпечну напругу дотику, тим самим гарантує захист персоналу та безпечну роботу електропривода. Також у розділі підкреслено фізичну суть та призначення захисного заземлення, наведено схеми можливих режимів роботи мережі та обґрунтовано необхідність застосування місцевого заземлюючого пристрою для даної установки.

Отже, розроблені інженерні рішення з техніки безпеки є технічно обґрунтованими, відповідають нормативним вимогам та забезпечують достатній рівень електробезпеки в умовах експлуатації частотного електропривода.

ВИСНОВКИ

У магістерській роботі проведено комплексне дослідження та розроблення системи автоматичного керування електроприводом циркуляційного насоса на базі асинхронного двигуна та перетворювача частоти. Отримані результати підтвердили ефективність запропонованих технічних рішень та їх відповідність сучасним вимогам енергоефективності й надійності.

У першому розділі виконано аналіз принципів роботи електропривода, способів регулювання швидкості асинхронних двигунів та обґрунтовано доцільність застосування частотного керування. Встановлено, що оптимальною для насосної установки є структура із перетворювачем частоти та скалярним ШІМ-керуванням, яка забезпечує необхідну точність та економічність.

У другому розділі визначено технічні параметри приводу, обрано електродвигун потужністю 90 кВт, перетворювач частоти Emotron FDU та датчик тиску Метран-100. Вибір обладнання підтвердив відповідність вимогам щодо ефективності, надійності та можливості плавного регулювання продуктивності насоса.

У третьому розділі побудовано математичну модель асинхронного двигуна та перетворювача частоти. Виконано розрахунок параметрів Т-подібної схеми заміщення, отримано передавальні функції та сформовано структурну модель системи автоматичного керування, що стала основою для моделювання та синтезу регуляторів.

У четвертому розділі проведено синтез та моделювання системи керування з ПІД-регулятором та векторним керуванням. Результати моделювання підтвердили високі динамічні характеристики: час перехідного процесу 0,22 с, відсутність статичної похибки та перерегулювання в межах 5,26%. Розроблено можливість цифрової реалізації керування шляхом синтезу дискретного ПІД-регулятора.

У п'ятому розділі виконано розрахунок захисного заземлення, що забезпечило опір 7,8 Ом, який відповідає нормативним вимогам та гарантує безпечну експлуатацію електропривода.

Узагальнюючи, розроблена система автоматичного керування забезпечує точність, стабільність, енергоефективність та високу надійність роботи циркуляційного насоса, а запропоновані технічні рішення можуть бути використані у промислових насосних установках та подальших модернізаціях.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- 1) Бесараб М. О., Гевко І. Б. Електропривод: теорія, моделювання та системи керування. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2020. 356 с.
- 2) Fitzgerald A. E., Kingsley C., Umans S. Electric Machinery. 7th ed. New York: McGraw-Hill, 2013. 737 p.
- 3) Герасимяк Р. П., Рушишин В. М. Автоматичні системи керування технологічними процесами. Львів: “Новий Світ – 2000”, 2017. 368 с.
- 4) Vas P. Vector Control of AC Machines. Oxford: Oxford University Press, 1990. 322 p.
- 5) Дьяків В. М., Буряк М. Я. Електричні машини та електропривод. Київ: Кондор, 2019. 412 с.
- 6) Електронний ресурс. – Режим доступу: https://www.germiona.com.ua/pressure_sensors_metran.html
- 7) Bose B. K. Modern Power Electronics and AC Drives. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2002. 736 p.
- 8) Коваленко І. М., Бондаренко С. Ю. Частотне регулювання асинхронних електроприводів. Харків: ХНЕУ ім. Кузнеця, 2021. 214 с.
- 9) Mohan N., Undeland T., Robbins W. Power Electronics: Converters, Applications, and Design. 3rd ed. Hoboken: Wiley, 2003. 824 p.
- 10) Пугачев В. Д. Моделювання електромеханічних систем у MATLAB/Simulink. Київ: КПІ ім. І. Сікорського, 2018. 280 с.
- 11) Ogata K. Modern Control Engineering. 5th ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2010. 897 p.
- 12) Зіньковський В. Г., Глазунов В. В. Автоматизація насосних станцій водопостачання. Харків: УкрДАЗТ, 2016. 168 с.
- 13) Emotron FDU User Manual. CG Drives & Automation, 2022. 245 p.
- 14) Кліменко О. М., Попов В. О. Теорія автоматичного керування: ПІД-та оптимальні регулятори. Київ: НТУУ “КПІ”, 2019. 248 с.

- 15) Krause P., Wasynczuk O., Sudhoff S. Analysis of Electric Machinery and Drive Systems. 2nd ed. New York: Wiley-IEEE Press, 2002. 608 p.
- 16) ПУЕ. Правила улаштування електроустановок. Чинний з 01.01.2018. Київ: Міненерговугілля України, 2018. 580 с.
- 17) Chapman S. Electric Machinery Fundamentals. 5th ed. New York: McGraw-Hill, 2012. 784 p.
- 18) Бублик О. В. Безпека життєдіяльності та охорона праці в енергетиці. Київ: Ліра-К, 2020. 312 с.
- 19) Kennedy J., Eberhart R. Swarm Intelligence. San Francisco: Morgan Kaufmann, 2001. 512 p.
- 20) Лисенко С. М., Куценко С. В. Електропривод з перетворювачами частоти: принципи побудови і розрахунки. Харків: Тандем, 2015. 276 с.
- 21) Metrol Metran-100 Pressure Transmitter. Technical Manual. Emerson, 2021. 68 p.
- 22) MATLAB & Simulink Documentation. MathWorks, 2023. URL: <https://www.mathworks.com/help> (дата звернення: 21.11.2025).
- 23) Березюк А. Д., Шимко А. В. Силова електроніка та її застосування в електроприводі. Київ: Лібра-Трейд, 2018. 340 с.
- 24) Leonhard W. Control of Electrical Drives. 3rd ed. Springer, 2001. 430 p.
- 25) Гідравлічні та насосні системи: навч. посіб. / За ред. К. М. Ситника. Київ: КНЕУ, 2017. 298 с.
- 26) Zubairov R., Nabokina T. Improving Energy Efficiency of Pumping Units Using Frequency Converters // Journal of Power Engineering. 2021. Vol. 15, No. 2. P. 45–53.
- 27) Bernardes M. et al. PID Control: New Identification and Tuning Methods. London: Springer, 2019. 260 p.
- 28) Орлов В. М. Електромагнітні процеси в асинхронних двигунах та методи їх аналізу. Дніпро: НМетАУ, 2016. 240 с.

ДОДАТКИ

Міністерство освіти і науки України
Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

Кафедра автоматики, електроніки та телекомунікацій

Оптимізація режимів роботи електропривода
циркуляційного насосу на базі частотного регулювання

Кваліфікаційна робота магістра

Виконав:

Сергій ТАРАСЕНКО

Керівник:

к.г.н., професор

Станіслав ІГНАТЬЄВ

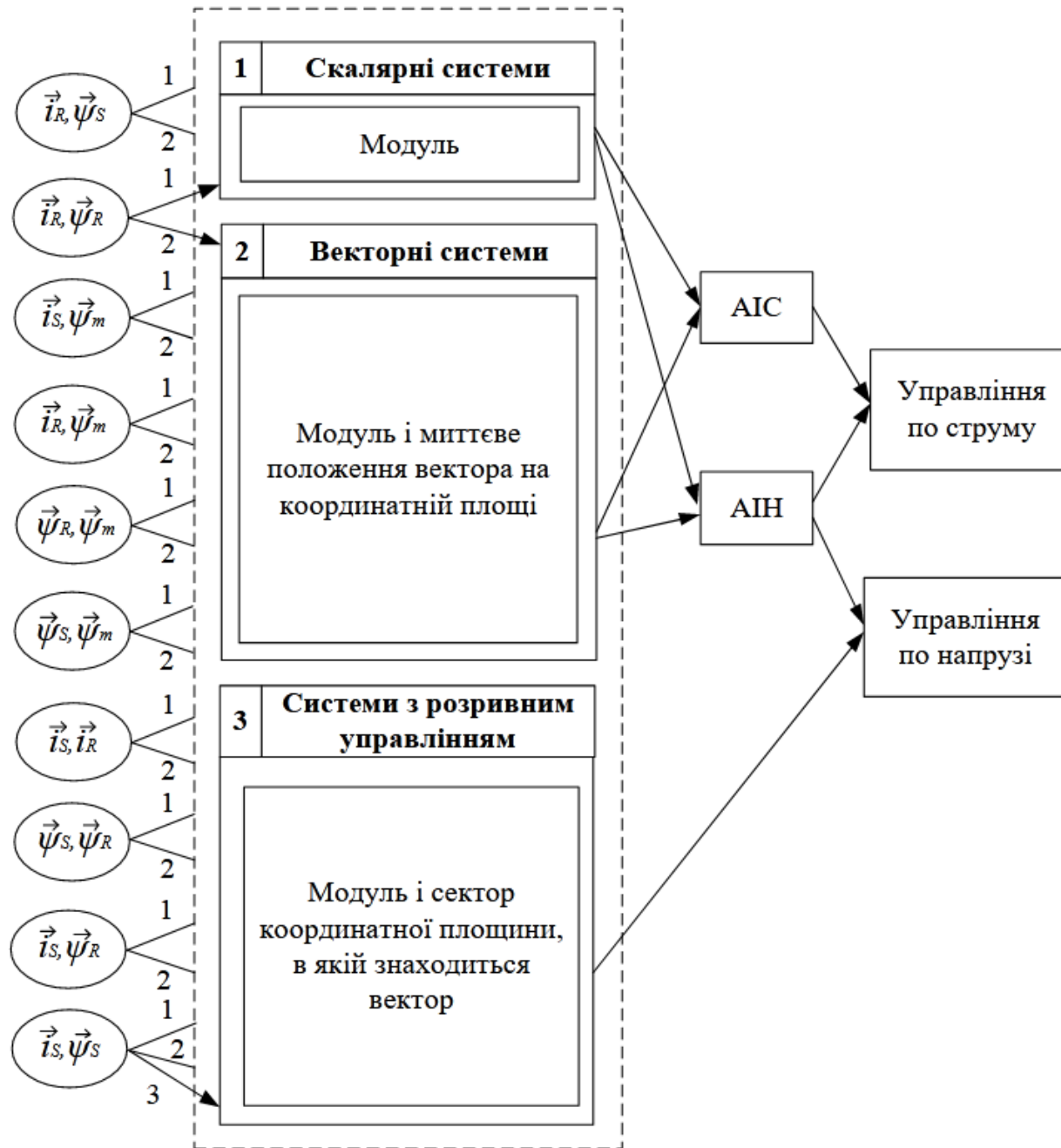
Полтава 2026

Актуальність теми зумовлена необхідністю забезпечення стабільної роботи циркуляційних насосів у динамічних режимах, зменшення експлуатаційних витрат, підвищення надійності та адаптивності систем автоматичного керування.

Метою магістерської роботи є оптимізація режимів роботи ЕП циркуляційного насоса на основі частотного регулювання, розроблення математичних моделей та системи автоматичного керування, здатної забезпечити стабільність, швидкодію та енергоефективність роботи насосної установки.

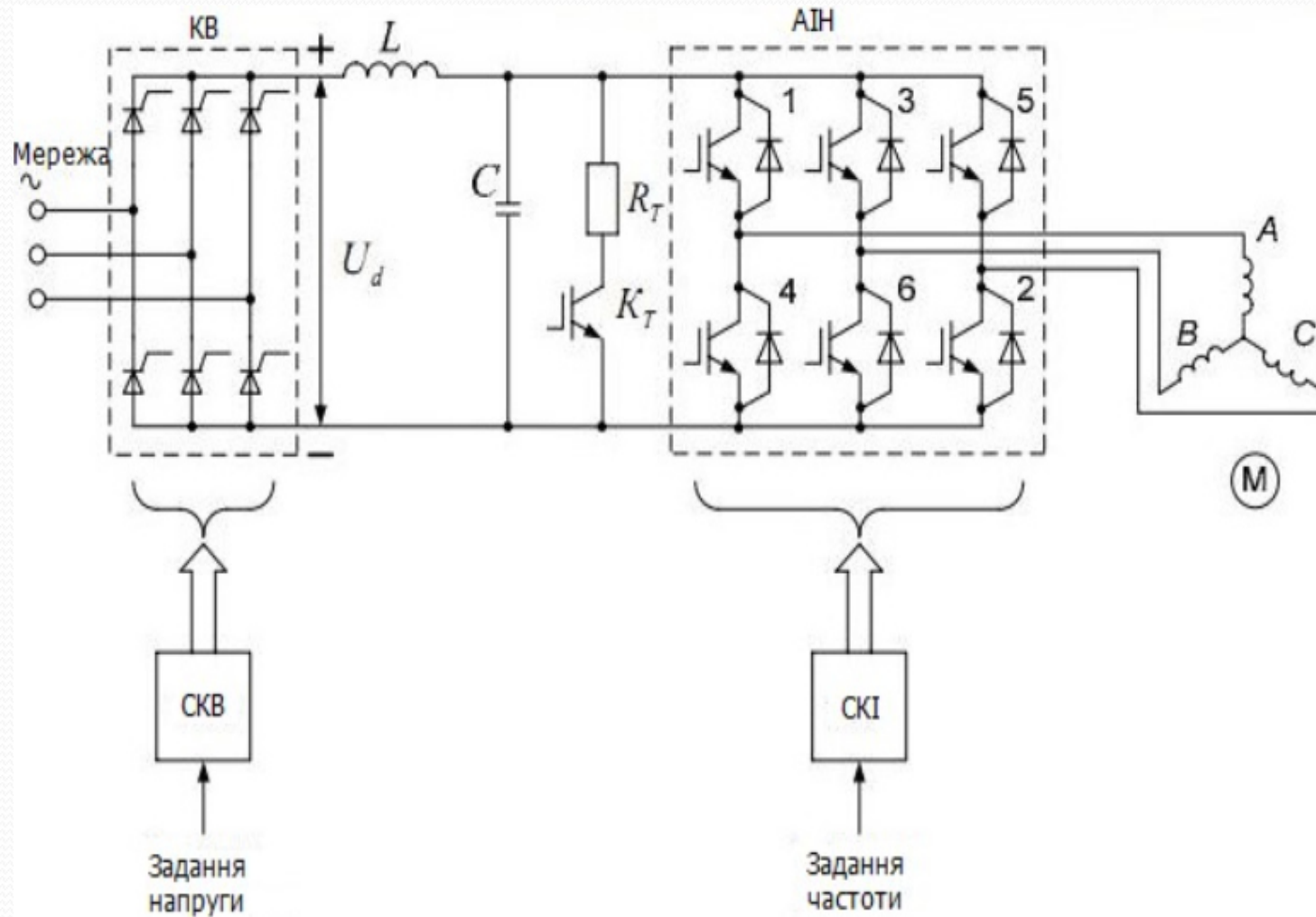
Об'єктом дослідження є процес керування електроприводом циркуляційного насосу на базі асинхронного двигуна.

Предметом дослідження є методи й алгоритми частотного та автоматичного керування для оптимізації режимів роботи електропривода.

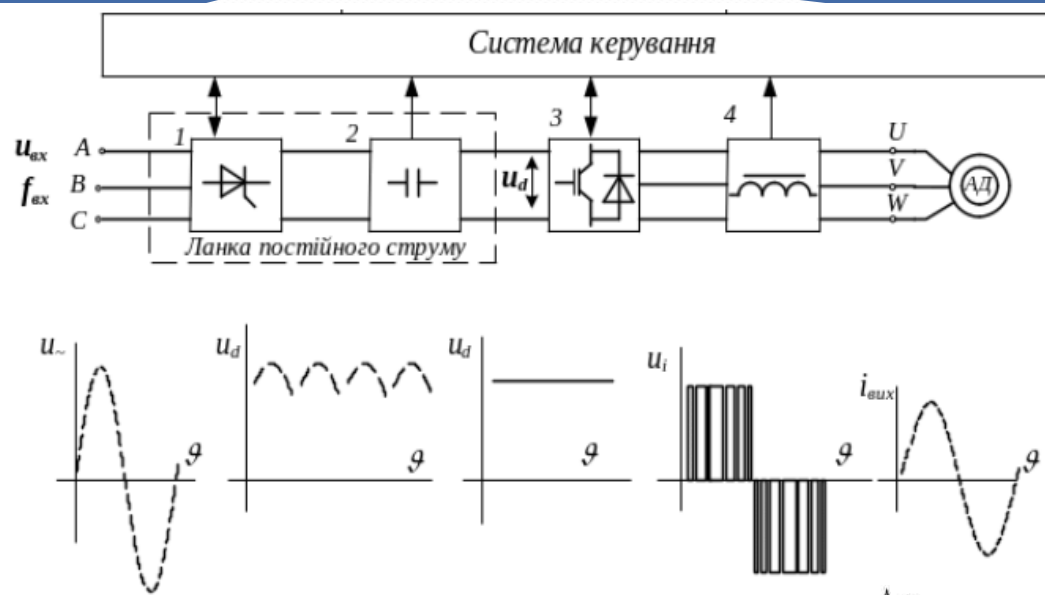


Класифікація сучасних систем керування асинхронними двигунами

Схема перетворювача частоти з ланкою постійного струму:

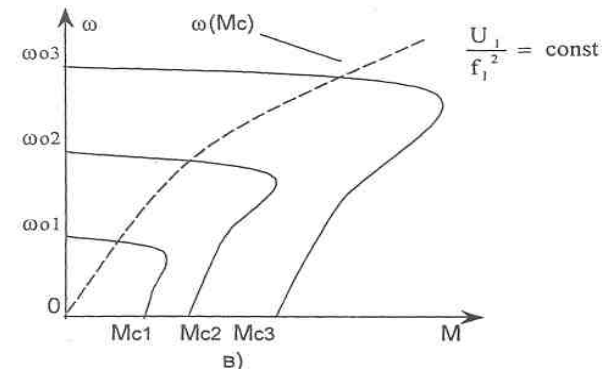
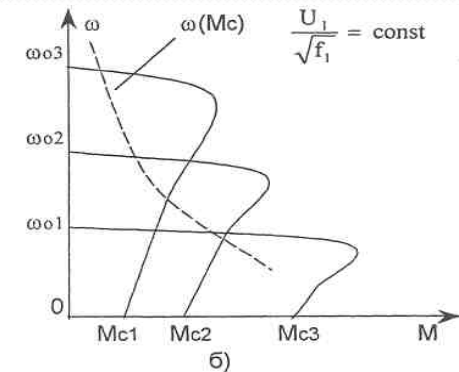
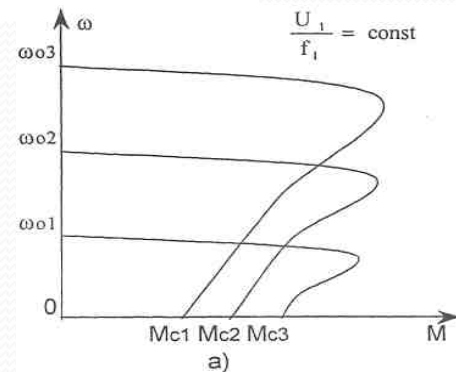


КВ – керований випрямляч; АІН – автономний інвертор напруги; СКВ – система керування випрямлячем; СКІ – система керування інвертором



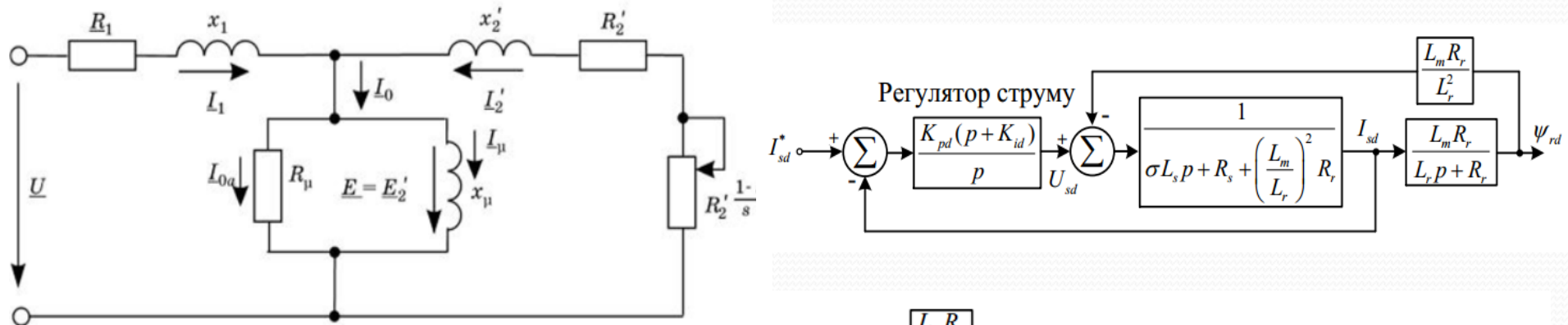
Функціональна схема та
часові діаграми
перетворювача частоти
на базі транзисторів
IGBT

Механічні
характеристики
асинхронного двигуна
при регулюванні зміною
частоти мережі
живлення

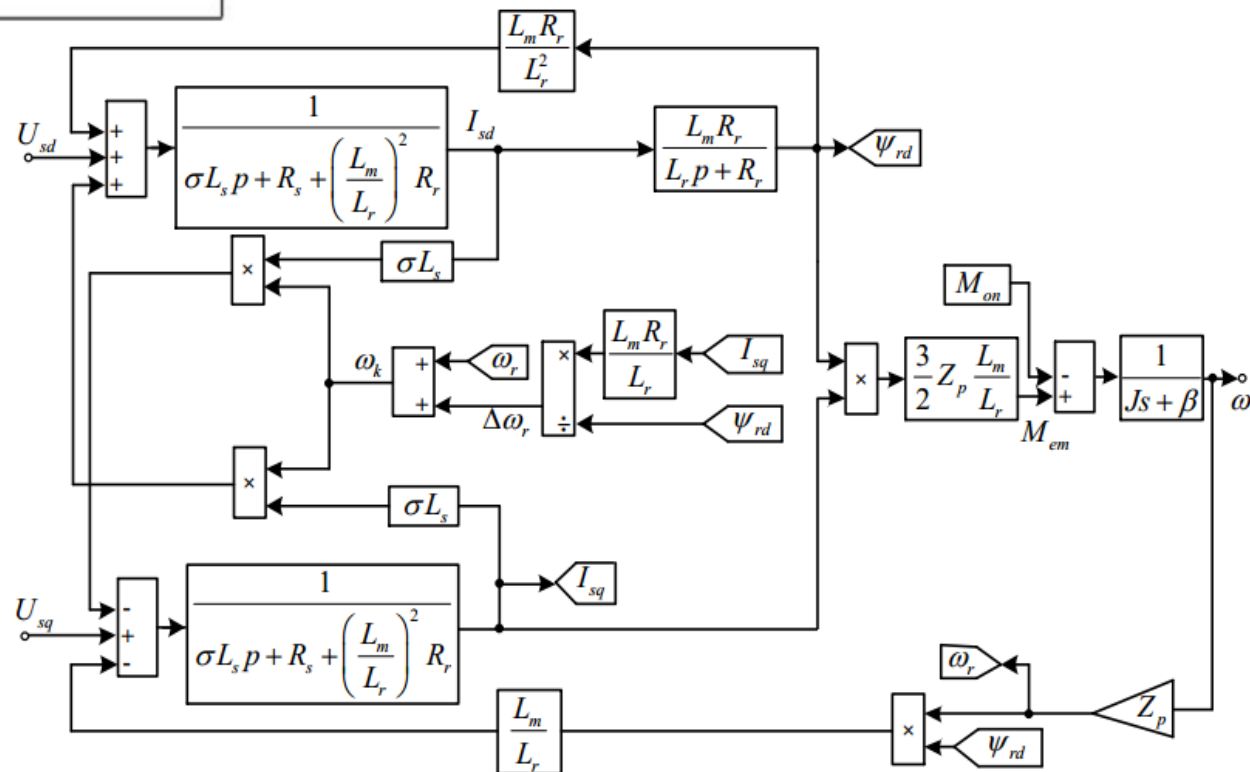


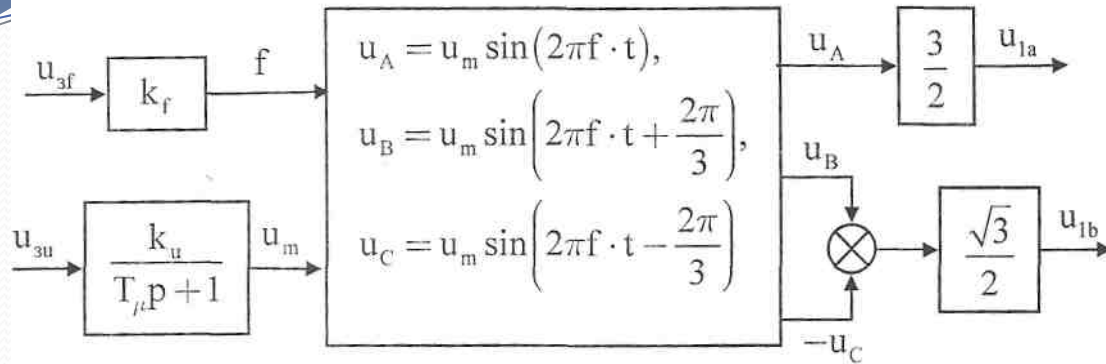
Т-подібна схема заміщення
динамічно узагальненого асинхронного
електродвигуна

Лінерізована модель АД



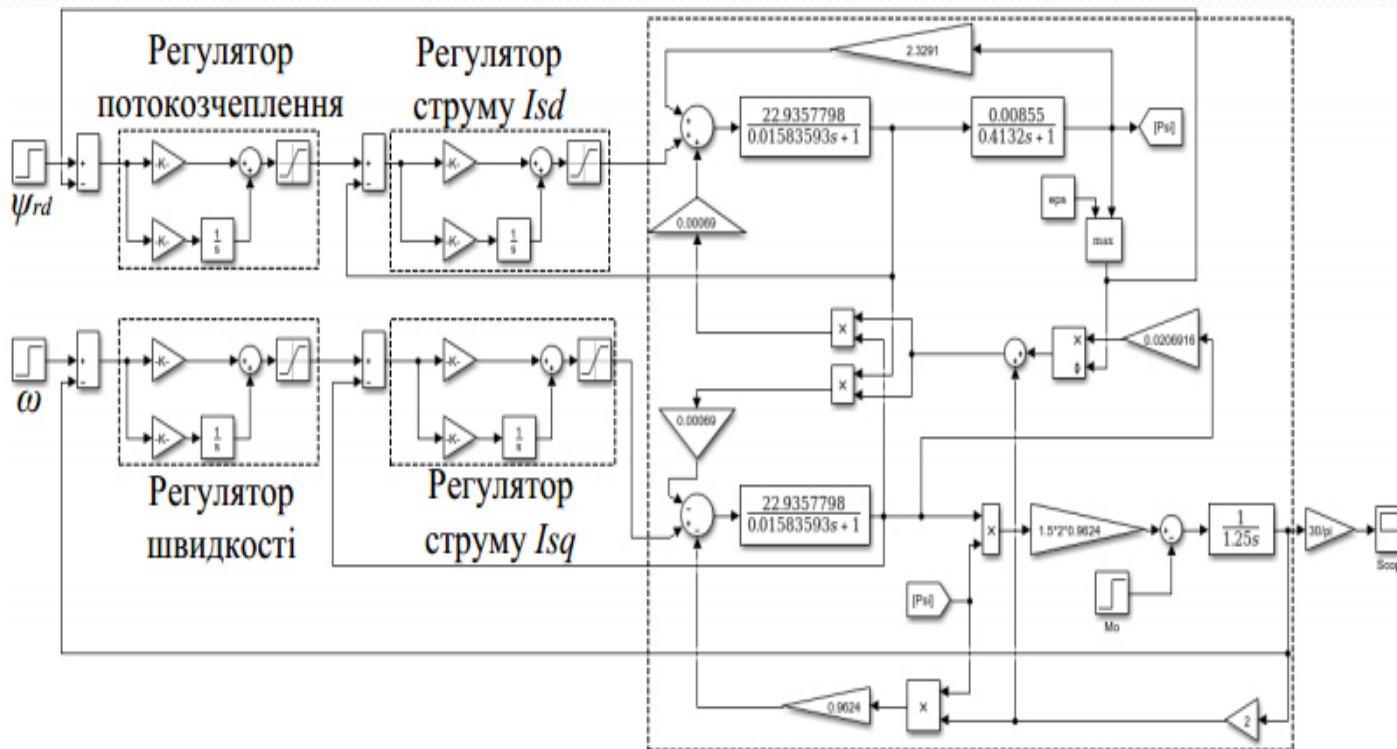
Структурна схема
моделі асинхронного
двигуна в dq
координатах

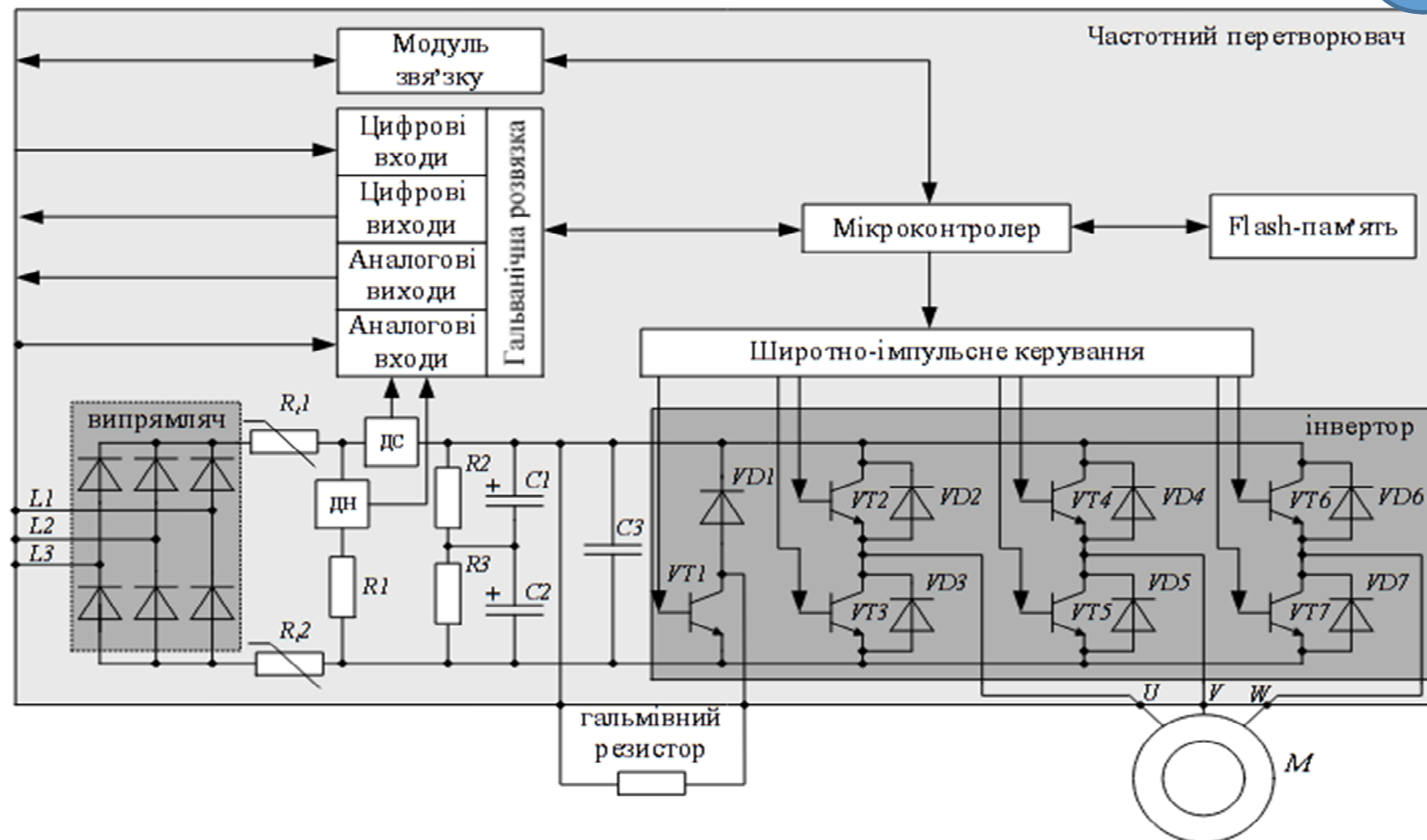




До складу перетворювача частоти з ланкою постійного струму входить керований випрямляч, фільтр і керований інвертор із ШІМ

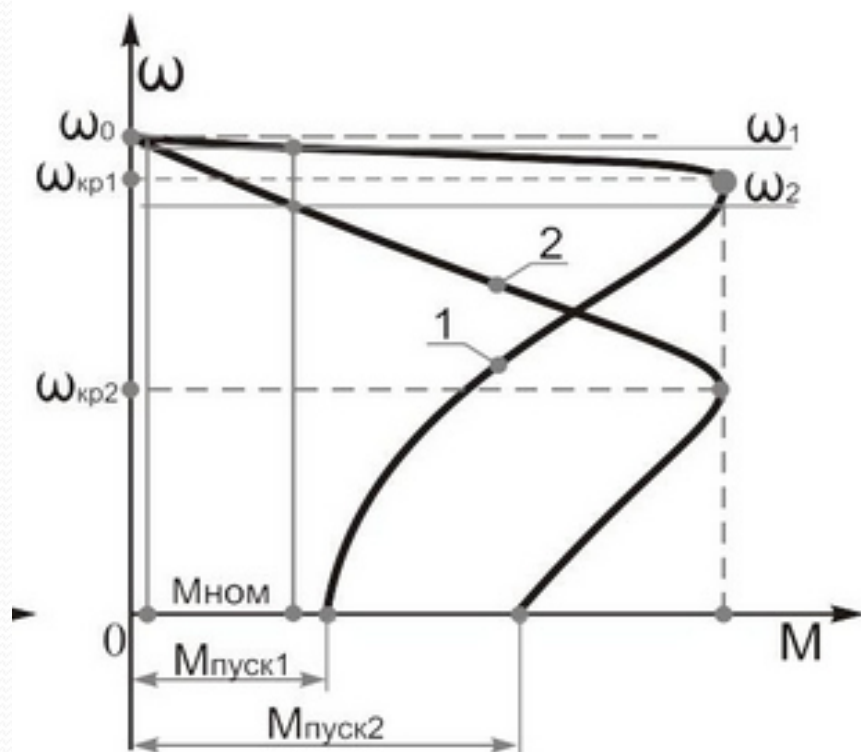
Модель системи керування



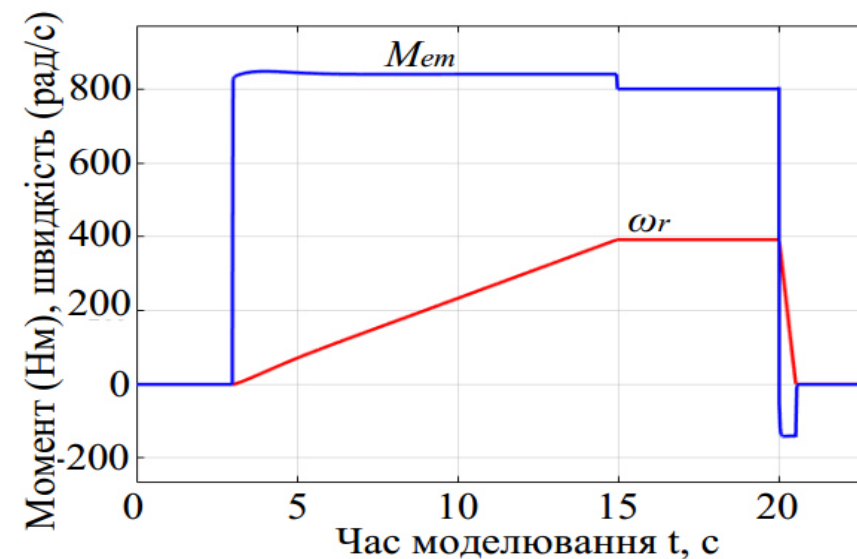
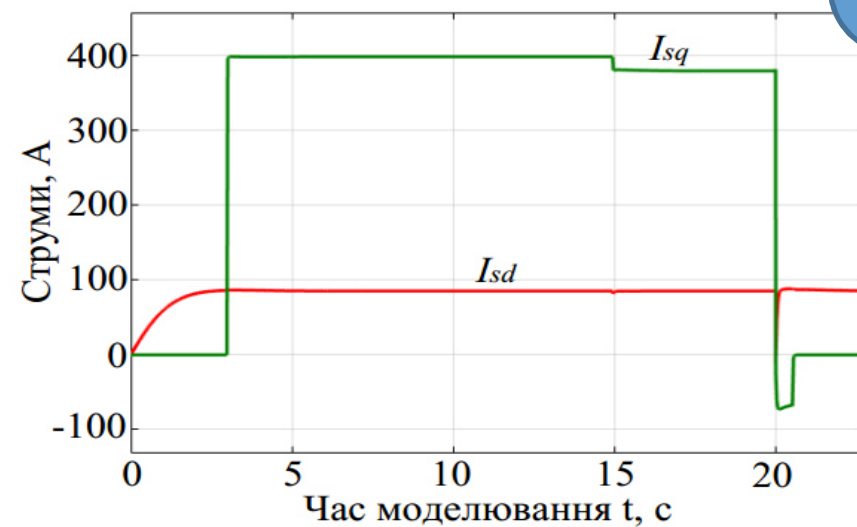


Структурна схема асинхронного електропривода циркуляційного насоса з частотним керуванням

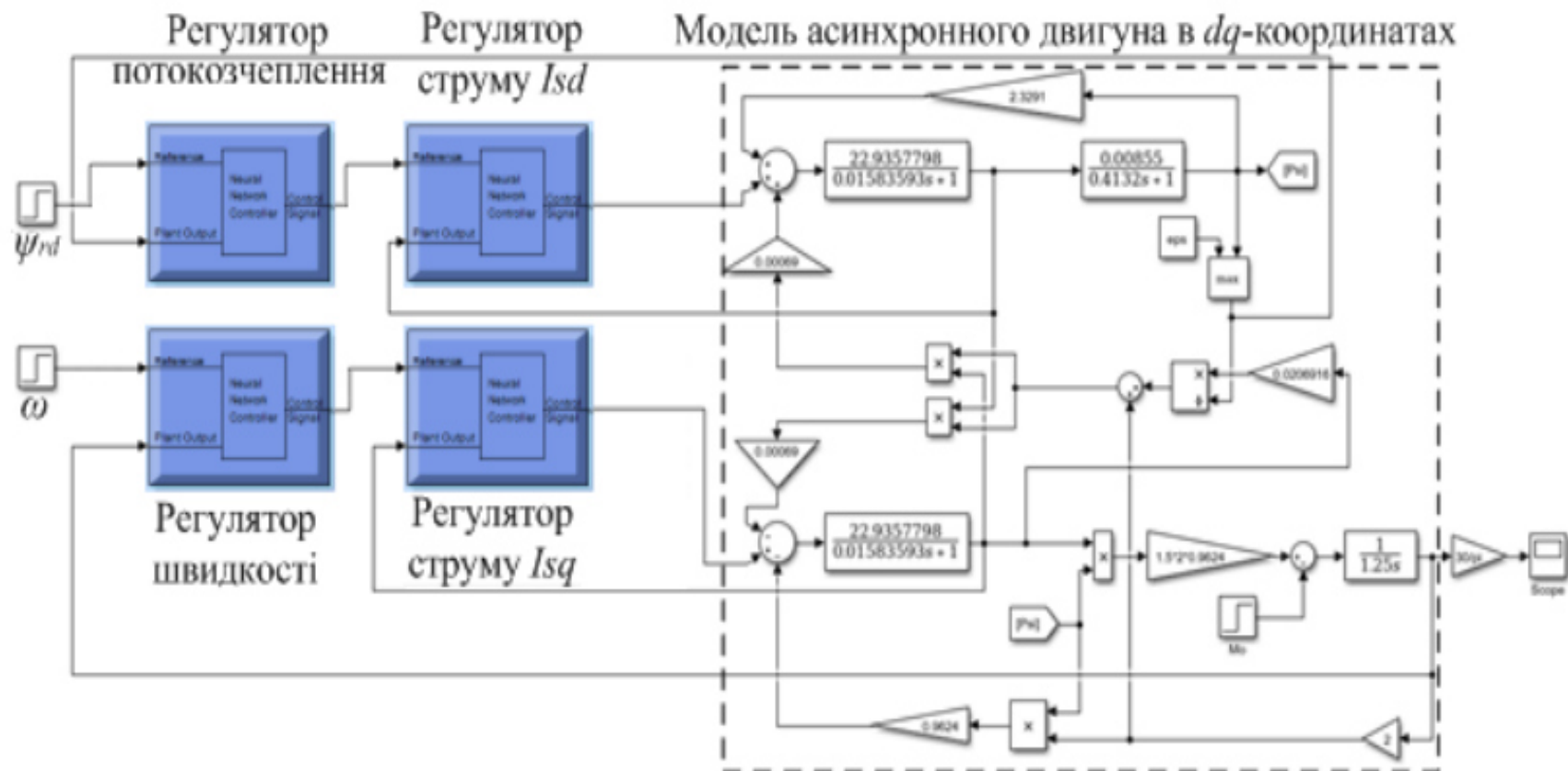
Механічні характеристики АД в процесі керування



1 - природна характеристика; 2
– регулювальна
характеристика

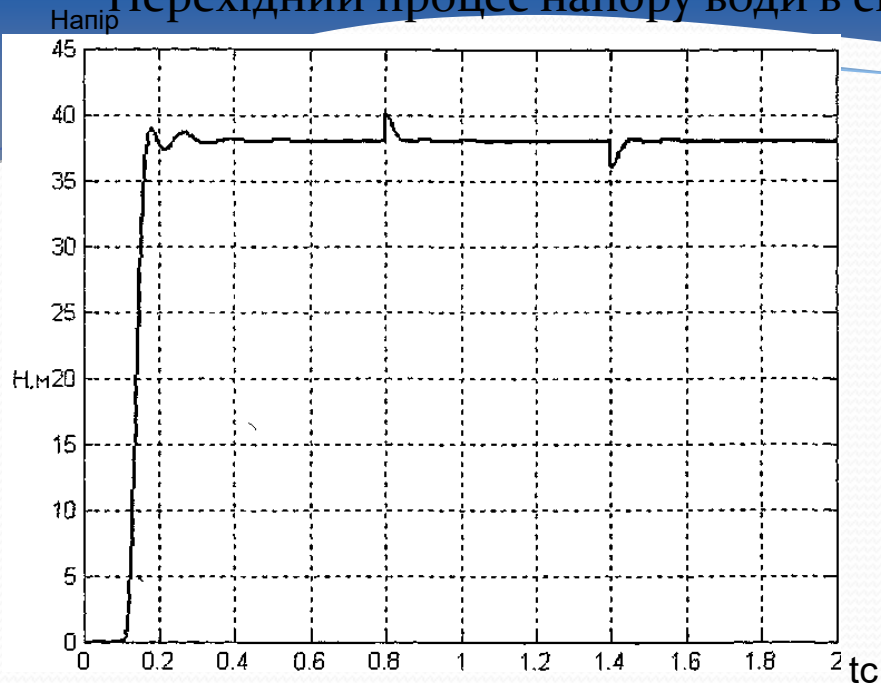


Результати імітаційного моделювання
математичної моделі АД-ПЧ

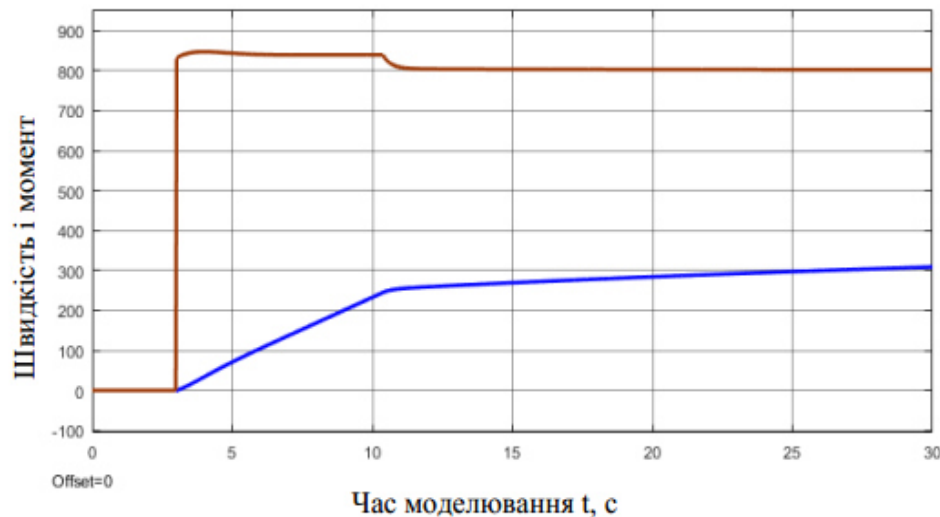


Використання нейрорегулятора для керування моделлю асинхронного двигуна

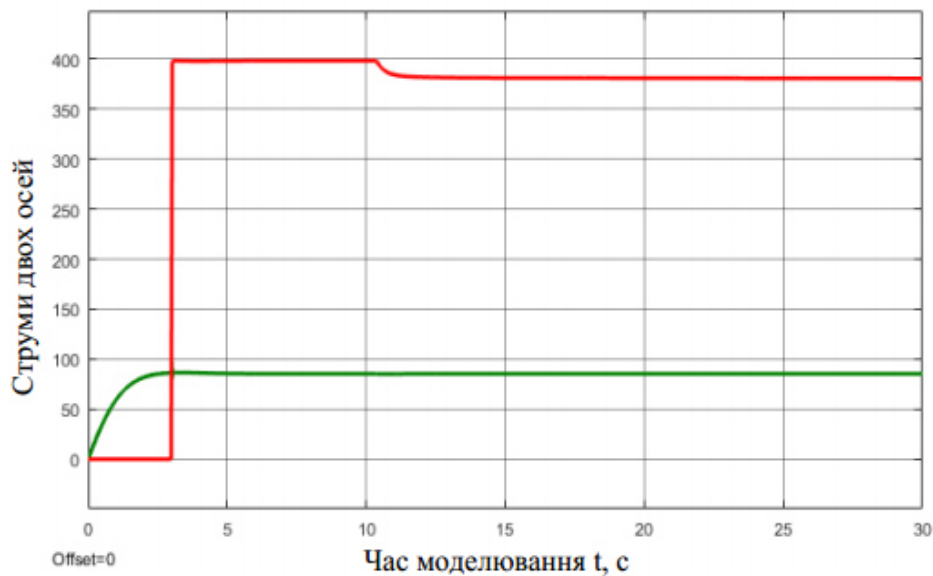
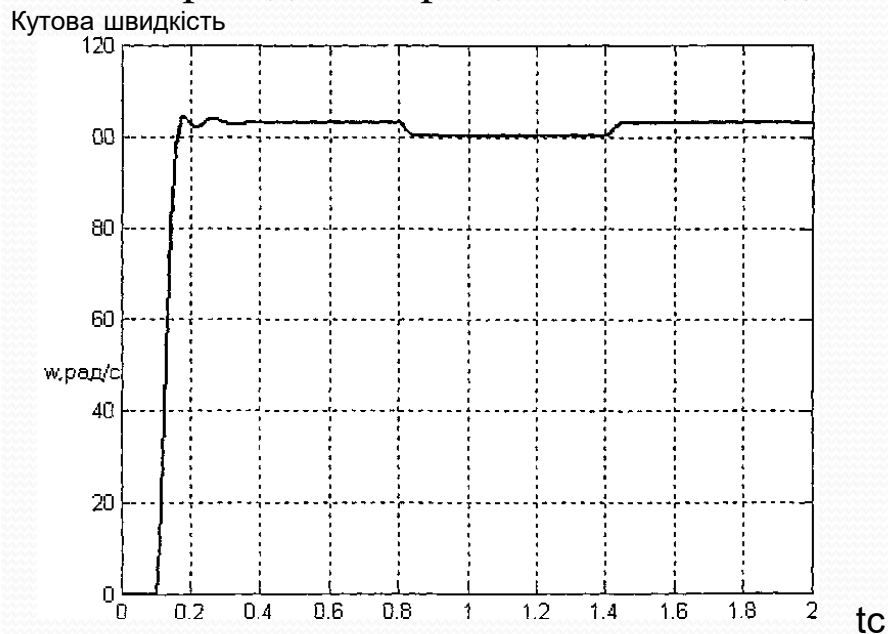
Перехідний процес напору води в системі



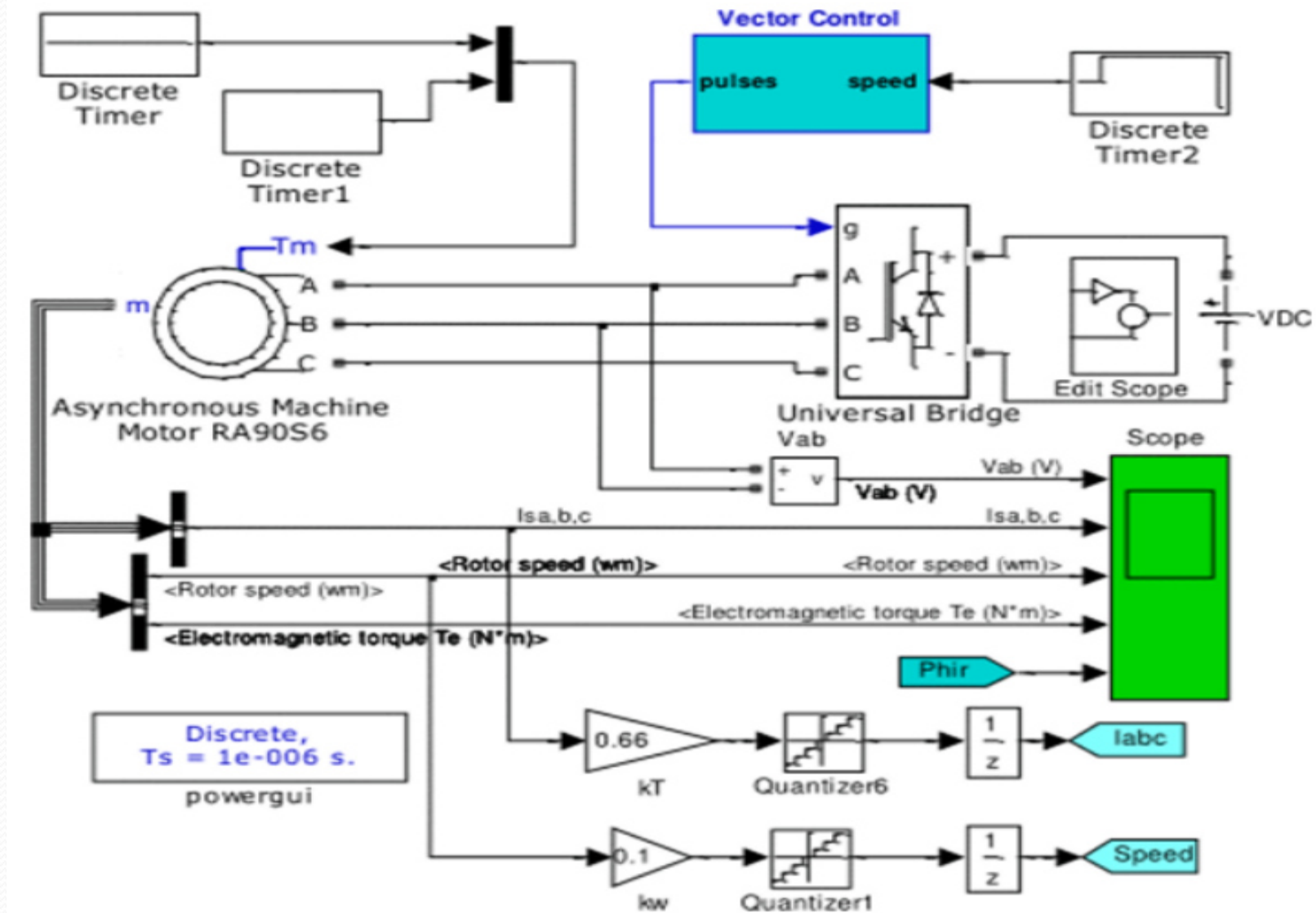
Графіки зміни параметрів електропривода від зміни навантаження



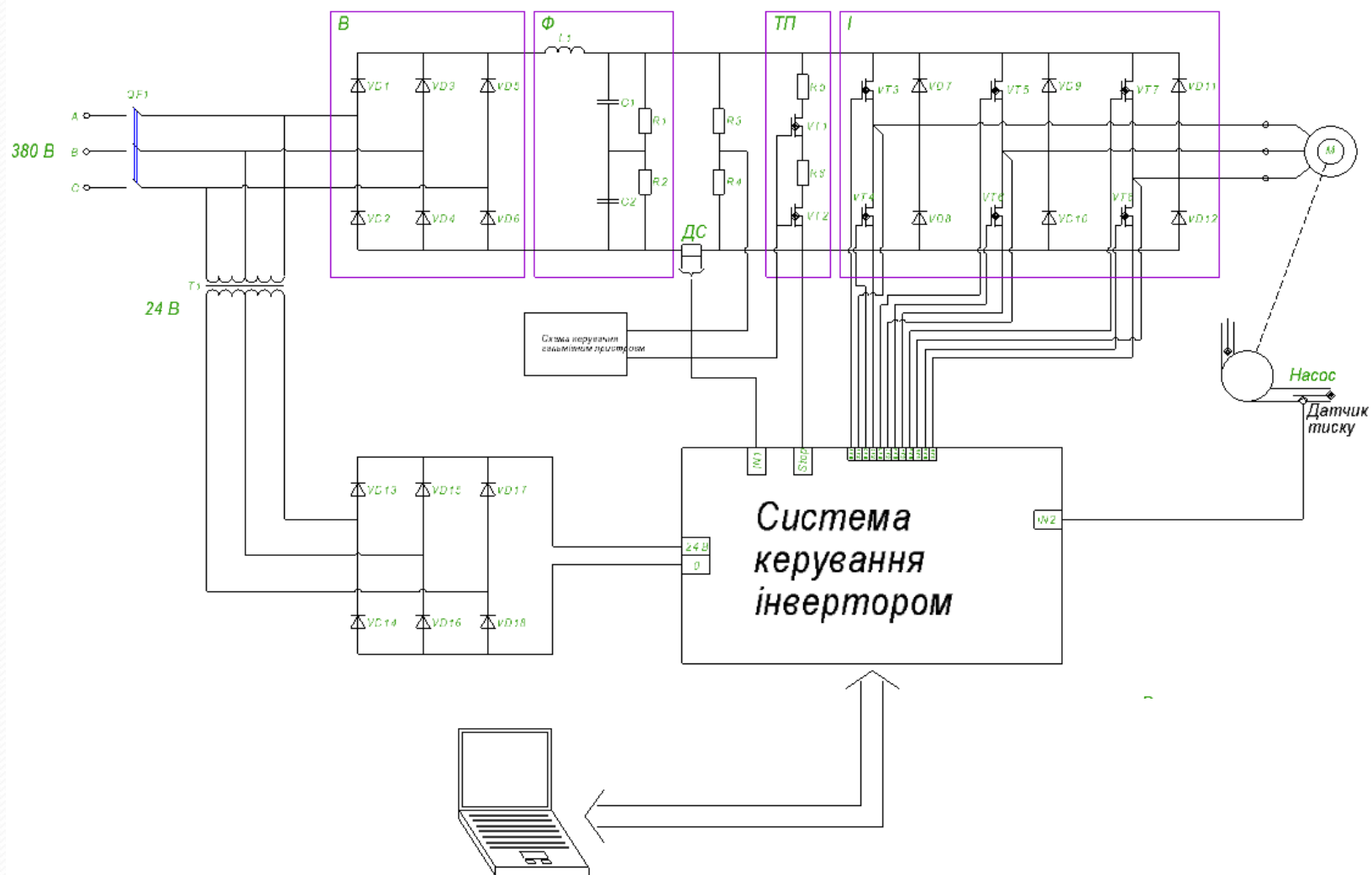
Перехідний процес зміни швидкості

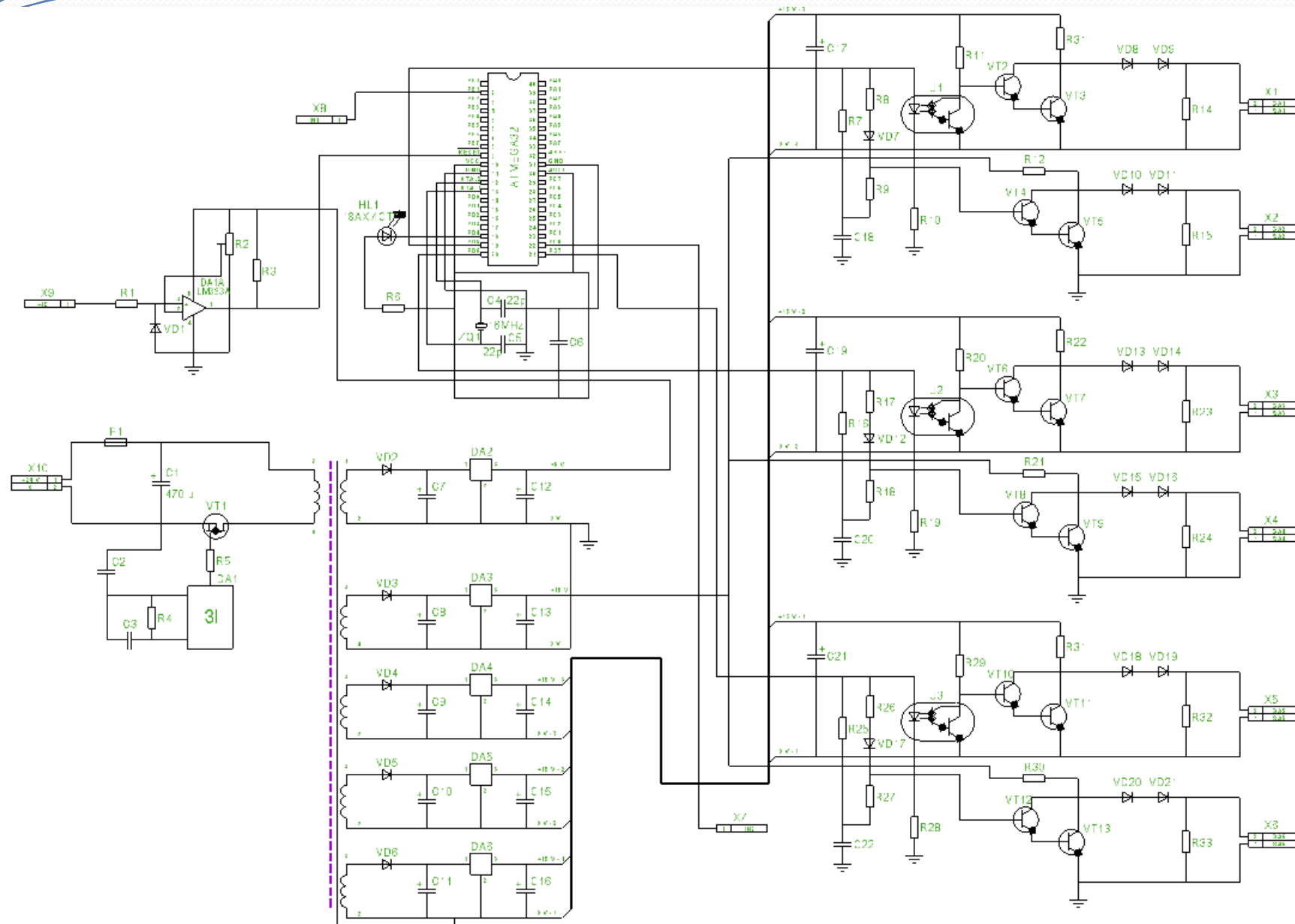


Модель системи АД-ПЧ із додаванням фільтруючого елементу в Simulink

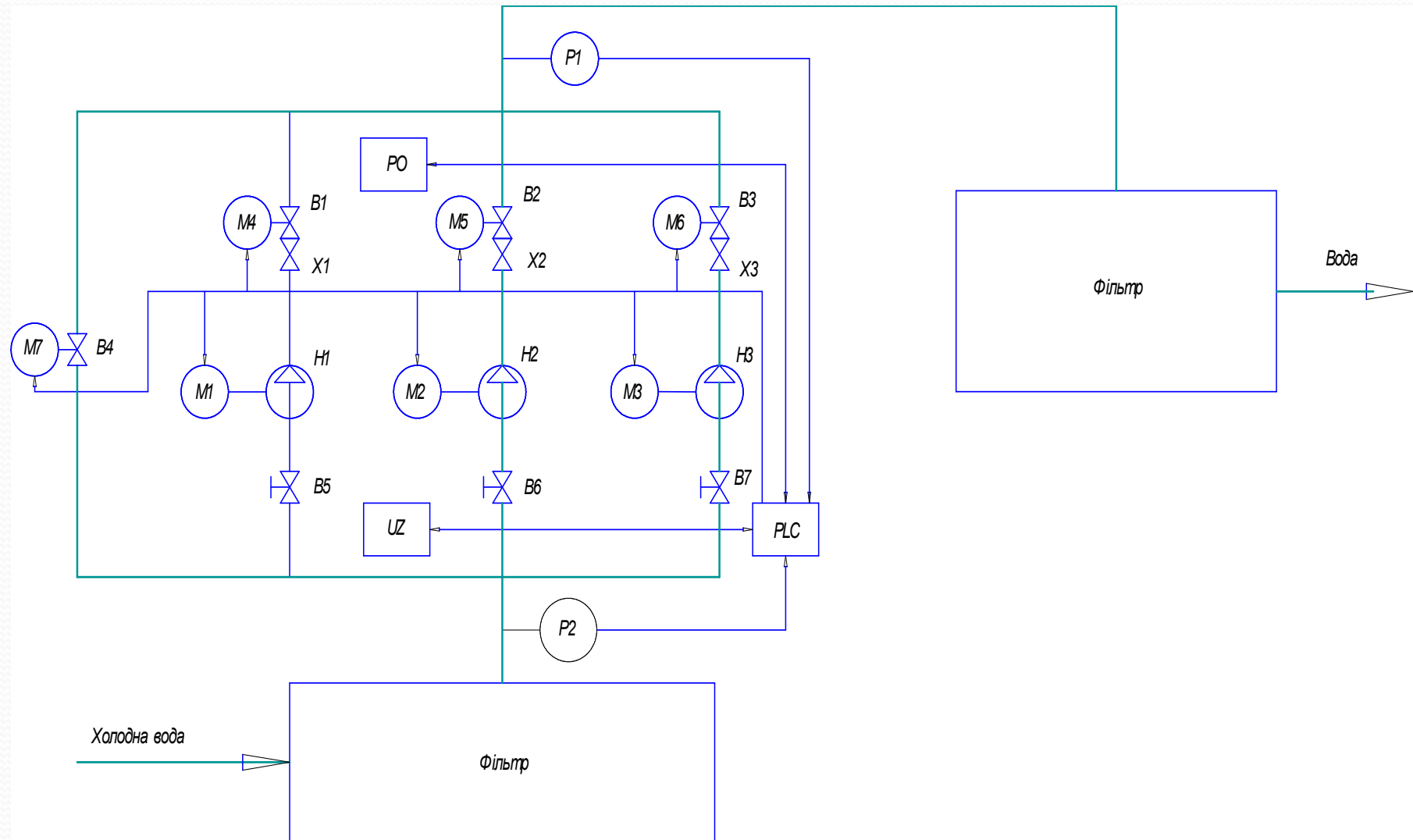


Частотно-керований асинхронний електропривод циркуляційного насосу

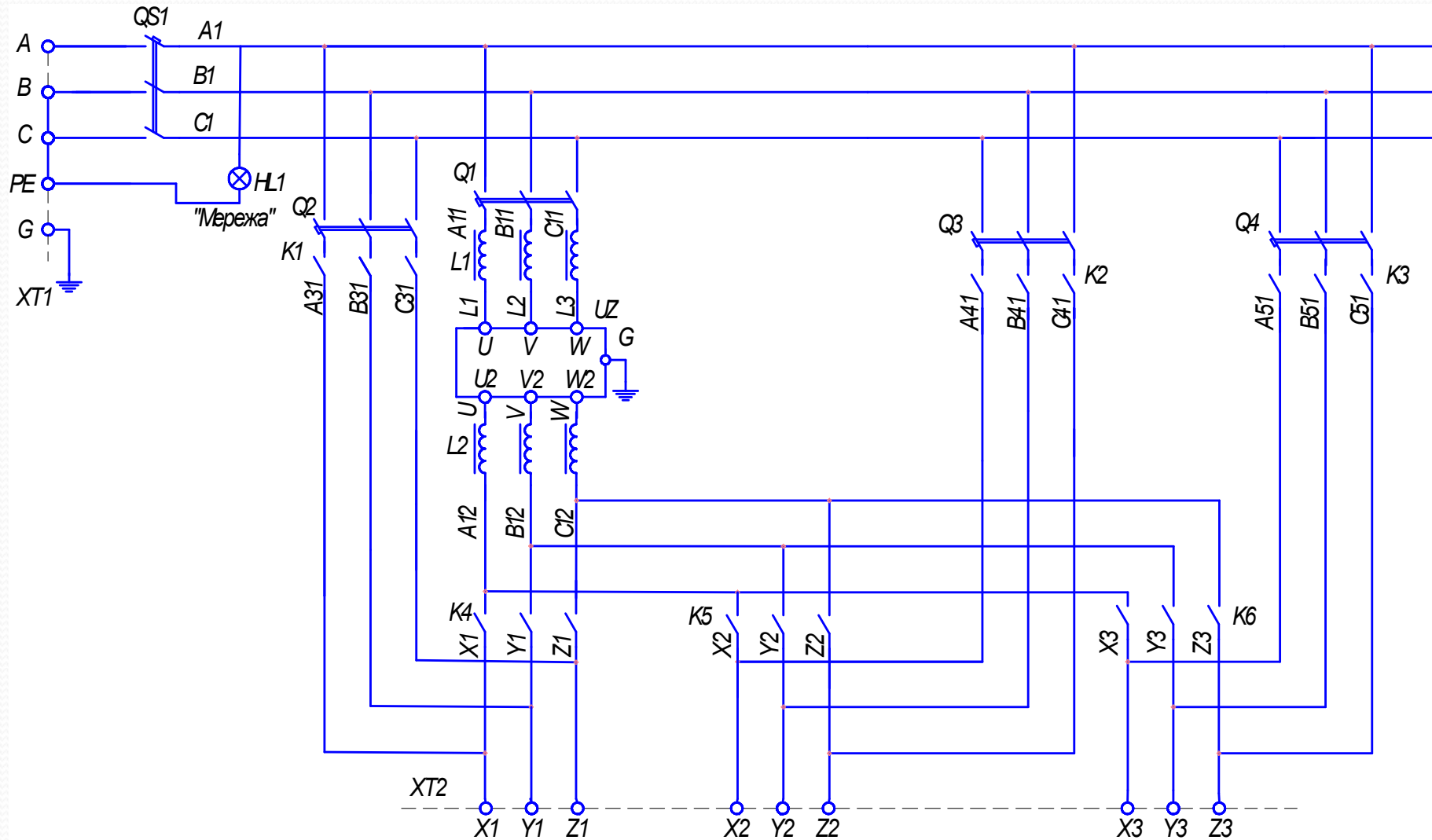




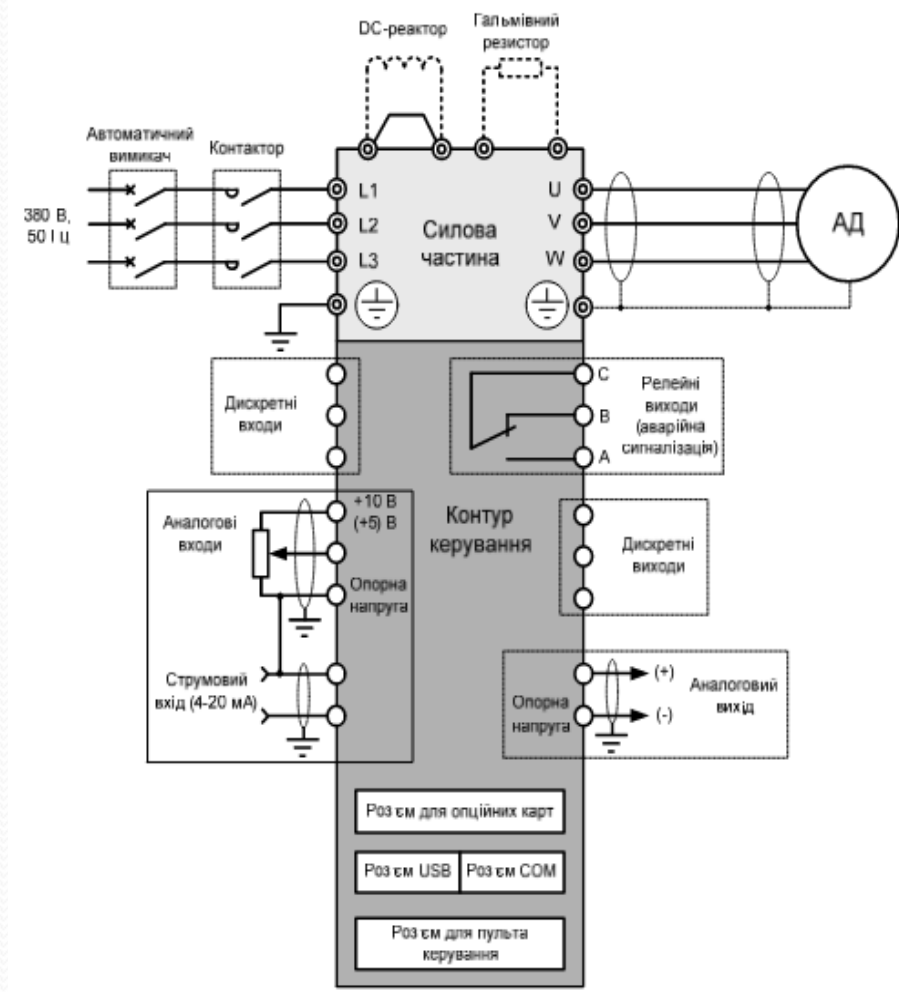
Функціональна схема насосної станції



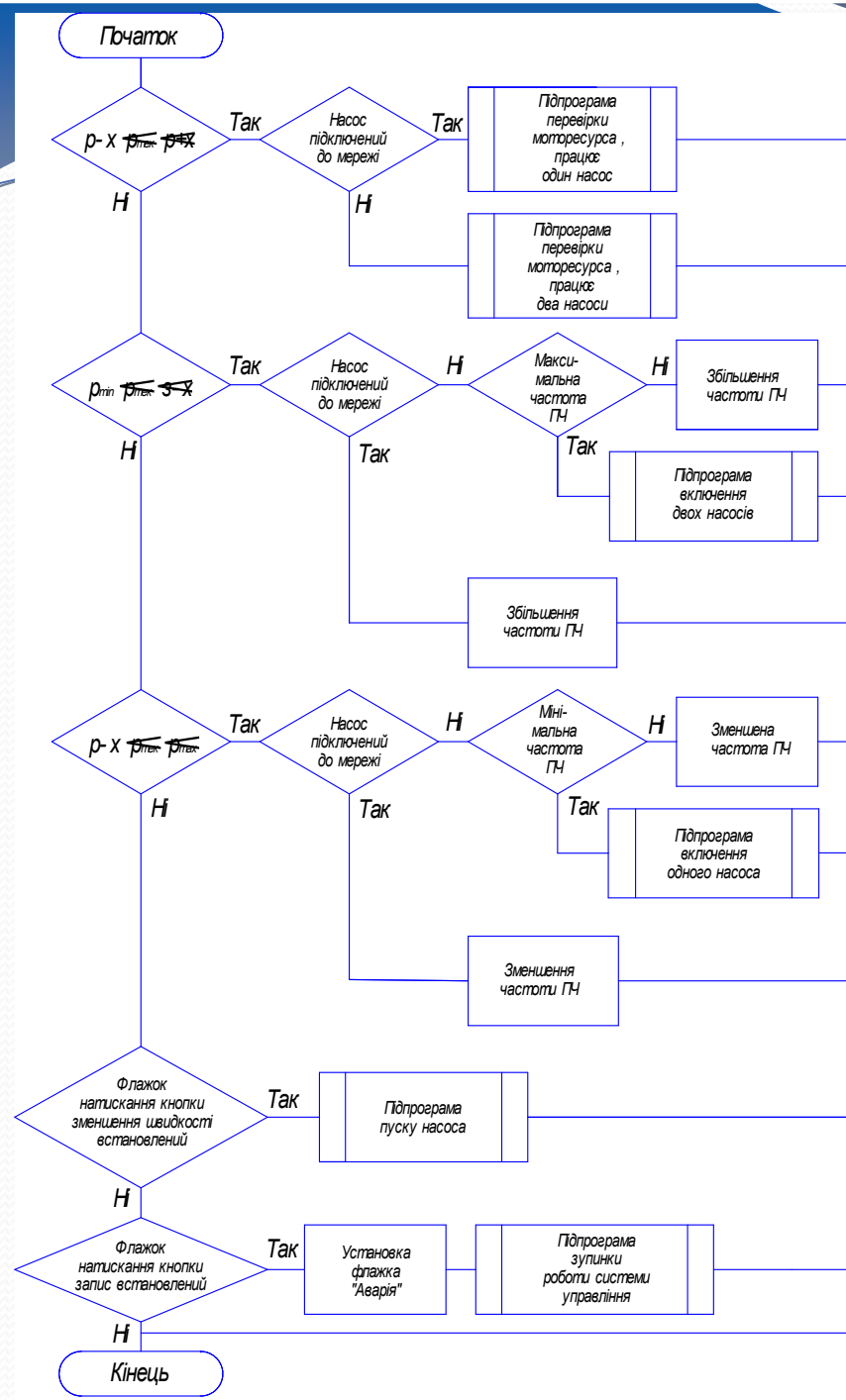
Принципова електрична схема силової системи керування насосами



Схеми підключення частотного електропривода до мережі



Алгоритм автоматичного керування насосної станції



- У магістерській роботі проведено комплексне дослідження та розроблення системи автоматичного керування електроприводом циркуляційного насоса на базі асинхронного двигуна та перетворювача частоти. Отримані результати підтвердили ефективність запропонованих технічних рішень та їх відповідність сучасним вимогам енергоефективності й надійності.
- У першому розділі виконано аналіз принципів роботи електропривода, способів регулювання швидкості асинхронних двигунів та обґрунтовано доцільність застосування частотного керування. Встановлено, що оптимальною для насосної установки є структура із перетворювачем частоти та скалярним ШІМ-керуванням, яка забезпечує необхідну точність та економічність.
- У другому розділі визначено технічні параметри приводу, обрано електродвигун потужністю 90 кВт, перетворювач частоти Emotron FDU та датчик тиску Метран-100. Вибір обладнання підтвердив відповідність вимогам щодо ефективності, надійності та можливості плавного регулювання продуктивності насоса.
- У третьому розділі побудовано математичну модель асинхронного двигуна та перетворювача частоти. Виконано розрахунок параметрів Т-подібної схеми заміщення, отримано передавальні функції та сформовано структурну модель системи автоматичного керування, що стала основою для моделювання та синтезу регуляторів.
- У четвертому розділі проведено синтез та моделювання системи керування з ПІД-регулятором та векторним керуванням. Результати моделювання підтвердили високі динамічні характеристики: час перехідного процесу 0,22 с, відсутність статичної похибки та перерегулювання в межах 5,26%. Розроблено можливість цифрової реалізації керування шляхом синтезу дискретного ПІД-регулятора.
- У п'ятому розділі виконано розрахунок захисного заземлення, що забезпечило опір 7,8 Ом, який відповідає нормативним вимогам та гарантує безпечну експлуатацію електропривода.
- Узагальнюючи, розроблена система автоматичного керування забезпечує точність, стабільність, енергоефективність та високу надійність роботи циркуляційного насоса, а запропоновані технічні рішення можуть бути використані у промислових насосних установках та подальших модернізаціях.



ДЯКУЮ ЗА УВАГУ!