


Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»  
(повне найменування вищого навчального закладу)  
Навчально-науковий інститут інформаційних технологій та робототехніки  
(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))  
Кафедра автоматики, електроніки та телекомунікацій  
(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

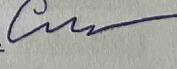
Пояснювальна записка  
до кваліфікаційної роботи

бакалавр  
(ступінь вищої освіти)

на тему **«Модернізація електропривода установки для очищення  
оборотної води в замкненому циклі нафтопереробних заводів»**

Виконав: студент 2 курсу, групи 201-пМЕ2  
спеціальності 141 «Електроенергетика,  
електротехніка та електромеханіка»  
(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Клименко Є. М.   
(прізвище та ініціали)


Керівник Сільвестров А.М.   
(прізвище та ініціали)

Рецензент \_\_\_\_\_  
(прізвище та ініціали)

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

### ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри автоматки,  
 електроніки та телекомунікацій

 О.В. Шефер  
 «01» квітня 2025 р.

### З А В Д А Н Н Я

#### НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА СТУДЕНТУ

Клименку Євгенію Максимовичу

1. Тема роботи «Модернізація електропривода установки для очищення оборотної води в замкненому циклі нафтопереробних заводів»  
 керівник роботи Сільвестров Антон Миколайович, д.т.н., професор

затверджена наказом вищого навчального закладу від 03.03.2025 року  
 № 306/1-ф.а.

2. Строк подання студентом проекту (роботи) 10.06.2025 р.

3. Вихідні дані до проекту (роботи) Технічна документація на основне обладнання технологічного циклу очищення стоків. Подача насосної установки  $Q=500$  м<sup>3</sup>/год; сумарний напір  $H=75$ м; щільність рідини, що перекачується,  $\rho=935$  кг/м<sup>3</sup>. Розробити частотно-регульований електропривод для надійної роботи знесолювальної установки для очищення оборотної води в усьому діапазоні регулювання швидкості. Забезпечити необхідні характеристики перехідних процесів та мінімальний час регулювання.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити). Опис технологічного процесу випарювання стоків. Характеристики основного обладнання технологічного циклу. Розрахунок потужності двигуна насосної установки. Огляд системи регулювання електропривода. Аналіз принципів керування швидкістю асинхронного двигуна. Вибір обладнання для роботи електроприводу насосного агрегата. Математичний опис механічних і швидкісних характеристик. Аналіз параметрів модернізованої системи. Розрахунок та аналіз енергетичних характеристик системи.

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

- 1) Актуальність теми, меда та задачі досліджень;
- 2) Схема технологічного процесу випарювання стоків;
- 3) Характеристики насосного устаткування;
- 4) Характеристики двигуна та перетворювача частоти;
- 5) Структурна схема асинхронного електропривода на основі векторного способу управління;
- 6) Функціональна схема перетворювача частоти ACS 600;
- 7) Математична модель теплообмінника;
- 8) Дослідження характеристик системи ПЧ-АД;
- 9) Висновки

6. Дата видачі завдання 01.04.2025 р.

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Пор. №	Назва етапів кваліфікаційної роботи бакалавра	Термін виконання етапів роботи			Примітки (плакати)
		Дата	Курс	Відсоток	
1	Опис технологічного процесу випарювання стоків. Характеристики основного обладнання технологічного циклу. Постановка завдань.	25.04.25	I	20%	Пл. 1
2	Розрахунок потужності двигуна насосної установки. Огляд системи регулювання електропривода.	08.05.25		30%	Пл. 2
3	Аналіз принципів керування швидкістю асинхронного двигуна.	16.05.25		50%	Пл. 3
4	Вибір обладнання для роботи електроприводу насосного агрегата. Математичний опис механічних і швидкісних характеристик.	23.05.25	II	60%	Пл. 4
5	Аналіз параметрів модернізованої системи. Дослідження характеристик системи ПЧ-АД	30.05.25		80 %	Пл. 5,6
6	Розрахунок та аналіз енергетичних характеристик системи.	02.06.25		90%	Пл. 7,8
7	Оформлення кваліфікаційної роботи бакалавра	10.06.25	III	100%	Пл. 9

Студент

(підпис)

Клименко Є.М.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Сільвестров А.М.

(прізвище та ініціали)

## РЕФЕРАТ

кваліфікаційної роботи "Модернізація електропривода установки для очищення оборотної води в замкненому циклі нафтопереробних заводі "

Робота містить 68 сторінок, 26 рисунків, 3 таблиці, 15 використаних джерел літератури.

Ключові слова: знесолювальна установка, насос, електродвигун, регулювання швидкості, частотний перетворювач.

Метою даної кваліфікаційної роботи є модернізація електропривода насосного агрегату електрознесолюваної установки, як однієї з найенергоємніших ланок цієї установки. В роботі вибраний більш сучасний електродвигун та розроблена нова більш надійна та ефективна система керування електроприводом на базі перетворювача частоти. Проведене дослідження роботи електропривода в статичному та динамічному режимах, побудовані та проаналізовані графіки зміни найбільш важливих параметрів. Розрахунок енергетичних параметрів системи показав доцільність її впровадження.

## ABSTRACT

Qualification work "Modernization of the electric drive of the installation for purification water in the closed cycle of oil refineries"

The work contains 68 pages, 26 figures, 3 tables, 15 sources of literature used.

Keywords: fastener, pump, electric motor, speed adjustment, frequency converter.

The purpose of this qualification work is to modernize the electric drive of the pumping unit of the electric installation as one of the most energy -intensifying units of this installation. A more modern motor has been selected in the work and a new more reliable and efficient electrical drive control system was developed based on the frequency converter. The study of the operation of the electric drive in static and dynamic modes, the schedules of changes in the most important parameters were constructed and analyzed. The calculation of the energy parameters of the system showed the feasibility of its implementation.

## ЗМІСТ

Вступ .....	6
1. ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА .....	7
1.1 Опис технологічного процесу випарювання стоків .....	7
1.2 Характеристика основного обладнання технологічного циклу .....	13
1.3 Розрахунок потужності двигуна насосної установки.....	14
1.4 Огляд системи регулювання електропривода .....	15
2. ВИБІР ОБЛАДНАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ ТА АНАЛІЗ СТАТИЧНИХ РЕЖИМІВ ЕП .....	19
2.1 Принципи керування асинхронним двигуном .....	19
2.2 Вибір електродвигуна та перетворювача частоти.....	37
2.3 Визначення параметрів системи електропривода .....	41
2.4 Складання схеми заміщення та побудова механічних і швидкісних характеристик .....	44
2.5 Розрахунок енергетичних параметрів системи .....	51
3. ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМИ ЕП .....	55
3.1 Розрахунок коефіцієнтів і параметрів математичної моделі .....	55
3.2 Розробка математичної моделі .....	56
3.3 Моделювання пускових режимів у замкнутій системі .....	60
ВИСНОВКИ .....	66
ВИКОРИСТАНА ЛІТЕРАТУРА .....	67
ДОДАТКИ .....	69

## ВСТУП

В наш час в умовах швидкого розвитку науково-технічного прогресу істотного значення набуває автоматизований електропривод, що є головним елементом енергетичної основи механізації й автоматизації різних галузей промисловості.

Усі сучасні виробничі механізми приводяться в дію за допомогою автоматизованого електроприводу і головним елементом для перетворення електричної енергії в механічну являється електродвигун. Управління двигуном здійснюється перетворювальними і керуючими пристроями, за допомогою яких можна формувати потрібні статичні та динамічні характеристики приводу.

Успіхи в області силової напівпровідникової техніки, мікроелектроніки, систем автоматичного керування створюють необхідні передумови для вдосконалювання сучасного електропривода й значного розширення його функціональних і технічних можливостей, що дозволяє найбільш повно задовільнити всі технологічні вимоги, що ускладнюються, і забезпечити ефективну роботу виробничих машин і агрегатів.

Відомо, що електроприводи насосів знесолювальних установок, які входять в склад обладнання нафтопереробних заводів для очищення води від залишків нафтопродуктів, значно зношені, а використання старих типів двигунів є низькоефективними. Тому використання сучасних електроприводів для надійної роботи насосів знесолювальних установок є досить **актуальною темою**.

**Метою роботи** є модернізація електропривода насосу електрознесолюваної установки, як однієї з найенергоємніших ланок цієї установки. Це призведе до економії електроенергії, підвищення надійності системи та виключення простоїв в її роботі. Для цього потрібно обрати більш сучасний двигун та розробити нову більш надійну та ефективну систему керування електроприводом насоса знесолювальної установки.

# 1 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

## 1.1 Опис технологічного процесу випарювання стоків

Нафтопереробний завод (НПЗ) має замкнутий, безповоротний цикл водообороту. В складі НПЗ повинен бути комплекс очисних споруд, призначенням яких є підтримка якості оборотної води. Мета цих споруд - очищення води від механічних домішок, залишків нафтопродуктів та зниження її солемісту [1]. Для цього в комплексі НПЗ будуються установки для термічної обробки та видалення безповоротних стічних вод, які називають стоками ЕЛОУ (що зменшує забруднення оточуючого середовища).

В технологічний процес випарювання стоків входять такі основні операції:

- попереднє нагрівання стоків ЕЛОУ;
- інтенсивний нагрів теплоносія в спеціальній печі;
- випарювання стоків і вивід густих залишків з установки.

Якщо нагрівати солону воду до температури її кипіння, то в ній будуть виділятися пари води, які при охолодженні перетворюються на прісну воду, а механічні домішки і солі будуть конденсуватися в залишках розсолу.

Випарювання стоків ЕЛОУ здійснюють по складній багатоступінчастій схемі [1]. Ця схема представлена на рисунку 1.1.

Теплотехнічна суть адіабативного закипання зводиться до наступного: стоки (солоня вода) під тиском нагріваються в регенеративних теплообмінниках і в теплообмінниках 1Т-9/1-4 до заданої температури, після чого надходять на перший щабель випару, тобто в перший випарник, де за рахунок зниження тиску миттєво закипають, віддаючи частину свого тепла у вигляді парів, які йдуть у відповідний, на даному щабелі, регенеративний теплообмінник, де віддаючи тепло більш холодному потоку стоків конденсуються.

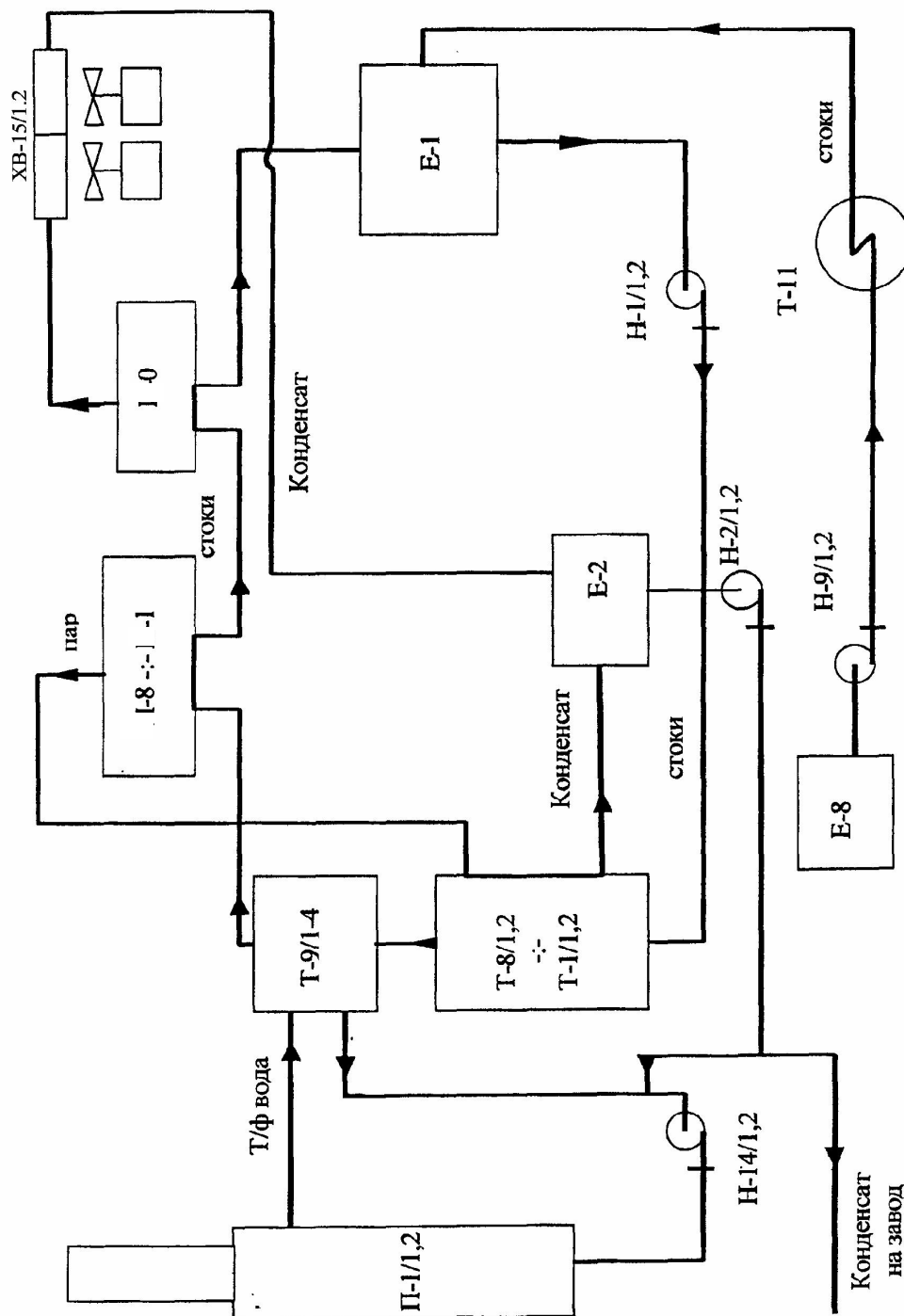


Рисунок 1.1 – Схема технологічного процесу очищення стоків

Циркулюючий сік, який закипів у випарнику, що став більш солоним від втрати пари, перепускається в наступний випарник, де за рахунок зниження тиску, знову миттєво закипає, віддаючи наступну частину свого тепла у вигляді парів.

Перша технологічна лінія установки має вісім регенеративних щаблів випарів в один нерегенеративний щабель І-О, тобто всі вісім випарників мають відповідні конденсатори пари, що виходить у випарниках при миттєвому скипанні, а випарник І-О не має свого конденсатора, так як для утилізації тепла в ньому потрібна була б не виправдано здорова поверхня теплообмінника, тому цей щабель є не регенеративним.

Негативний вплив на процес робить наявність у стоках розчиненого повітря (газу). З підвищенням температури в процесі упарювання відбувається деарація розчинених газів. Виділяючись із циркулюючого розчину, вони накопичуються в регенеративних теплообмінниках, блокуючи поверхню теплообміну.

Розглянемо більш детально вищеописані технологічні операції.

1) Підготовка й попередній нагрів стоків ЕЛОУ.

Зм'якшені стоки, після флотаторів стоків ЕЛОУ, насосами насосної станції промислових стоків очисних споруджень подаються на установку в ємність Е-8, що призначена для збору й додаткового відстою даних стоків. За необхідності, зм'якшені стоки можна подати в ємність Е-1 безпосередньо, минаючи блок підготовки і ємність Е-2. Стоки, що залишилися, з Е-8 насосами Н-9/1,2,3 подаються в Е-1, пройшовши попередньо при цьому трубний простір теплообмінника Т-11, де нагріваються до 50 °С за рахунок тепла конденсатора після сепараторів З-1/1,2.

2) Інтенсивне нагрівання теплоносія в печі.

Стоки ЕЛОУ, попередньо нагріті до температури 125 °С у регенеративних теплообмінниках, надходять на додаткове нагрівання в теплообмінники Т-9/ 1-4, де догріваються до температури 136 °С.

Стоки ЕЛОУ двома паралельними потоками проходять через групу теплообмінників Т-9/1-4 і нагріваються за рахунок тепла теплоносія (гарячої води), що циркулює по замкнутому циркуляційному контуру:

піч П-1/1,2 – теплообмінник Т-9/ 1-4 - насос Н-14/1,2.

Нагріті в теплообмінниках Т-9/1-4 стоки через регулятор тиску попередньо надходять у випарники И-8 – И-1 на випарювання.

Робота циркуляційного контуру для нагрівання теплоносія здійснюється в такий спосіб: спочатку зазначений циркуляційний контур заповнюється водою з лінії промтеплофікації заводських мереж. Вода насосами Н-14/1,2 подається на нагрівання в піч П-1/1,2, де нагріваються до температури 151<sup>0</sup>С. Нагрівання води в печі здійснюється за рахунок тепла паливного газу, що спалюється.

Горючий газ через регулятор витрат й регулятор тиску подається в піч П-1/1,2 для спалювання. Піч для нагрівання теплоносія являє собою вертикальний апарат, який обладнаний запобіжними клапанами.

Нагрітий теплоносій (вода) до температури 151<sup>0</sup>С із печі двома потоками надходить у межтрубний простір теплообмінників Т-9/1,2, де через стінки трубного пучка віддає своє тепло стокам.

Теплоносій з теплообмінників Т-9/1,2 надходить у теплообмінники Т-9/3,4, де також нагріває циркулюючі там стоки.

Теплоносій з теплообмінників Т-9/3,4 надходить на вхід циркуляційних насосів Н-14/1,2, якими знову направляється в піч на догрівання. У такий спосіб здійснюється нагрівання в печі теплоносія циркулюючого по замкнутому контуру. Тиск на виході насосів Н-14/1,2 у циркуляційному контурі підтримується в межах 7,5 кг/см<sup>2</sup>, а на вході цих насосів при температурі 132<sup>0</sup>С – у межах 3,4 кг/см<sup>2</sup>.

На виході зі змійовика печей П-1/1,2 установлені по два запобіжних клапана, призначених для захисту від перевищення тиску в печі й у корпусі теплообмінника Т-9/ 1-4.

Тиск води в циркуляційному контурі контролюється манометрами, що установлені на лінії повернення води на вході насосів Н-14/1,2.

### 3) Випарювання стоків.

Вихідні стоки з температурою  $100^{\circ}\text{C}$  із ємності Е-1 циркуляційними насосами Н-1/1,2 направляються двома потоками на нагрівання послідовно в теплообмінники Т-1/1,2 – Т-8/1,2 випарного каскаду, при цьому нагріваючись до температури  $136^{\circ}\text{C}$ . Нагрівання стоків у теплообмінниках Т-1/1,2 – Т-8/1,2 відбувається за рахунок регенеративного тепла пари вторинного закипання з випарників И-1 – И-8 відповідних щаблів випару.

Один потік проходить через трубний простір теплообмінників Т-1/1,2 – Т-8/1,2, де нагрівається до температури  $136^{\circ}\text{C}$  за рахунок тепла пари вторинного скипання випарників И-1 – И-8.

Після цього один потік направляється в простір теплообмінника Т-9/3,4, де нагрівається до температури  $136^{\circ}\text{C}$ , за рахунок тепла теплоносія, що надходить із міжтрубного простору теплообмінників Т-9/1,2.

Далі стоки надходять в простір теплообмінників Т-9/1,2, де нагріваються до температури  $151^{\circ}\text{C}$  за рахунок тепла теплоносія, що надходить у міжтрубний простір даного теплообмінника після нагрівання його в печах П-1/1,2.

Нагріті в теплообмінниках Т-9/1,2 до температури  $136^{\circ}\text{C}$  стоки через регулятори тиску надходять послідовно у випарник И-8.

У випарниках И-8 – И-0 відбувається адіабатичне випаровування стоків за рахунок різниці тисків і температур у випарниках і стоках, що надходять у них на упарку. При чому температура стоків, що входять у кожний з випарників на  $5^{\circ}\text{C}$  вище температури кипіння в даних випарниках.

Стоки проходять випарний каскад від И-8 до И-1, де температура стоків у кожному наступному випарнику знижується на  $5^{\circ}\text{C}$ , олоджуючись при цьому від  $136^{\circ}\text{C}$  до  $105^{\circ}\text{C}$ . Пар, що виділяється при цьому зі стоків, з випарників надходить у відповідні теплообмінники для нагрівання

циркулюючих у них стоків. У випарених стоках від випарника до випарника збільшується концентрація солей.

Далі стоки з випарника И-1 надходять у випарник И-0, де відбувається їх додаткове випарювання. Пара, що зконденсувалася, з теплообмінників Т-1/1,2 – Т-8/1,2 надходять у сепаратори З-1/1,2. Після сепараторів паровий конденсат частково надходить у повітряні холодильники ХВ-15/1,2 на охолодження, а частково в теплообмінник Т-11, де остудившись до 70<sup>0</sup>С надходить у ємність Е-2 для збору конденсату. Охолоджений у ХВ-15/1,2 до 90<sup>0</sup>С конденсат надходить у ємність Е-2.

У випадку припинення подачі стоків на установку з очисних споруджень для розігріву системи при виході установки на режим передбачена лінія подачі конденсату з виходів насосів Н-2/1,2 у спеціальну ємність Е-Е. По цій же лінії конденсат вертається на переробку в Е-1, якщо його якість не відповідає нормам технологічного режиму.

Паровий конденсат, що утвориться в ємності Е-1 надходить на охолодження в повітряні холодильники ХВ-19/1,2. Пара з випарника И-0 подається в апарати повітряного охолодження ХВ-15/1,2 на охолодження. Випарені стоки з випарника И-0 збираються в Е-1, де змішуються зі свіжими стоками, і циркуляційними насосами Н-1/1,2 знов надходять в теплообмінники Т-1/1,2 – Т-8/1,2 для нагрівання.

Для підтримки постійної й припустимої концентрації солей у системі схемою передбачена безперервна продувка солей по стоках :

теплообмінники Т-1/1,2 – Т-8/1,2 – теплообмінник Т-9/1,2 – випарники И-8 – И0 – ємність Е-1 – насоси Н-1/1,2.

Продувка здійснюється разом з найбільш концентрованими стоками, а саме з випарника И-0. Ці стоки (густа ропа) з випарника И-0 викачуються за установку у спеціально відведене місце.

## 1.2 Характеристика основного обладнання технологічного циклу

В складі даної установки використовується різнопланове обладнання. Сюди входять насоси, випарники, теплообмінники, печі й повітряні холодильники [2].

Насоси призначені для переміщення рідин і надання їм енергії. У даному випадку в установці застосовуються відцентрові насоси. Їх велике поширення пояснюється досить високим ККД, компактністю й зручністю комбінування із приводними електродвигунами (ЕД).

Використовується насос типу 10НКУ-7-2 - відцентровий, горизонтальний, спірального типу, двоступінчастий. Із двигуном з'єднується за допомогою пружної втулочно-пальцевої муфти .

Технічна характеристика насоса 10НКУ- 7-2 (шифр за схемою Н-14/1,2)

Параметри насоса:

Продуктивність	$Q=500 \text{ м}^3/\text{год}$
Напір	$H=75 \text{ м}$
Швидкість обертання	$n=1500 \text{ об/хв}$
ККД	$\eta=0.64$

Для приведення в дію насоса раніше був встановлений електродвигун типу А-315 S2-4У3

Параметри ЕД:

Потужність	$P=160 \text{ кВт}$
Швидкість обертання	$n=1500 \text{ об/хв}$
Напруга живлення	$U=380 \text{ В}$

В технологічному циклі присутні також і інші типи насосів, які позначені на схемі технологічного процесу відповідними шифрами (таблиця 1.1).

Таблиця 1.1 – Характеристики насосного устаткування

№ з/п	Марка насоса	Шифр за схемою	Подача Q, м <sup>3</sup> /год	Висота напору Н, м	Потужність ЕД насоса Р, кВт	Швидкість обертання n, об/хв
1	СЕ1250/140	Н-1/1,2	1250	140	630	1500
2	ХО-90185ЕСД	Н-2/1,2	90	85	55	3000
3	Д-200/90	Н-3/1,2	100	22	37	1500
4	Х280/7, І-СД	Н-9/1,2	280	72	100	1500
5	Д- 320-50	Н-14/1,2	320	50	75	1450

Випарники призначені для випаровування стоків, у них відбувається адіабатичне скипання стоків за рахунок різниці тисків і температур у випарниках і в резервуарах, що надходять до них на упарку. При чому температура стоків, що надходять на кожний випарник, на 5 °С вище температури кипіння в даних випарниках. У теплообмінниках відбувається нагрівання стоків за рахунок тепла пари вторинного скипання випарника.

Печі - призначені для нагрівання продукту (теплоносія) за рахунок спалювання горючого газу в радіантних камерах.

Повітряні холодильники (ХВ) – призначені для конденсації (охолодження) парів, які не сконденсувалися в регенеративних теплообмінниках.

### 1.3 Розрахунок потужності двигуна насосної установки

Вибір електродвигуна має велике економічне значення, тому що від правильності його вибору залежать продуктивність робочої машини, енергетичні показники й надійність роботи всього електропривода.

Першою умовою вибору ЕД є відповідність між його потужністю й потужністю робочої машини (в даному випадку насоса). Для ЕП промислових установок варто вибрати найбільш простий по конструкції й керуванню двигун, надійний в експлуатації та який має високі техніко-

економічні показники. Разом з тим ЕД повинен повністю задовольняти вимогам технологічного процесу.

Найбільш доцільними щодо цього є асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором. Доволі просто виконується вибір ЕД, що працює в тривалому режимі з постійним навантаженням. Такий режим роботи і є характерним для електроприводу насосів знесолюваної установки.

Потужність на валу двигуна насоса можна розрахувати за відомою формулою:

$$P = \frac{Q \cdot H \cdot \rho \cdot g}{\eta_n \cdot \eta_n} \cdot 10^{-3} \cdot K_3 \quad (1.1)$$

де  $Q$  – подача насоса, м<sup>3</sup>/год, маємо  $Q=500$  м<sup>3</sup>/год;

$H$  – сумарний напір, маємо 75м;

$\rho$  – щільність рідини, що перекачується, маємо  $\rho=935$  кг/м<sup>3</sup>;

$g = 9,81$  м/с<sup>2</sup> – прискорення вільного падіння;

$\eta_n$  – ККД насоса (для насосів з тиском понад 40 кПа  $\eta_n=0,6-0,8$ );

$\eta_n$  – ККД передачі (приймаємо  $\eta_n = 1$ );

$K_3$  – коефіцієнт запасу, що враховує формули, які не підлягають розрахунку (для ЕД потужністю понад 150 кВт зазвичай приймають  $K_3=1,1$ ).

Підставляючи вхідні дані, отримуємо величину потужності

$$P = \frac{500 \cdot 75 \cdot 935 \cdot 9,81}{3600 \cdot 0,64 \cdot 1} \cdot 10^{-3} \cdot 1,1 = 160 \text{ кВт} .$$

#### 1.4 Огляд системи регулювання електропривода

У даний час в установці знесолювання, що розглядається в даній роботі, здебільшого використовують ручне або найпростіше автоматичне керування технологічним процесом, обладнання застаріле і потребує майже постійного технічного обслуговування.

Найбільш важливими ділянками процесів, що відбуваються у випарній установці, є випарний контур і контур печі. Параметрами регулювання

випарного контуру є тиск, витрата та стокова температура, від якої залежить кількість пари, утвореної в результаті випаровування стічних вод [2].

Для якісного ходу технологічного режиму необхідно постійно контролювати температуру циркуляційних стоків, при цьому треба підтримувати на заданому рівні тиск теплоносія (води) у трубному контурі. Для цього необхідно регулювати швидкість приводного електродвигуна насоса.

Найбільш відомим та ефективним з сучасних методів регулювання швидкості асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором (АД із КЗ-ротором), є регулювання швидкості зміною частоти живлячої напруги [5]. При такому регулюванні ковзання машини незалежно від діапазону регулювання підтримується порівняно малим, втрати у двигуні будуть невеликі, тому ККД системи достатньо високий. Враховуючи вищеописане, для підтримки заданого тиску теплоносія зупиняємося на частотному методі регулювання швидкості двигуна.

Визначимо необхідний діапазон регулювання:

$$\frac{H_1}{H_2} = \left( \frac{\omega_1}{\omega_2} \right)^2 \quad (1.2)$$

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{H_1 \cdot \omega_2^2}{H_2}} \quad (1.3)$$

Підставляючи в (1.3) із вхідних даних значення  $H_1$ ,  $H_2$ ,  $\omega_2$  одержуємо:

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{3,4 \cdot 1500^2}{7,5}} = 1003,4 \text{ об/хв}$$

Таким чином маємо діапазон регулювання:

$$D = \frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{1500}{1003,4} = 1,5:1 . \quad (1.4)$$

Безліч систем електропривода показує можливість ефективного регулювання кутової швидкості й продуктивності насоса. Однак розвиток

силової елементної бази для перетворювачів частоти – силових транзисторів, дає можливість реалізації систем регульованого ЕП на базі сучасних перетворювачів частоти.

Основними показниками роботи насосів є подача, напір і коефіцієнт корисної дії при оптимальних режимах роботи [3].

Дефіцит електроенергії і її висока вартість спричиняють необхідність проведення режиму економії й нормування при роботі насосів. Оцінка роботи устаткування виконується на підставі даних про споживання електроенергії й відомостей про обсяги стоків, що перекачуються за певний період. У таких умовах доцільне застосування регульованого ЕП, що дозволяє знижувати продуктивність насоса до потрібних величин без зайвих втрат потужності. Таким чином, можна зробити висновок, що більш ефективним і економічним методом є регулювання подачі рідини зміною частоти обертання робочого колеса насоса.

На рисунку 1.2 показане положення напірних характеристик насоса й трубопроводу відповідно при частотах обертання колеса  $n_1 > n_2$ . Тому що загальний опір трубопроводу не міняється й положення його характеристики буде незмінним при зменшенні частоти обертання робочого колеса, точка робочого режиму «А» буде переміщатися по характеристиці Q-H мережі, подача й напір насоса будуть зменшуватися.

Діапазон зміни частоти обертання робочого колеса складе:

$$d = \sqrt{\frac{H_1 - H_2}{H_1}}, \quad (1.5)$$

де  $H_1, H_2$  – необхідна верхня й нижня межа подачі стоків насосом відповідно

$$d = \sqrt{\frac{7,5 - 3,4}{7,5}} = 0,7,$$

Тобто маємо  $n_{\min} = 0,7n_{\max}$ .

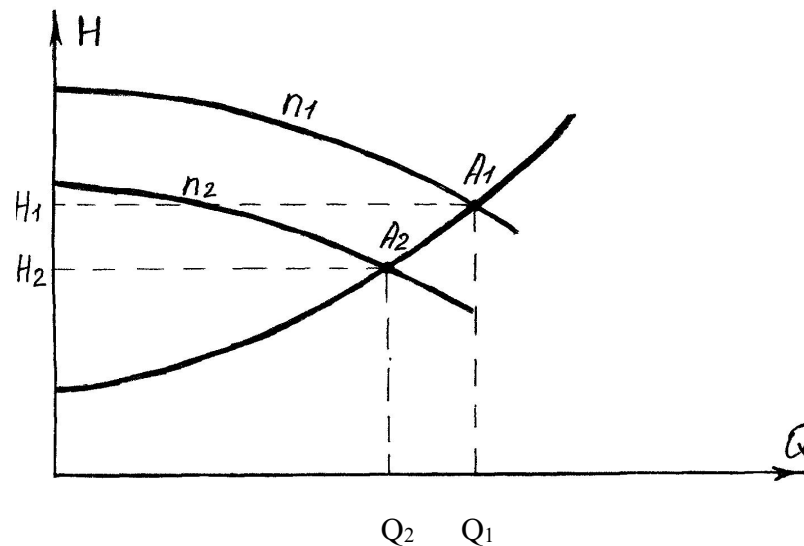


Рисунок 1.2 – Характеристики насоса й трубопроводу при регулюванні подачі зміною частоти обертання

Як видно з рисунка 1.2 і універсальних характеристик насосного агрегату 10НКУ-7-2, при регулюванні подачі насоса зміною частоти обертання робочого колеса відсутня непродуктивна втрата потужності. На цьому і буде базуватися подальша побудова системи керування.

#### **Висновок по розділу.**

Таким чином, основними задачами для даного розроблення є:

- розрахунок потужності та заміна двигуна насоса на більш сучасний;
- огляд систем регулювання швидкості та вибір типу модернізованої системи;
- вибір обладнання модернізованої системи;
- дослідження статичних та динамічних характеристик системи;
- розрахунок енергетичних параметрів системи.

## 2 ВИБІР ОБЛАДНАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ ТА АНАЛІЗ СТАТИЧНИХ РЕЖИМІВ ЕП

### 2.1 Принципи керування асинхронним двигуном

#### 2.1.1 Частотне керування асинхронним двигуном

Розглянемо принцип частотного керування, сутністю якого є взаємозалежне регулювання частоти  $f_1$  і напруги  $U_1$  на статорі двигуна [4].

Вхідною частотою  $f_1$  визначається швидкість обертання магнітного поля статора  $\omega_0$ :

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_1}{P}, \quad (2.1)$$

від якої залежить (з урахуванням величини ковзання  $S$ ) швидкість обертання ротора  $\omega$ . При цьому необхідно регулювати напругу  $U_1$  у функції частоти  $f_1$ , що можна пояснити наступним:

Електрорушійна сила (ЕРС)  $E_1$  обмотки статора пропорційна частоті і магнітному потоку  $\Phi$

$$E_1 = c\Phi \cdot f_1, \text{ тому } c\Phi = \frac{E_1}{f_1}, \quad (2.2)$$

при допущенні  $R_1 = 0$ ,  $X_1 = 0$ , будемо мати  $U_1 \approx E_1$ , тобто  $c\Phi = \frac{U_1}{f_1}$ .

Якщо змінювати тільки частоту  $f_1$ , то при її зменшенні магнітний потік буде збільшуватися, і двигун буде насичатися, а при її збільшенні буде зменшуватися потік і, отже, момент двигуна.

Для одержання постійного максимального моменту  $M_k = \text{const}$  необхідно підтримувати  $\Phi = \text{const}$ . У першому наближенні це досягається за умови  $U_1 / f_1 = \text{const}$ , точніше  $E_1 / f_1 = \text{const}$ .

При двозонному регулюванні швидкості АД:

у 1-ій зоні маємо при швидкостях  $0 < \omega < \omega_n$ ,  $0 < f_1 < f_{1n}$ , і  $U_1 / f_1 = \text{const}$ ;  $\Phi = \text{const}$ ;  $M_k = \text{const}$  (режим повного поля);

у 2-ій зоні маємо при швидкостях  $\omega_H < \omega < \omega_{\max}$ ,  $f_{1H} < f_1 < f_{1\max}$ ,  $U_1 = U_{1H} = \text{const}$ ,  $\Phi \sim 1/\omega$ ,  $M \sim 1/\omega$  (режим ослаблення поля).

Для оптимального використання АД при частотному керуванні необхідно регулювати напругу у функції частоти і навантаження так, щоб зберігати постійною перевантажувальну здатність  $M_K/M = \text{const}$ . Цій умові відповідає загальна залежність:

$$\frac{U_1}{U_{1H}} = \frac{f_1}{f_{1H}} \cdot \sqrt{\frac{M}{M_H}}. \quad (2.3)$$

Окремі випадки цієї залежності:

- постійний момент  $M = M_H = \text{const}$ ,  $U_1 / f_1 = \text{const}$ ;
- вентиляторний момент  $M \sim \omega_2$ ,  $U_1 / f_1 = \text{const}$ ;
- постійна потужність  $P = \text{const}$ ,  $\frac{U_1}{\sqrt{f}} = \text{const}$ .

Частотне керування, засноване на взаємозалежному регулюванні частоти  $f_1$  і напруги  $U_1$  живлення АД по одному з приведених вище закону, називають скалярним керуванням. У скалярних регуляторах оперують з діючими значеннями реальних струмів і напруг АД. Скалярне керування забезпечує задовільні характеристик статичних і "повільних" перехідних режимів електропривода в обмеженому діапазоні регулювання до 1:10, що виявляється достатнім для більшості загальпромислових електроприводів. Більш прогресивним методом частотного керування АД, що забезпечує високу якість статичних і динамічних характеристик електропривода в широкому діапазоні регулювання, є векторне керування [4].

### 2.1.2 Векторне керування асинхронним двигуном

Векторне керування припускає взаємну орієнтацію векторів струму і потоку (орієнтація по полю) АД в процесі регулювання. При цьому контролюються величина і фазовий кут моментобрауючої (активної) і потокообрауючої (реактивної) складових струму статора. Для аналізу і синтезу алгоритмів векторного керування використовується двохфазная

модель узагальненої електричної машини і математичний апарат координатних і фазних перетворень перемінних. Векторне керування застосовується у високодінамічних широкорегульованих електроприводах складних виробничих машин і механізмів. Для реалізації частотного керування в складі електропривода використовуються силові напівпровідникові перетворювачі частоти.

Створення електроприводів змінного струму, які за своїми динамічними регульовальними властивостями не поступаються електроприводу постійного струму, стало можливим завдяки розвитку теорії векторного керування машинами змінного струму, а також успіхам в технології створення силових напівпровідникових пристроїв у швидкодіючих перетворювачах частоти і мікропроцесорної техніки для реалізації складних алгоритмів керування [4].

Векторне керування передбачає використання в якості керуючої дії асинхронної машини вектора напруги (струму) статора або ротора. При цьому регулюються амплітуда і фаза, отже, і частота напруги (струму) перетворювача, що живить електричну машину. Використання векторного керування дає змогу забезпечити незалежне регулювання магнітного потоку двигуна і його моменту аналогічно, як для машин постійного струму з незалежним збудженням. Однак, на відміну від двигуна постійного струму, де ортогональність векторів основного магнітного потоку та якорної магніто-рушійної сили жорстко фіксується в просторі за допомогою колектора, електродвигун змінного струму потребує зовнішнього керування просторовим положенням векторів магнітного потоку і машинорушійної сили (МРС) ротора. Без такого керування кут між цими векторами змінюється в перехідних режимах і викликає їх складну взаємодію і коливальну перехідну функцію моменту двигуна. Системи керування електроприводами змінного струму, що здійснюють безпосереднє просторове регулювання положення вектора струму відносно положення вектора

потокозчеплення, називаються системами векторного керування, в яких використовують принцип орієнтування за полем машини.

На базі класичної теорії роботи асинхронних двигунів у встановленому режимі розглянемо, як керуванням величини струму статора може бути здійснене пряме керування моментом двигуна [4].

На рис. 2.1 приведена звичайна схема заміщення асинхронного двигуна.

...

### Рисунок 2.1 – Схема заміщення АД

У схемі маємо такі позначення:

$R_1, R_2$  – активні опори обмоток статора і ротора;

$x_1 = w_0 \cdot L_1; x_2 = w_0 \cdot L_2; x_m = w_0 \cdot L_{12}$ ; – індуктивні опори розсіювання статора, ротора і намагнічування;

$S$  – величина ковзання.

Відомо, що електромагнітний момент АД через параметри схеми заміщення визначається виразом:

$$M = 3 \frac{U_2 \cdot I_2}{\omega_0}, \quad (2.4)$$

де  $U_2$  – індукована напруга ротора.

Параметри ротора на схемі рис. 2.1 приведені до статора через відношення кількостей ефективних провідників обмоток.

Для встановлення зв'язку струму  $I_1$  статора з моментотворюючими  $I_2$  і  $U_2$  роторного ланцюга використовують модифіковану схему заміщення АД

рис. 2.2, в якій за рахунок вибору коефіцієнта приведення  $a = \frac{L_{12}}{L_2}$  індуктивний опір  $x_2$  наближається до нуля і  $U_2 = E_2$ .

Рисунок 2.2 – Приведена схема заміщення АД

Нові параметри схеми:

$$x'_1 = \omega \left( L_1 - \frac{L_{12}^2}{L_2} \right); \quad x'_{\mu} = \omega \cdot \frac{L_{12}^2}{L_2};$$

$$R'_2 = \left( \frac{L_{12}}{L_2} \right)^2 \cdot R_2; \quad E'_2 = E_2 \cdot \frac{L_{12}}{L_2}.$$

Струм статора  $I_1$  в схемі рис. 2.2 розділений на дві складові:

$I_{1M}$  – утворюючий момент;

$I_{1\psi}$  – утворюючий потік ротора.

$$I_{1M} = -I_2 \frac{L_2}{L_{12}} \quad (2.5)$$

$$E_2 = -\omega_0 \cdot \psi_2 \quad (2.6)$$

$$I_{1\psi} = -\frac{E_2}{\omega_0 \cdot L_{12}} \quad (2.7)$$

З рівнянь (2.6) і (2.7) отримуємо вираз  $\psi_2$  для потокозчеплення ротора:

$$\psi_2 = L_{12} \cdot I_{1\psi} \quad (2.8)$$

Вираз момента, отриманий з рівнянь (2.5), (2.6), (2.7):

$$M = 3 \frac{L_{12}}{L_2} \cdot L_{12} \cdot I_{1\psi} \cdot I_{1M} \quad (2.9)$$

показує, що його величина може керуватися двома ортогональними складовими струму статора. Чітко простежується аналогія з машиною постійного струму – складова  $I_{1\psi}$  грає роль струму збудження, а  $I_{1M}$  – струму якоря.

Векторна діаграма рис. 2.3 показує взаємне орієнтування векторів напруг, струмів, ЕРС і струмозчеплення АД, в тому числі складові струму статора  $I_{1\psi}$  і  $I_{1M}$ .

Рисунок 2.3 – Векторна діаграма АД

З діаграми випливає:

$$I_{1m} = I_1 \cdot \cos \gamma.$$

Кут  $\gamma$  зв'язує дві складові струму статора.

Ще один вираз струму  $I_{1m}$  через  $E_2$ :

$$I_{1m} = -\frac{L_2}{L_{12}} \cdot E_2 \frac{S}{R_2} \quad (2.10)$$

Об'єднання виразів (2.7) і (2.10) встановлює зв'язок:

$$I_{1m} = \frac{L_2}{R_2} \cdot S \cdot \omega_0 \cdot I_{\psi} \quad (2.11)$$

і дозволяє визначити кут  $\gamma$  через параметри ротора і навантаження АД:

$$\operatorname{tg}\gamma = -\frac{R_2}{L_2} s\omega_0 = -\frac{1}{s\omega_0 T_p}, \quad (2.12)$$

де  $T_p$  – електромагнітна стала часу обмотки ротора. Кожному значенню ковзання  $S$  відповідає визначене співвідношення складових струму статора:

$$s\omega_0 = \frac{I_{1m}}{I_{1\psi}} T_p, \quad (2.13)$$

що свідчить про те, що струм статора та ковзання повністю визначають момент АД.

Аналіз двохфазної  $d - q$  моделі АД (тут  $d$  і  $q$  – ортогональна система координат ротора) показує, що розглянута вище концепція векторного керування встановленого режиму вірна і в умовах перехідних невстановлених режимів [4]. Орієнтація поля ротора АД в  $d - q$  змінних міститься в сполученні повздовжньої вісі  $d$  з вектором потоку ротора  $\psi_2$ . При цьому досягається повний збіг між  $i_{1q}$  та  $I_{1m}$ ,  $i_{1d}$  та  $I_{1\psi}$ ,  $\psi_{2d}$  та  $\psi_2$ , а також збіг кутів  $\psi_{2d}$  та  $\psi_2$ .

Синтез алгоритмів і систем векторного керування АД базується на його  $d - q$  змінних. Усі співвідношення і залежності для змінних встановленого режиму розповсюджується і на  $d - q$  змінні.

Векторне керування може бути реалізоване в електроприводах на базі АІС (автономних інверторів струму), так і на базі АІН ШІМ (автономних інверторів напруги з широтно - імпульсним моделюванням).

Одна з можливих структур асинхронного ЕП з вищерозглянутим векторним керуванням на основі АІН ШІМ представлена блок – схемою на рис. 2.4.

4

Рисунок 2.4 – Блок-схема асинхронного ЕП з векторним керуванням на основі АІН ШІМ

Система векторного керування складається з трьох основних функціональних частин:

БРЗ – блок, що здійснює регулювання змінних;

БОЗ – блок, що здійснює обчислення змінних;

БЗЗ – блок, що здійснює завдання змінних.

На вхід БРЗ поступають задаючі сигнали швидкості (або іншого параметру руху електропривода) і потоку, а також сигнали зворотнього зв'язку (з виходу БОЗ) – орієнтовані за полем значення складових струму статора, швидкості та потокозчеплення ротора. БРЗ містить набір регуляторів – потоку, момента, струму, на виході яких формуються також орієнтовані за полем сигнали завдання складових струму статора. БЗЗ здійснює фазові і координатні перетворення задаючих  $d - q$  змінних в систему трифазних сигналів керування широтно-імпульсним модулятором ШІМ.

Блок БОЗ обчислює поточні значення амплітудних і фазових параметрів  $d - q$  змінних АД, здійснюючи фазові і координатні перетворення реальних трифазних сигналів струмів і напруг АД, які поступають з виходів відповідних датчиків.

Координатні перетворення, які здійснюються блоком БОЗ, полягають в переході від реальних координат трифазної системи статора АД з вісями  $a, b, c$  до ортогональної системи координат ротора двофазної моделі АД з вісями  $d$  і  $q$ . Блок БОЗ здійснює зворотні перетворення от ортогональної  $d - q$  системи координат до трифазної системи координат.

Фазові перетворення в цих блоках забезпечують прив'язку фазових параметрів змінних в двох системах координат.

Число вимірюваних параметрів і точність вимірювань істотно впливають на вартість, якість характеристик та надійність роботи електропривода. При векторному керуванні АД необхідно контролювати хоча б дві з чотирьох, доступних для вимірювання змінних:

- струм статора АД,
- напруга на статорі АД,
- кутове положення ротора АД,
- кутова швидкість ротора АД.

Більш дешевими і простими є електроприводи, розімкнуті по швидкості, які не містять датчик кутової швидкості. Тут вимірюються лише напруги і струми на статорі двигуна. Частота обертання ротора  $\omega$  або її аналог ковзання  $S$  обчислюється в БОЗ по моделі, яка враховує типові усереднені параметри  $(R, X)$  АД. Недоліком розімкнутих ЕП є те, що при зміні температурних умов їх регульовальні властивості в зоні нулевих швидкостей можуть різко погіршуватися, таким чином діапазон регулювання може бути обмежений.

Для уникнення цього недоліку використовують більш складні замкнуті ЕП, які мають встановлений на валу двигуна датчик швидкості.



Математична модель двигуна у цьому випадку

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\psi_a^{(s)}}{dt} = \frac{1}{\Delta} \left( -R_s L_r \psi_a^{(s)} + R_s L_m \psi_a^{(r)} \right) + u_a^{(s)} \\ \frac{d\psi_b^{(s)}}{dt} = \frac{1}{\Delta} \left( -R_s L_r \psi_b^{(s)} + R_s L_m \psi_b^{(r)} \right) + u_b^{(s)} \\ \frac{d\psi_a^{(r)}}{dt} = \frac{1}{\Delta} \left( R_r L_m \psi_a^{(s)} + R_r L_s \psi_a^{(r)} \right) - \omega \cdot \psi_b^{(s)} \\ \frac{d\psi_b^{(r)}}{dt} = \frac{1}{\Delta} \left( R_r L_m \psi_b^{(s)} + R_r L_s \psi_b^{(r)} \right) + \omega \cdot \psi_a^{(s)} \end{array} \right. , \quad (2.14)$$

$$\text{де } \Delta = L_s L_r - L_m^2 .$$

Для розрахунків використовуємо дискретну систему, за допомогою якої відбувається перехід від значень в момент часу  $t_n$  до значень в момент часу  $t_{n+1}$ :

$$\left\{ \begin{array}{l} \psi_{a,n+1}^{(s)} = \psi_{a,n}^{(s)} + \frac{1}{\Delta t} \left( \frac{1}{\Delta} \left( -R_s L_r \psi_a^{(s)} + R_s L_m \psi_a^{(r)} \right) + u_a^{(s)} \right) + K_1 (I_a - \tilde{I}_a) \\ \psi_{b,n+1}^{(s)} = \psi_{b,n}^{(s)} + \frac{1}{\Delta t} \left( \frac{1}{\Delta} \left( -R_s L_r \psi_b^{(s)} + R_s L_m \psi_b^{(r)} \right) + u_b^{(s)} \right) + K_1 (I_b - \tilde{I}_b) \\ \psi_{a,n+1}^{(r)} = \psi_{a,n}^{(r)} + \frac{1}{\Delta t} \left( \frac{1}{\Delta} \left( -R_r L_m \psi_a^{(s)} + R_r L_s \psi_a^{(r)} \right) + \omega \cdot \psi_b^{(r)} \right) + K_2 (I_a - \tilde{I}_a) \\ \psi_{b,n+1}^{(r)} = \psi_{b,n}^{(r)} + \frac{1}{\Delta t} \left( \frac{1}{\Delta} \left( -R_r L_m \psi_b^{(s)} + R_r L_s \psi_b^{(r)} \right) + \omega \cdot \psi_a^{(r)} \right) + K_2 (I_b - \tilde{I}_b) \end{array} \right. , \quad (2.15)$$

де  $\Delta t = t_{n+1} - t_n$  дорівнює  $1/4$  періода ШІМ,

$I_a, I_b$  – виміряні струми статора,

$$\tilde{I}_a = \frac{1}{\Delta} \left( L_r \bar{\psi}_a^{(s)} - L_m \bar{\psi}_a^{(r)} \right),$$

$$\tilde{I}_b = \frac{1}{\Delta} \left( L_r \bar{\psi}_b^{(s)} - L_m \bar{\psi}_b^{(r)} \right) - \text{модельовані струми статора.}$$

Коефіцієнти  $K_1$  і  $K_2$  визначають ступінь корекції моделі по помилкам струмів. Для стійкості моделі обирають величини  $K_1 > 0$  і  $K_2 < 0$ .

Потім розраховуємо кут потоку ротора:

$$\varphi = \arctg(\psi_a^{(r)} + i\psi_b^{(r)}) \quad (2.16)$$

При його розрахунках використовується таблиця  $\arctg(x)$  для значень величини  $x = 0 \dots \pi/4$ .

Далі визначаються прекції векторів струму статора на осі d і q:

$$I_d = I_a \cos(\varphi) + I_b \sin(\varphi) \quad (2.17)$$

$$I_q = -I_a \sin(\varphi) + I_b \cos(\varphi) \quad (2.18)$$

$$\tilde{I}_q = -I_a \sin(\varphi) + \tilde{I}_b \cos(\varphi) \quad (2.19)$$

Величина  $I_q - \tilde{I}_q$  визначає знак і величину помилки швидкості. Вона поступає в ПІ-регулятор підстройки швидкості. На його виході отримуємо величину модельної швидкості  $\omega$ , яка входить в систему диференційних рівнянь моделі. Отримуємо, якщо швидкість ротора буде відрізнятися від значення  $\omega$ , ПІ-регулятор підстроює значення  $\omega$ , щоб різниця  $I_q - \tilde{I}_q$  була нульовою. В режимі роботи датчика швидкості значення  $\omega$  поступає з нього, а система рівнянь буде використовуватися лише для визначення орієнтації потоку ротора.

Величини  $I_d$   $I_q$  використовується у відповідних ПІ-регуляторах як значення зворотнього зв'язку, на виході ці регулятори формують компоненти вихідної напруги  $u_d^{(s)}$  і  $u_q^{(s)}$ , які потім по зворотнім формулам переводяться в стаціонарну систему координат:

$$u_a^{(s)} = u_d^{(s)} \cos(\varphi) - u_q^{(s)} \sin(\varphi) \quad (2.20)$$

$$u_b^{(s)} = u_d^{(s)} \sin(\varphi) + u_q^{(s)} \cos(\varphi) \quad , \quad (2.21)$$

потім по ним визначається номер сегмента (0...5) і величини  $T_1$ ,  $T_2$  для нового періода ШІМ.

ПІ-регулятор швидкості (в режимі керування швидкістю) отримує завдання з пульта або аналогового входу, а в якості зворотнього зв'язку бере величину швидкості  $\omega$ .

На виході видає завдання для регулятора  $I_q$ , яке по суті є завданням на момент  $M$ . Воно обмежено параметром струму  $0,1 \cdot I_{\max}$ , який разом із  $0,1 \cdot I_{xx}$  визначає максимальний момент, який розвиває двигун.

Коефіцієнт ослаблення  $K_{\text{осл}}$  змінює значення від деякого мінімуму до 1, і поступає з виходу ПІ-регулятора ослаблення поля, на вхід якого подається різниця  $U_{\max} - U_q$ . Пока величина  $U_q$  менше за  $U_{\max}$ , регулятор знаходиться в насиченні і  $K_{\text{осл}} = 1$ . Інакше регулятор знижує  $K_{\text{осл}}$ , підтримуючи значення напруги  $U_q$  постійним.

Напруга  $U_{\max}$  розраховується як максимальна напруга  $U_d$ , яку може видати інвертор, помножена на коефіцієнт використання напруги, що забезпечує запас по напрузі для роботи регуляторів струму:

$$U_{\max} = \frac{U_d}{\sqrt{3}} \cdot K_U,$$

значення  $K_U$  за замовченням приймається рівним 0,9.

Треба враховувати, що в режимі регулювання швидкості по моделі регулятор ослаблення поля може працювати нестабільно.

### 2.1.3 Принципи широтно-імпульсного керування і формування вихідної напруги в електроприводі

Основою перетворювача є автономний інвертор напруги (АІН), виконаний на цілком керованих IGBT - модулях. Спрощена схема трифазного інвертора напруги показана на рис 2.6.

Тут три фази навантаження (a, b, c), що підключаються до виходу перетворювача, з'єднані за схемою "зірка".

Прийнято розрізняти такі типи алгоритмів керування вентилями (залежно від режимів роботи АІН): з однократним протягом періоду переключенням кожного вентиля і з багаторазовими протягом періоду переключеннями кожного вентиля.

Розгляд методів формування вихідної напруги почнемо з першого з них.

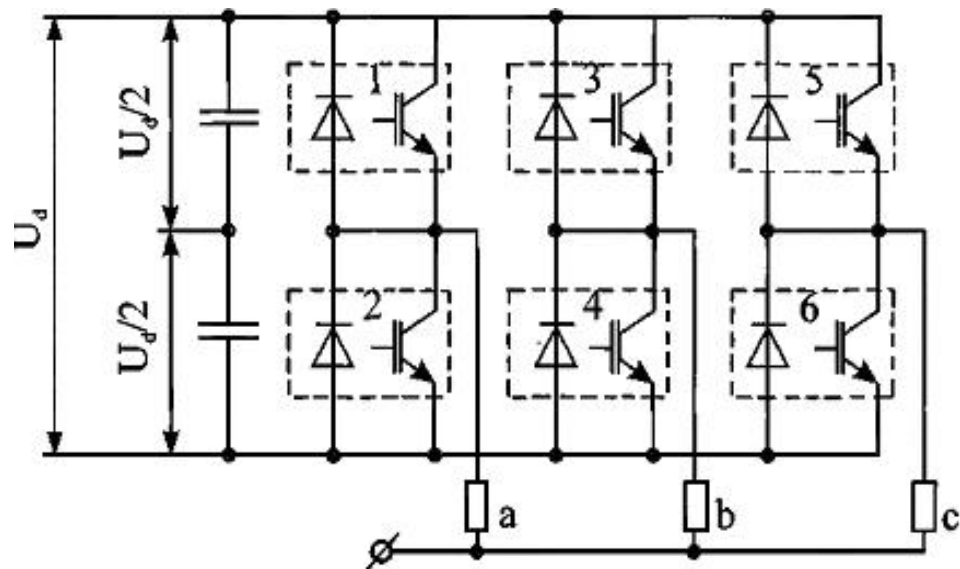


Рисунок 2.6 – Схема трифазного інвертора напруги

У кожній фазі два вентиля знаходяться у провідному стані по чергово, маючи зміщення по фазі на  $\pi$  рад, тоді інтервал провідності  $L$  кожного вентиля на протязі періоду складає також  $\pi$  рад. Вентилі ж сусідніх фаз будуть працювати зі зсувом фаз на  $2\pi/3$  рад. Таким чином, в будь-який момент часу кожна фаза навантаження буде підключатися до одного з полюсів джерела живлення, тому буде існувати ланцюг де протікає струм. В кожен момент часу будуть працювати три вентиля. Через кожні  $\pi/3$  рад здійснюється переключення вентилів однієї з фаз. Період складається із шести інтервалів тривалістю  $\pi/3$ , так званих періодів повторюваності, що характеризуються визначеним станом провідності вентилів і фаз навантаження.

Одна з фаз навантаження, яка підключається до полюса джерела живлення протягом періоду повторюваності, буде послідовно з'єднаною з двома іншими фазами, які з'єднані паралельно між собою і підключені до іншого полюсу джерела живлення.

Рис. 2.7 ілюструє підключення навантаження до джерела живлення на періоді повторюваності з робочим станом вентилів 2, 3, 6.

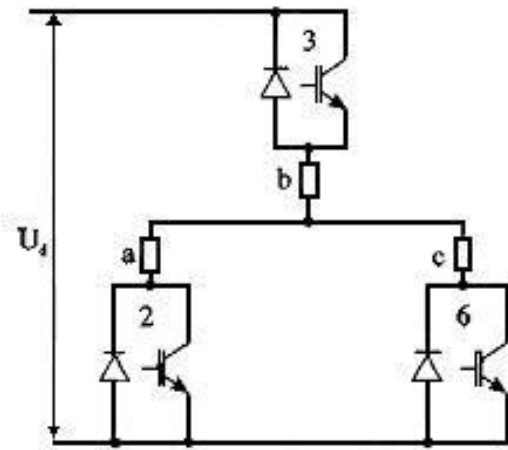


Рисунок 2.7 – Схема підключення навантаження з робочим станом вентилів 2, 3, 6

Представимо вихідні напруги інвертора у виді:

$$U = K \cdot U_d \quad (2.22)$$

де  $K$  – величина комутаційної функції відповідної напруги, яка рівна:  
для лінійних напруг

$$K = \pm 1, 0; \quad (2.23)$$

для фазних напруг

$$K = \pm 1/3, \pm 2/3. \quad (2.24)$$

Описаний алгоритм почергового керування вентилями забезпечує незмінний гармонійний склад вихідної напруги АІН.

При використанні алгоритмів з багаторазовими переключеннями вентилів багаторазовість припускає здійснення протягом періоду повторюваності поряд з черговим (зв'язаним зі зміною періодів повторюваності) переключенням вентилів одного чи декількох додаткових переключень. Тоді інтервалом провідності вважають сумарну тривалість його ввімкненого стану протягом періоду.

Для цілей широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) у якості додаткового використовується таке переключення, що може перевести АІН в один із двох нульових станів (1, 3, 5 чи 2, 4, 6). В результаті виникають нульові паузи на відповідних інтервалах комутаційної функції, таким чином можна

забезпечити регулювання діючого значення вихідної напруги в діапазоні від 0 до максимумального значення.

Якщо для регулювання необхідне поліпшення якості форми вихідної напруги, то можна використати більш складний алгоритм керування, заснований на застосуванні ШІМ, відомий як метод комутаційного вектора (Space Vector Modulation).

#### 2.1.4 Перетворювачі частоти для асинхронного електропривода

У частотно-регулюємому асинхронному електроприводі переважно застосовуються дволанкові ПЧ (перетворювачі частоти) із проміжною ланкою постійної напруги або струму на основі автономних інверторів (АІ). У склад такого перетворювача входять три основні блоки:

В - випрямлювач, керований (тиристорний) або некерований (діодний);

Ф - фільтр ланки постійної напруги (або струму);

АІ - автономний інвертор.

Для керування трифазними АД використовуються трифазні схеми ПЧ. Існують два види автономних інверторів, що відрізняються принципом дії, схемою, силовими елементами: автономний інвертор струму АІС і автономний інвертор напруги АІН.

- АІС має характеристики джерела струму, його вихідним регульованим параметром є струм АД.

- АІН - джерело напруги, його вихідним регульованим параметром є напруга на затискачах АД.

У якості АІС найбільше часто використовується мостовий тиристорний інвертор струму з діодами, що відсікають.

Класифікаційною ознакою схеми є вхідний індуктивний фільтр. Тиристори - силові ключі схеми, що здійснюють за рахунок почергового переключення інвертування постійного вхідного струму у змінний прямокутно-імпульсний вихідний струм. Значення вихідного струму АІС визначається величиною струму і програмою роботи тиристорів схеми. Регулювання вихідного струму здійснюється регулюванням вхідного струму.

Вихідна напруга АІС визначається вихідним струмом і параметрами навантаження (АД). Параметри комутації залежать від співвідношення величин ємності інвертора й індуктивності двигуна.

Сучасні АІН виконуються на основі цілком керованих силових напівпровідникових приладів - тиристорів GTO, що замикаються, або біполярних транзисторів з ізольованим затвором IGBT.

Класифікаційними ознаками схеми можна вважати наявність ємнісного вхідного фільтра і включених паралельно керованим ключам на транзисторах діодів зворотного струму. За рахунок почергового переключення вентилів постійна вхідна напруга перетворюється в змінну прямокутно-імпульсну вихідну напругу. Регулювання вихідної напруги АІН може здійснюватися двома способами:

- амплітудним (АР) за рахунок зміни величини вхідної напруги;
- широтно-імпульсним (ШІМ) за рахунок зміни програми переключення вентилів.

Через керовані ключі схеми протікає активна складова струму АД, через діоди – реактивна. Конденсатор фільтра є джерелом реактивної потужності, споживаної АД, через нього замикається змінна складова вхідного струму інвертора.

Спеціальні алгоритми ШІМ-керування АІН крім регулювання здійснюють також поліпшення гармонійного складу вихідної напруги, що забезпечує високий ступінь синусоїдальності струму АД.

У гальмовому режимі електропривода АІС працює в режимі випрямляча - змінюється полярність вихідної напруги при збереженні напрямку струму, а мережний керований випрямляч переходить у режим залежного інвертора.

Переваги даної структури:

- 1) реалізація двигунного і гальмового режимів здійснюється тим самим комплектом вентилів;

2) підвищена стійкість в аварійних режимах завдяки наявності індуктивності в контурі протікання струму;

3) відсутність спеціальних вимог до динамічних характеристик тиристорів АІС і можливість використовувати звичайні одноопераційні тиристири.

Недоліки схеми:

1) споживання з мережі реактивної потужності при регулюванні через роботу керованого випрямляча;

2) обмежений діапазон регулювання частоти  $f_1$  та швидкості) через частотну залежність ємнісного опору конденсаторів АІС, обмежена можливість реалізації алгоритмів ШІМ - керування;

3) досить тверді обмеження співвідношення потужності АІС і АД, неможливість роботи при відключеному АД, і в многодвигательному приводі з числом, що змінюється, АД;

4) несінусоїдальність струму АД і наявність комутаційних викидів у кривій вихідної напруги.

Розглянемо роботу електропривода на основі автономного інвертора напруги з ШІМ, який містить некерований діодний силовий випрямлювач и АІН ШІМ [14].

Регулювання частоти  $f_1$  і величини вихідної напруги  $U_1$  здійснюється в АІН за рахунок використання алгоритмів високочастотного ШІМ-керування. Частота ШІМ звичайно складає від 2 до 12 кГц, тобто в багато разів перевершує вихідну частоту АІН. Крива вихідної напруги являє собою високочастотну двухполярну послідовність прямокутних імпульсів. Частота імпульсів буде визначатися частотою ШІМ, ширина імпульсів модулюється по закону синуса протягом періоду. Тоді створюється практично синусоїдальна форма кривої вихідного струму.

До силових ключів АІН ШІМ пред'являються високи вимоги до швидкодії і зменшення динамічних втрат. У режимі гальмування електропривода АІН із режиму інвертування переводиться в режим

випрямляча. На вході інвертора полярність напруги буде зберігатися, а струм буде змінювати напрямок. Таким чином для реалізації гальмування схему електропривода необхідно доповнити силовими елементами (керованим випрямлювачем) і гальмівним резистором у ланці постійної напруги для здійснення електродинамічного гальмування. Необхідність включення додаткових силових елементів для реалізації гальмових режимів є недоліком розглянутої структури електропривода на основі АІН ШІМ.

Переваги структури:

- 1) широкий діапазон регулювання частоти і швидкості;
- 2) не критичність до потужності (у межах припустимої) і кількості підключених АД, можливість роботи в режимі холостого ходу, при відключених АД;
- 3) високе, близьке до одиниці значення коефіцієнта потужності мережі ( $\cos\phi$ ) у всіх режимах роботи;
- 4) синусоїдальність вихідного струму, плавне обертання АД на швидкостях, близьких до нульових;
- 5) високі динамічні показники електропривода, обумовлені високою швидкодією ШІМ-керування.

Порівняння двох структурних схем електроприводу показує, що електропривод на основі перетворювача частоти з АІН є більш універсальним, ніж електропривод на основі АІС. В якості перетворювачів частоти для систем регульованого ЕП можуть застосовуватися перетворювачі частоти як на базі автономних інверторів, так і безпосередні ПЧ.

## 2.2 Вибір електродвигуна та перетворювача частоти

Відповідно до розрахованої раніше потрібної потужності для роботи насосного агрегату 160 кВт й заданим його номінальним обертам вибираємо більш сучасний двигун типу АІР 315 S4 [6].

Таблиця 2.1- Характеристики двигуна типу AIP 315 S4

Параметр	Позначення та величина
Потужність	$P_H = 160 \text{ кВт}$
Напруга	$U_H = 380 \text{ В}$
Частота обертання поля статора	$n_o = 1500 \text{ об/хв}$
Ковзання номінальне	$S_H = 2,5\%$
ККД	$\eta = 94,9\%$
Коефіцієнт потужності	$\cos\varphi = 0,9$
Номінальний струм	$I = 288\text{А}$
Кратність максимального моменту	$\lambda_M = M_{\max}/M_{\text{НОМ}} = 2,0$
Кратність пускового моменту	$\lambda_{\Pi} = M_{\Pi}/M_{\text{НОМ}} = 2,1$
Кратність пускового струму	$k_i = I_{\Pi}/I_{\text{НОМ}} = 6,9$

В наш час широко відомими є перетворювачі частоти типу ACS 600 з принципово новою системою керування електроприводом, що забезпечує безпосереднє керування моментом.

У цій системі використовується математична модель двигуна, яка автоматично корегується за допомогою величин, вимірюваних датчиками струму й напруги й завдяки якій кожні 25 мікросекунд коректуються сигнали керування інвертором.

За рахунок високої частоти коректування моделі двигуна й сигналів керування інвертором підвищується швидкодія й точність обробки необхідних параметрів електропривода, значно розширюється діапазон регулювання швидкості обертання двигуна, покращується гармонійний склад струму двигуна, забезпечується підтримка заданого моменту навіть на дуже низькій (у тому числі нульовій) частоті обертання. Було прийняте рішення обрати саме такий тип перетворювача частоти (табл. 2.2).

Таблиця 2.2 – Параметри перетворювача частоти типу ACS 600

Параметр	Значення
Напруга живлення (трифазна)	380 +/-10% 400 +/-10% 415 +/-10%
Номінальний вихідний струм ( $I_H$ )	300 А
Номінальна потужність двигуна ( $P_H$ )	160 кВт
Частота	48...63 Гц
Коефіцієнт потужності ( $\cos\phi$ )	0,97
ККД при номінальній потужності	98%
Ступінь захисту	IP22

На рисунку 2.8 представлена функціональна схема перетворювача частоти ACS 600.

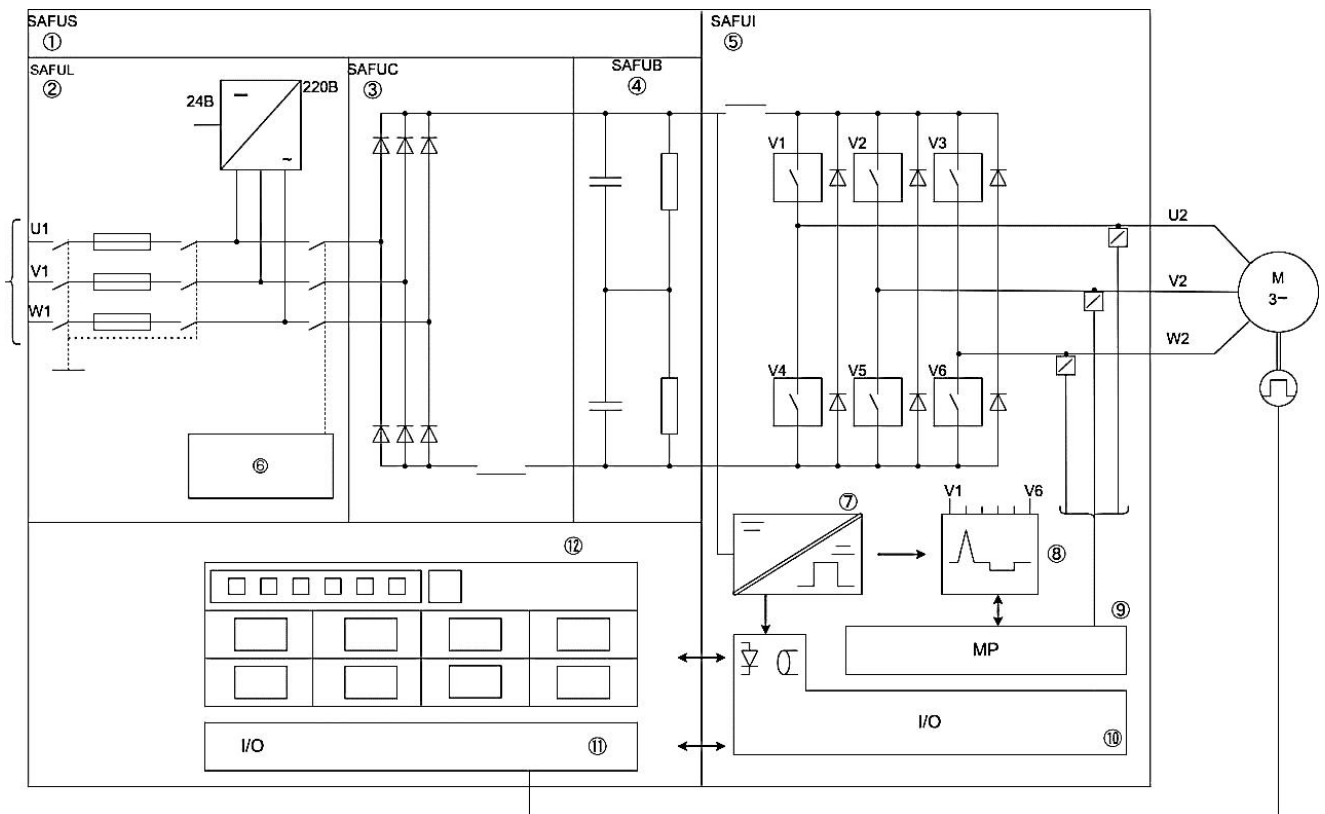


Рисунок 2.8 – Функціональна схема перетворювача частоти ACS 600

Дана схема містить такі блоки:

- 1 - блок джерела живлення,
- 2 - блок комутаційної апаратури,
- 3 - блок мережевого випрямляча,
- 4 - блок конденсаторної батареї,
- 5 - блок інвертора,
- 6 - плата керування силовим контактором,
- 7 - джерело оперативної напруги,
- 8 - плата імпульсних підсилювачів,
- 9 - плата центрального процесора,
- 10 - плата інтерфейсу,
- 11 - плата клемних колодок,
- 12 - плата керування.

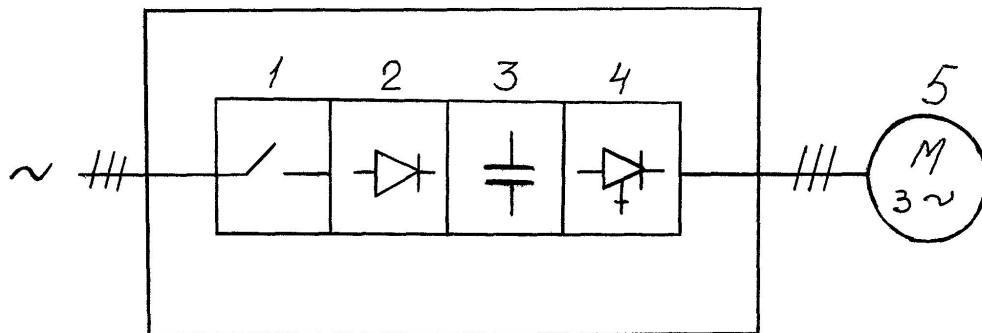


Рисунок 2.9 – Блок-схема силовій частини перетворювача частоти ACS600 із шестипульсним мережним випрямлячем

Рисунок 2.9 являє собою блок-схему силовій частини перетворювача частоти ACS 600 із шестипульсним мережним випрямлячем, де:

- 1 - блок комутаційної апаратури
- 2 - блок мережевого випрямляча
- 3 - блок конденсаторної батареї
- 4 - блок інвертора
- 5 - асинхронний двигун.

### 2.3 Визначення параметрів системи електропривода

Головними параметрами, якими можна характеризувати номінальний режим АД, є номінальні значення величини приведенного струму ротора  $I_{2н}$  та величини намагнічуючого струму  $I_{\mu н}$ . Приймаємо величину струму  $I_{\mu н}$  рівною струму холостого ходу  $I_{\mu х}$  (так як при розгоні двигуна від холостого ходу до номінального режиму його магнітний потік практично не змінюється).

Визначимо величини  $I_{2н}$  та  $I_{\mu н}$  використовуючи характеристики двигуна (табл. 2.1).

Визначимо номінальний струм статора [5]:

$$I_1 = \frac{P_{ном} \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot U_{1н} \cdot \cos \varphi_n}, \quad (2.25)$$

де  $P_{ном}$  – номінальна потужність,

$U_{1н}$  – номінальна напруга,

$\cos \varphi_n$  - номінальний коефіцієнт потужності

$$I_1 = \frac{160000}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,9} = 269,36 \text{ A}$$

Номінальна швидкість

$$\omega_n = \frac{100\pi(1 - S_n)}{2}, \quad (2.26)$$

де  $S_n$  – номінальне ковзання

$$\omega_n = \frac{100\pi(1 - 0,025)}{2} = 153,15 \text{ c}^{-1}$$

Номінальний момент

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n} \quad (2.27)$$

$$M_n = \frac{160000}{153,15} = 1,045 \cdot 10^3 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

Максимальний момент

$$M_{\max} = M_n \cdot \lambda_M = 1,045 \cdot 10^3 \cdot 2 = 2090 \text{ Н}\cdot\text{м}. \quad (2.28)$$

На підставі відомих рівнянь для критичного ковзання:

$$\frac{S_k}{S_H} = \lambda_M + \sqrt{\lambda_M - 1} \quad (2.29)$$

$$S_k = S_H (\lambda_M + \sqrt{\lambda_M - 1}) \quad (2.30)$$

$$S_k = 0,025(2 + \sqrt{2^2 - 1}) = 0,093,$$

можна одержати величину приведенного струму ротора

$$I'_{2H} = I_{1H} \cdot \cos \varphi_H \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda_M}{\lambda_M + \sqrt{\lambda_M^2 - 1}}}, \quad (2.31)$$

$$I'_{2H} = 269 \cdot 0,9 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 2}{2 + \sqrt{2^2 - 1}}} = 251 \text{ A}.$$

Визначаємо струм намагнічування

$$I_{\mu H} = I_{1H} \left( \sin \varphi_H - \frac{\cos \varphi_H}{\lambda_M + \sqrt{\lambda_M^2 - 1}} \right), \quad (2.32)$$

$$I_{\mu H} = 269 \cdot \left( 0,46 - \frac{0,9}{2 + \sqrt{2^2 - 1}} \right) = 52,45 \text{ A}.$$

Відтепер визначаємо параметри Т-подібної схеми заміщення (рис. 2.2).

Приведений активний опір ротора (при ковзанні  $S=1$ ):

$$R'_2 = \frac{(P_{ном} + \Delta P_{мех}) \cdot \lambda_n}{3(1 - S_H) \cdot (I'_{2k})^2} \approx \frac{\lambda_n (P_{ном} + \Delta P_{мех})}{3(1 - S_H) \cdot k_i^2 \cdot I_{1H}^2}, \quad (2.33)$$

де  $P_{ном}$  – номінальна потужність двигуна,

$\Delta P_{мех}$  – механічні втрати в обмотці статора,

$k_i$  – задана кратність пускового струму.

$$R'_2 = \frac{0,9 \cdot 160000 \cdot 1,01}{3(1 - 0,025) \cdot 36 \cdot 72554} = 0,042 \text{ Ом}$$

Якщо активний опір статорного кола невідомий, то можна його розрахувати

$$R_1 = \frac{U_{1ном}^2 (1 - S_{ном})}{2C_1 \cdot 1,01 \cdot P_{ном} \cdot \lambda_M \cdot \left(1 + \frac{C_1}{S_k}\right)}, \quad (2.34)$$

де  $C_1=1,02\div 1,06$  – величина коефіцієнту насичення магнітного кола,  
 $\lambda_M$  – співвідношення моментів для даного двигуна.

$$R_1 = \frac{380^2 \cdot (1 - 0,025)}{2 \cdot 1,06 \cdot 1,01 \cdot 160 \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot \left(1 + \frac{1,06}{0,093}\right)} = 0,011 \text{ Ом} .$$

Знаходимо величину  $X_k$  через вираз для критичного ковзання.

$$S_k = \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + X_k^2}} \quad (2.35)$$

$$X_k = \sqrt{\left(\frac{R'_2}{S_k}\right)^2 - R_1^2} \quad (2.36)$$

$$X_k = \sqrt{\left(\frac{0,042}{0,093}\right)^2 - 0,011^2} = 0,454 \text{ Ом}$$

Тоді можна розрахувати індуктивний опір контуру намагнічування:

$$X_\mu = \frac{U_{1ном}}{I_{\mu n} \cdot \sqrt{3}} \quad (2.37)$$

$$X_\mu = \frac{380}{52,45 \cdot \sqrt{3}} = 4,2 \text{ Ом} .$$

Визначаємо індуктивний опір статора та приведений індуктивний опір ротора:

$$X_1 = \frac{X_k}{2} = \frac{0,454}{2} = 0,227 \text{ Ом} , \quad (2.38)$$

$$X_2 = \frac{X_1}{C_1} = \frac{0,227}{1,06} = 0,222 \text{ Ом} . \quad (2.39)$$

Знаючи номінальний ККД та ковзання двигуна, визначаємо втрати в статорі, роторі та повні втрати в ньому.

Додаткові втрати в обмотці статора:

$$\Delta P_\sigma = 0,005 \cdot P_{ном} = 800 \text{ Вт} \quad (2.40)$$

Втрати в обмотці статора й додаткові втрати:

$$\Delta P_{1ном} = 3I_{1ном}^2 \cdot R_1 + 0,005 \cdot P_{ном} \quad (2.41)$$

$$\Delta P_{1ном} = 3 \cdot 269^2 \cdot 0,011 + 0,005 \cdot 160000 = 3188 \text{ Вт}$$

Механічні втрати:

$$\Delta P_{мех} = 0,01 \cdot P_{ном} \quad (2.42)$$

$$\Delta P_{мех} = 0,01 \cdot 160000 = 1600 \text{ Вт}$$

Втрати в роторному ланцюзі:

$$\Delta P_{2ном} = \frac{(P_{ном} + \Delta P_{мех}) \cdot S_H}{1 - S_H} = \frac{1,01 \cdot P_{ном} \cdot S_H}{1 - S_H} \quad (2.43)$$

$$\Delta P_{2ном} = \frac{1,01 \cdot 160000 \cdot 0,025}{1 - 0,025} = 4143 \text{ Вт.}$$

Сумарні втрати у двигуні:

$$\Sigma \Delta P_{ном} = P_{ном} \cdot \left( \frac{1 - \eta_H}{\eta_H} \right), \quad (2.44)$$

$$\Sigma \Delta P_{ном} = 160000 \cdot \left( \frac{1 - 0,93}{0,93} \right) = 12043 \text{ Вт.}$$

Втрати в сталевому осерді статора:

$$\Delta P_{1с.ном} = \Sigma \Delta P_{ном} - (\Delta P_{1ном} + \Delta P_{мех} + \Delta P_{2ном}) = 12043 - 8931 = 3102 \text{ Вт.} \quad (2.45)$$

## 2.4 Складання схеми заміщення та побудова механічних і швидкісних характеристик

При дослідженні статичних режимів застосовуються наступні припущення:

- характеристика намагнічування двигуна приймається кусочно-лінійною;

- ефект витиснення струму й активний опір ланцюга намагнічування не враховується;

- фазні обмотки машини вважаються симетричними.

Ці припущення вважають постійними параметри схеми заміщення й спрощують розрахункові формули, лише незначно знижуючи їхню точність (похибка зазвичай не перевищує 5%). Однак втрати в сталі й нелінійність характеристики намагнічування враховуються у випадках, коли ними не

можна зневажити: при аналізі енергетичних показників і нагрівання, а також при дослідженні характеристик двигуна в режимах, які пов'язані зі значним насиченням його магнітопроводу. Крім того, прийняте припущення про незмінність швидкості вала машини протягом періоду частоти живлячої напруги.

Істотний вплив на статичні характеристики двигуна можуть зробити параметри перетворювача частоти. Вводимо наступні припущення:

1. Перетворювач має канали незалежного регулювання напруги й частоти.

2. Перетворювач виконаний за схемою, що забезпечує вільний обмін реактивної енергії між перетворювачем і двигуном. У загальному випадку можлива робота системи ПЧ-АД в рушійному режимі паралельно з мережею.

3. Перетворювач не обмежує струмів і напруг двигуна в будь-якому режимі роботи. Характеристики вхід-вихід перетворювачів по частоті й по напрузі лінійні.

4. Процеси комутації в статичних перетворювачах не впливають на форму вихідної напруги (або струму у випадку інверторів струму) і на зовнішню характеристику перетворювача частоти не залежать від того, що прийнятно для частот близько 100 Гц і нижче.

5. Форма й амплітуда вихідної напруги перетворювача частоти не залежать від коефіцієнта потужності навантаження. Це припущення відноситься в основному до трифазних мостових інверторів напруги, що працюють з кутом провідності плеча мосту  $\theta_{\text{отк}}=120^\circ$  і подібні ім.

6. Вихідна напруга симетрична й синусоїдальна. З наведених припущень видно, що по суті вони зводять перетворювач до регульованого джерела синусоїдальної ЕРС (або струму) з необмеженою потужністю. Однак тільки таке перетворення дозволяє найбільш повно виявити граничні можливості асинхронної машини, досить просто одержати основні закономірності, знайти найбільш доцільні структури схем автоматичного керування.

Прийнятими припущеннями обумовлюється незмінність опорів схеми заміщення при даній частоті. Застосовуємо Т-подібну схему заміщення, що приведена на рисунку 2.10. Індуктивні опори  $X_0$ ,  $X_1$ ,  $X_2'$  відповідають величині номінальної частоти.

При проведенні аналізу і розрахунків використовуємо наступні позначення.

Відносна частота статора - відношення частоти струму статора до її номінального значення.

$$\alpha = \frac{f_1}{f_{1H}} \quad (2.46)$$

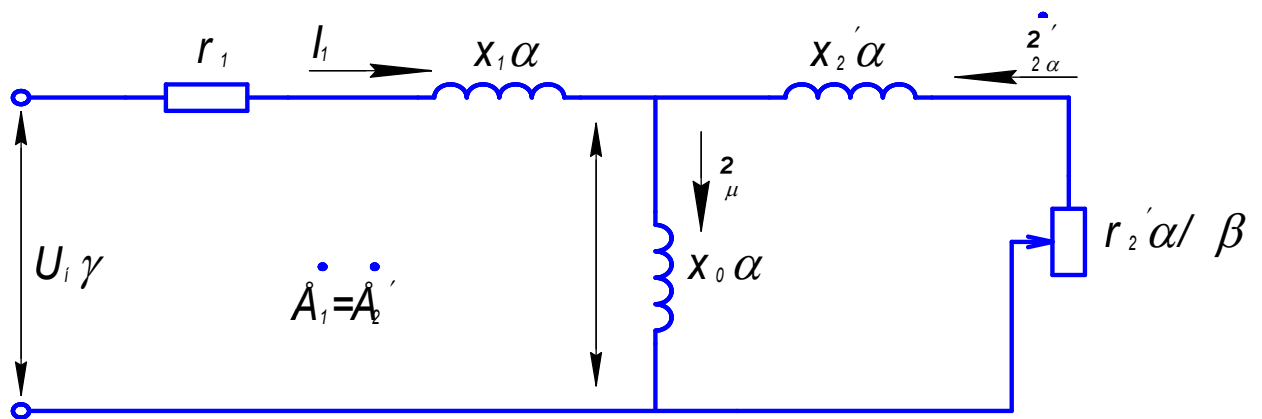


Рисунок 2.10 – Схема заміщення фази АД при частотному керуванні

Відносна частота ротора (параметр абсолютного ковзання) - відношення абсолютної величини ковзання  $\Delta \omega$  до синхронної швидкості обертання при номінальній частоті:

$$\beta = \frac{\Delta \omega}{\omega_{1H}} = \frac{\omega_1 - \omega}{\omega_{1H}} = \frac{f_2}{f_{1H}} \quad (2.47)$$

Параметр  $\beta$  використовується замість ковзання  $S$  і пов'язаний з ним співвідношенням:

$$S = \frac{\Delta \omega}{\omega_1} = \frac{f_2 \cdot f_{1H}}{f_1 \cdot f_{1H}} = \frac{\beta}{\alpha} \quad (2.48)$$

Відносна напруга буде рівною:

$$\gamma = \frac{U}{U_H} \quad . \quad (2.49)$$

Коефіцієнти розсіювання відповідно для статорного й роторного кола:

$$\tau_1 = \frac{X_1}{X_\mu} \quad , \quad (2.50)$$

$$\tau_2 = \frac{X_2}{X_\mu} \quad . \quad (2.51)$$

Тоді загальний коефіцієнт розсіювання

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_1 \tau_2 \quad . \quad (2.52)$$

Крім того, введемо позначення коефіцієнтів

$$b = r_1(1 + \tau_2) \quad (2.53)$$

$$c = x_\mu \cdot \tau \quad (2.54)$$

$$d = r_1/x_\mu \quad (2.55)$$

$$e = 1 + \tau_1 \quad . \quad (2.56)$$

Аналіз і розрахунки встановленого режиму приводиться в діючих значеннях величин. Таким чином, з розрахунку вищеприведеної схеми заміщення одержуємо:

- величину електрорушійної сили

$$E_{1\alpha} = E_{2\alpha} = U_H \gamma \alpha \sqrt{\frac{B(\beta)}{A(\alpha, \beta)}} \quad (2.57)$$

- величину магнітного потоку у повітряному зазорі

$$\Phi \alpha = \frac{U_H}{C_1 \cdot f_{1H}} \gamma \sqrt{\frac{B(\beta)}{A(\alpha, \beta)}} \quad (2.58)$$

- струм статора

$$I_{1\alpha} = U_H \cdot \gamma \sqrt{\frac{C(\beta)}{A(\alpha, \beta)}} \quad (2.59)$$

- приведений струм ротора

$$I'_{2\alpha} = U_H \cdot \gamma \cdot \frac{\beta}{\sqrt{A(\alpha, \beta)}} \quad (2.60)$$

- струм намагнічування

$$I_{\mu\alpha} = U_n \cdot \gamma \cdot \sqrt{\frac{D(\beta)}{A(\alpha, \beta)}} \quad (2.61)$$

- величину електромагнітного моменту двигуна:

$$M_\alpha = \frac{m_1 \cdot U_n^2}{\omega_{1H}} \cdot \gamma^2 \frac{r_2' \beta}{A(\alpha, \beta)} \quad (2.62)$$

У приведених нижче виразах приймаємо наступні позначення:

$$A(\alpha, \beta) = (b^2 + c^2 \cdot \alpha^2) \beta^2 + 2r_1 \cdot r_2' \cdot 2\beta + (d^2 + c^2 \cdot \alpha^2) \cdot r_2'^2 \quad (2.63)$$

$$B(\beta) = r_2' + x_2'^2 \beta^2 \quad (2.64)$$

$$C(\beta) = r_2' / x_\mu'^2 + (1 + \tau_2)^2 \beta^2 \quad (2.65)$$

$$D(\beta) = r_2'^2 / x_\mu'^2 + \tau_2^2 \beta^2 \quad (2.66)$$

$C1 = 4,44\omega_1 \cdot K\omega$  – величина конструктивної постійної фазної обмотки статора двигуна.

Частота обертання через коефіцієнти  $\alpha$  і  $\beta$ :

$$\omega = \omega_{1H}(\alpha - \beta) \quad (2.67)$$

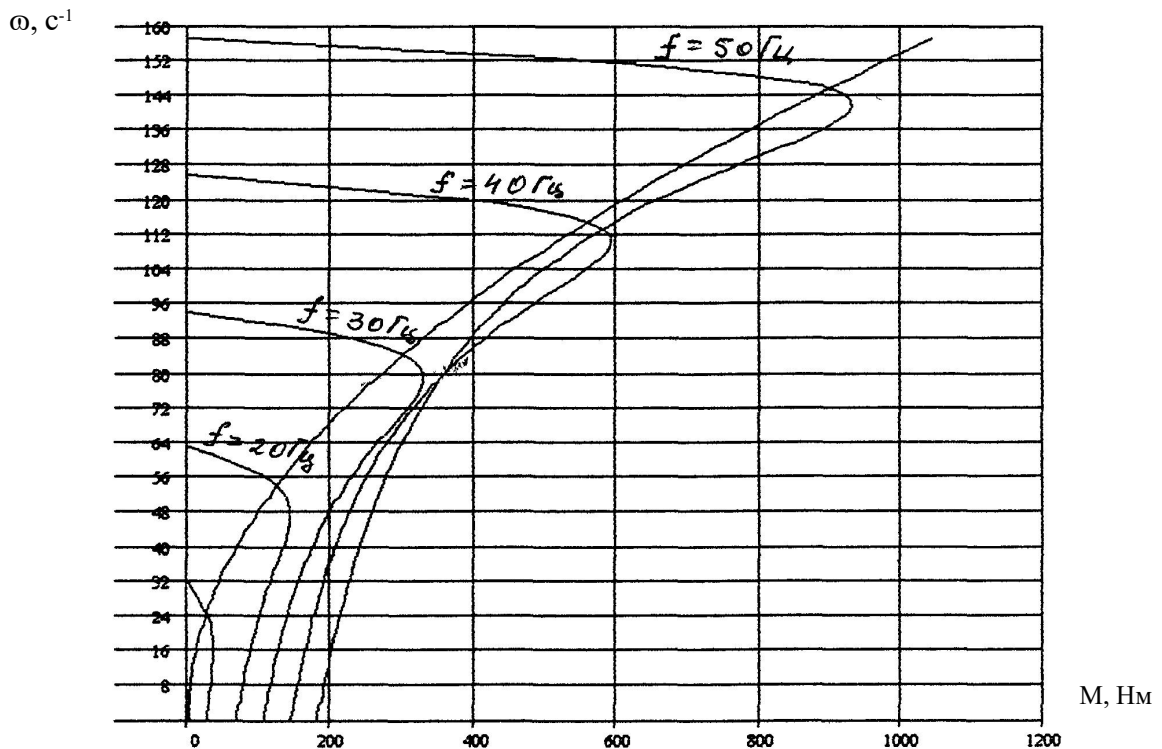
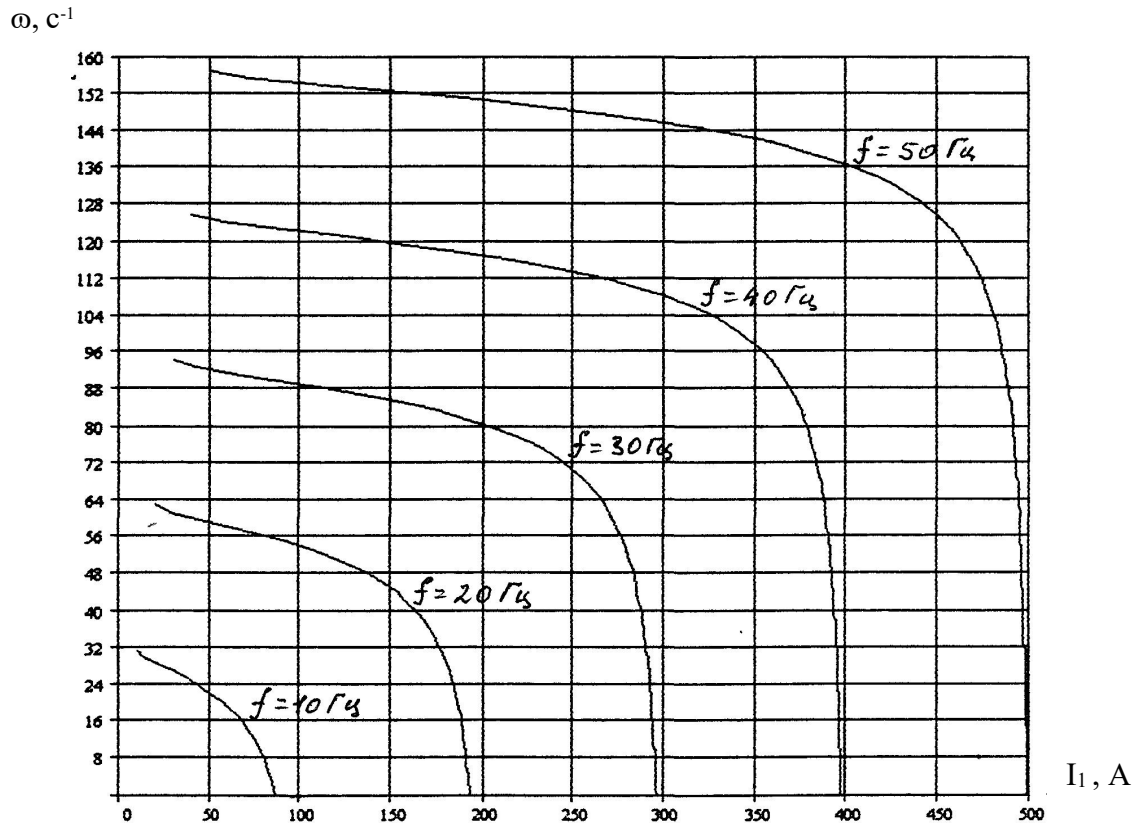
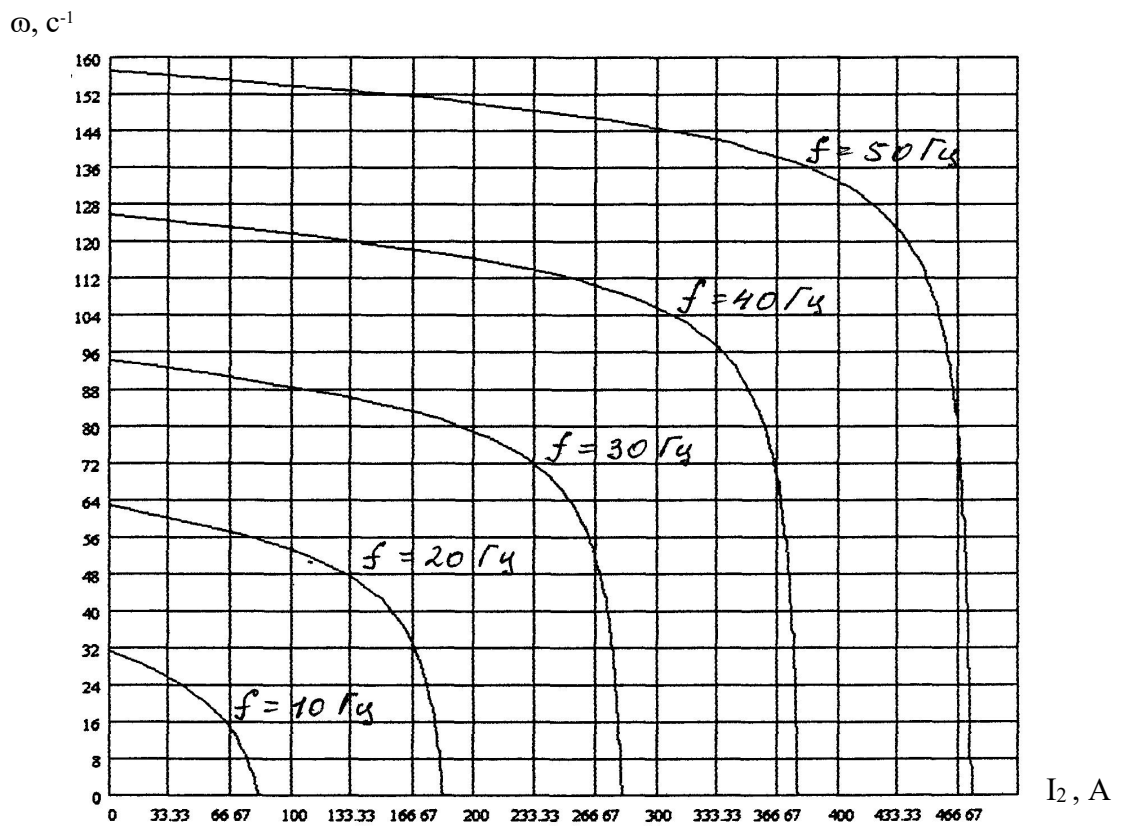


Рисунок 2.11 – Механічні характеристики системи ПЧ-АД  $M = f(\omega)$

Рисунок 2.12 – Струмова характеристика системи ПЧ-АД  $I_1 = f(\omega)$ Рисунок 2.13 – Швидкісна характеристика системи ПЧ-АД  $I_2 = f(\omega)$

## 2.5 Розрахунок енергетичних параметрів системи

При дослідженні енергетичних параметрів найбільш вагомими є показники втрат в мідних обмотках статора та ротора машини, а також втрати в сталевих осердях статора й ротора [5]. Також доцільно враховувати механічні втрати про роботі двигуна.

Втрати в мідній обмотці статора представляємо як суму втрат від струму ХХ (холостого ходу) та робочого струму. При цьому струм статора:

$$I_{1\alpha} = \sqrt{(1 + 2\tau_2)I_{2\alpha}^2 + I_{\mu\alpha}^2} \quad (2.68)$$

Втрати в мідній обмотці статора будуть рівні:

$$P_{e1} = 3k_1(1 + 2\tau_2)I_{2\alpha}^2 + 3r_1I_{\mu\alpha}^2, \quad (2.69)$$

якщо виразити відповідні частки втрат через загальні втрати в номінальному режимі, то можна отримати вираз:

$$P_{e1} = P_{e1n} \tau^2 + P_{e.o.n} \tau_\mu^2, \quad (2.70)$$

тут  $\tau = I_{2\alpha}' / I_{2n}'$  - величина відносного приведенного струму ротора,

$\tau_\mu = I_{\mu\alpha} / I_{\mu n}$  - величина відносного струму намагнічування,

$P_{e1n}'$ ,  $P_{e.o.n}$  - втрати в мідній обмотці статора в номінальному режимі.

Якщо враховувати відомі залежності окремих складових втрат від величин потоку, струму і частоти, то, представивши їх у відносних одиницях, усі втрати двигуна представляються виразом:

$$P_{em} = \rho_1 \tau^2 + \delta_{1(\alpha)} \varphi^2 + a_{e.o} \tau_\mu^2 \quad (2.71)$$

де  $P_{em} = P_{em} / P_n$  - величина відносних електромагнітних втрат,

$\rho_1 = a_{e1} + a_{e2}$  - величина коефіцієнту, що характеризує змінні втрати у мідних обмотках статора й ротора від величини струму  $I_{2\alpha}'$ ,

$\delta_{1(\alpha)} = a_{c.z} + a_{c.e}^2$  - величина коефіцієнту втрат у сталевому осерді статора,

де:

$a_{e1}, a_{e2}, a_{e0}, a_{c.z}, a_{c.e}$  - конструкційні коефіцієнти, величини яких лежать у межах

$$a_{e1} \approx 0,28 \div 0,32, a_{e2} \approx a_{e1}, a_{e0} = 0,02 \div 0,06, a_{C.2} + a_{C.B} = 0,22 \div 0,19.$$

Співвідношення цих коефіцієнтів  $a_{e2} / a_{C.2}$  залежить від характеристик сталевго осердя (марки сталі та товщини сталевих листів).

Відтепер можна розрахувати ККД двигуна з врахуванням енергетичних показників його роботи:

$$\eta = 1 - \frac{P_n'(\rho_1\tau^2 + \delta_{1(\alpha)}\varphi^2 + a_{e0}\tau_\mu^2)}{\mu \frac{\omega}{\omega_n} + P_n'(\rho\tau^2 + \delta_{1(\alpha)}\varphi^2 + a_{e0}\tau_\mu^2)} \quad (2.72)$$

де  $P_n' / P_{2n}' = P_n / M_n \omega_H$  – величина повних номінальних втрат, яка береться у частках від величини механічної потужності  $P_{2n}'$ ,

$\mu = M_\alpha / M_n$  – величина відносного електромагнітного моменту.

З літератури відомо, що величина механічних втрат двигуна залежить від його кутової швидкості  $\omega$  :

$$P_M = P_{M.H} (\omega / \omega_H)^n, \quad (2.73)$$

де  $n = 1 \div 1.5$ .

Якщо не враховувати ковзання, то можна записати

$$P_M \approx P_{M.H} (\omega_1 / \omega_n)^n = P_{M.H} \alpha^n \quad (2.74)$$

де  $\omega_1$  - кутова швидкість обертання магнітного поля статора.

Відтепер запишемо величину повних втрат двигуна у відносних одиницях

$$p = \rho_2\tau^2 + \delta_2(\alpha)\varphi^2 + a_{e0}\tau_\mu^2 + a_M\alpha^n \quad (2.75)$$

де  $\rho_2 = a_{e1} + a'_{e2}$  - величина коефіцієнту змінних втрат (тут враховуються додаткові втрати), величина  $a'_{e2} = 0,33$

$\delta_2(\alpha) = a'_{C.2} + a'_{C.B}\alpha^2$  - величина коефіцієнту втрат в сталевому осерді,

$a_M = P_{M.H} / P_H = 0,09 \div 0,06$  - величина коефіцієнту механічних втрат.

Запишемо повний вираз для механічного ККД, враховуючі вищеприведені формули:

$$\eta = 1 - \frac{P_H' (\rho_2 \tau^2 + \delta_2(\alpha) \varphi^2 + a_{e0} \tau \mu_2 + a_M \alpha^n)}{\mu_0 \frac{\omega}{\omega_H} + P_H' (\rho_2 \tau^2 + \delta_2(\alpha) \varphi^2 + a_{e0} \tau \mu^2 + a_M 2^n)} \quad (2.76)$$

або

$$\eta = 1 - \frac{P_H' (\rho_2 \tau^2 + \delta_2(\alpha) \varphi^2 + a_{e0} \tau \mu^2 + a_M \alpha^n)}{\mu_0 \frac{\omega}{\omega_H} + P_H' (\rho_1 \tau^2 + \delta_1(\alpha) \varphi^2 + a_{e0} \tau \mu^2)}, \quad (2.77)$$

де  $\mu = M_B / M_H$  - величина відносного моменту на валу двигуна, яка рівна  $\mu = \mu_B + \mu_0$ ,

тут  $\mu_0$  - відносний момент втрат двигуна, котрий враховує механічні й додаткові втрати у ньому.

$\varphi = \Phi_a / \Phi_H$  - величина відносного магнітного потоку двигуна.

Використовуючи отримані вище вирази для величин втрат, можна записати вираз для  $\cos \varphi$

$$\cos \varphi_{1L} = \frac{P_1}{S_1} = \frac{M_H \omega_H}{m_1 I_{1H} U_H} \cdot \frac{Q_1}{Q_2}, \quad (2.78)$$

де

$$Q_1 = \mu_B \frac{\omega}{\omega_H} + P_H' (\rho_2 \tau^2 + \delta_2(\alpha) \varphi^2 + a_{e0} \tau \mu^2 + a_M a^N), \quad (2.79)$$

$$Q_2 = \gamma \frac{\sqrt{(1 + 2\tau^2) \tau^2 + K_\mu^2 \tau_\mu^2}}{\sqrt{(1 + 2\tau^2) + K_\mu^2}}, \quad (2.80)$$

або

$$\cos \varphi_{1I} = \frac{M_H \omega_H}{m_1 \cdot I_{1H} U_H} \frac{Q_3}{Q_4}. \quad (2.81)$$

де

$$Q_3 = \mu_B \frac{\omega}{\omega} + P_H' (\rho_1 \tau^2 + \delta_{1(\alpha)} \varphi^2 + a_{e0} \tau \mu^2) \sqrt{(1 + 2\tau_2 + K_\mu^2)}, \quad (2.82)$$

$$Q_4 = \sqrt{(1 + 2\tau_2) \tau^2 + K_\mu^2 \tau_\mu^2}, \quad (2.83)$$

$$\text{де } K\mu = I_{\mu\text{H}} / I_2' = 0.26 \div 0.6 . \quad (2.84)$$

На підставі проведених пертворень та досліджень одержимо залежність величини  $\cos \varphi_{12}$  від величин кутів  $\alpha, \beta$  :

$$\cos \varphi_{12} = \frac{r_1 c(\beta) + \alpha r_2' \beta}{\sqrt{A(\alpha, \beta) \sqrt{C(\beta)}}} \quad (2.85)$$

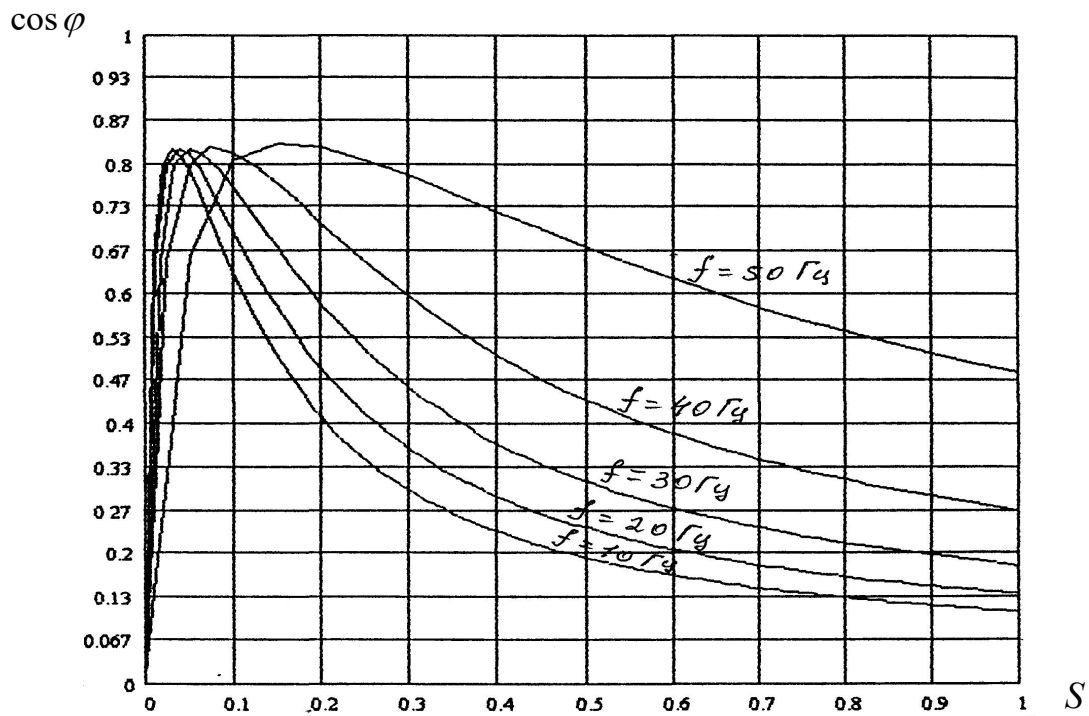


Рисунок 2.14 – Залежність коефіцієнта потужності від ковзання  $\cos \varphi = f(s)$

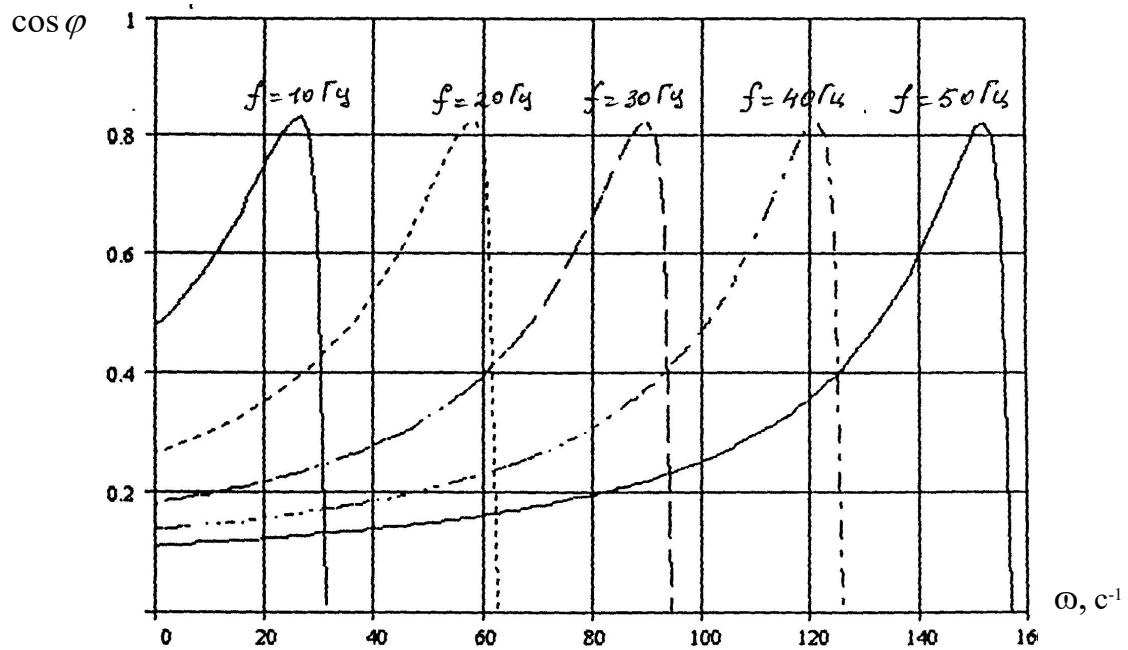


Рисунок 2.15 – Залежність коефіцієнта потужності від швидкості  $\cos \varphi = f(\omega)$

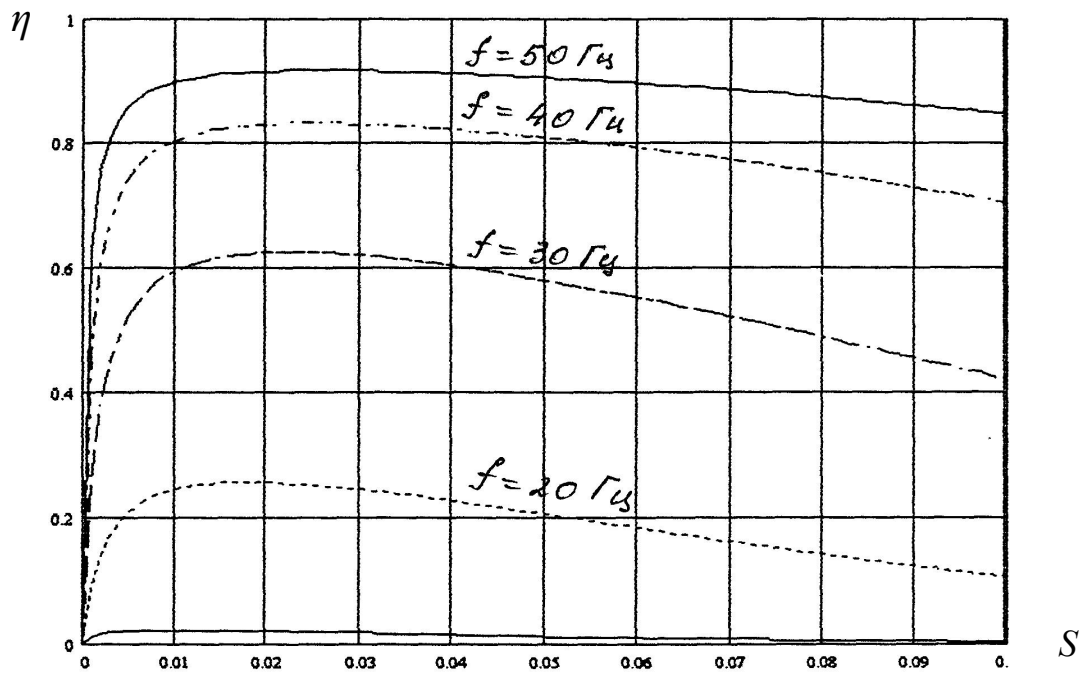


Рисунок 2.16 – Залежність ККД від ковзання  $\eta = f(s)$

### Висновок по розділу.

З графіків, побудованих за результатів досліджень, можна побачити, що найвищий коефіцієнт потужності  $\cos \varphi$  ми отримали на частоті 50 Гц, також на цій частоті маємо і найвищий коефіцієнт корисної дії.

### 3 ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМИ ЕП

#### 3.1 Розрахунок коефіцієнтів і параметрів математичної моделі

Розраховуємо момент інерції обраного двигуна за виразом

$$J = \frac{8750 P_n \cdot 10^{-3}}{(1500 \cdot (1 - S_n))^2}, \quad (3.1)$$

де  $P_n$  - номінальна потужність,

$S_n$  - номінальне ковзання.

$$J = \frac{8750 \cdot 160 \cdot 10^{-3} \cdot 10^3}{(1500 \cdot (1 - 0.025))^2} = 0.655 \text{ .}$$

Індуктивність контуру намагнічування

$$L_\mu = \frac{X_\mu}{100 \cdot \pi}, \quad (3.2)$$

де  $X_\mu$  - індуктивний опір контуру намагнічування ,

$$L_\mu = \frac{4,2}{100 \cdot 3,14} = 0,013 \text{ мГн.}$$

Індуктивність розсіювання статора

$$L_1 = \frac{X_1}{100 \cdot \pi}, \quad (3.3)$$

де  $X_1$  - індуктивний опір статора,

$$L_1 = \frac{0,227}{100 \cdot 3,14} = 7,2 \cdot 10^{-4} \text{ Гн.}$$

Індуктивність розсіювання ротора

$$L_2 = \frac{X_2}{100 \cdot \pi}, \quad (3.4)$$

де  $X_2$  - наведений індуктивний опір ротора

$$L_2 = \frac{0,222}{100 \cdot 3,14} = 7 \cdot 10^{-3} \text{ Гн.}$$

повна індуктивність статора

$$L_s = L_1 + \frac{3}{2} \cdot L_\mu, \quad (3.5)$$

де  $L_\mu$  - індуктивність контуру намагнічування.

$$L_s = 0.00072 + \frac{3}{2} \cdot 0.013 = 0.02 \text{ мГн.}$$

Повна індуктивність ротора

$$L_r = L_2 + \frac{3}{2} L_\mu, \quad (3.6)$$

$$L_r = 0.0007 + \frac{3}{2} \cdot 0.013 = 0.022 \text{ Гн.}$$

### 3.2 Розробка математичної моделі

Проведемо моделювання режимів пуску у розімкнутій системі,

$$\begin{aligned} \frac{d\psi_\alpha^s}{dt} &= a_1 U_\alpha^s - a_2 \psi_\varepsilon^s + a_3 \psi_\alpha^r, \\ \frac{d\psi_\alpha^s}{dt} &= a_4 U_\beta^s - a_5 \psi_\beta^s + a_6 \psi_\beta^r, \\ \frac{d\psi_\alpha^r}{dt} &= -a_7 \Psi_\alpha^r + a_8 \psi_\alpha^s - \omega_p \psi_\beta^r, \\ \frac{d\psi_\beta^r}{dt} &= -a_9 \Psi_\beta^r + a_{10} \psi_\beta^s + \omega_p \psi_\alpha^r, \\ M_{EM} &= a_{11} (\psi_\beta^s \cdot \psi_\alpha^r - \psi_\alpha^s \cdot \psi_\beta^r), \\ J \frac{d\omega}{dt} &= a_{12} (M_{EM} - M_{CT}), \end{aligned} \quad (3.7)$$

де

$$a_1 = a_4 = 1,$$

$$a_2 = a_5 = \frac{R_s L_s}{L_s L_r - M^2} t \sigma, \quad (3.8)$$

$$a_3 = a_6 = \frac{R_s M}{L_s L_r - M^2} t \sigma, \quad (3.9)$$

$$a_7 = a_9 = \frac{R_s L_s}{L_s L_r - M^2} t \sigma, \quad (3.10)$$

$$a_8 = a_{10} = \frac{R_s L_s}{L_s L_r - M^2} t \sigma , \quad (3.11)$$

$$a_{11} = \frac{3P_H}{2} \frac{M}{L_s L_r - M^2} \frac{\psi_\sigma^2}{M_\sigma} , \quad (3.12)$$

$$a_{12} = \frac{P_H M_\sigma}{J \omega_\sigma^2} . \quad (3.13)$$

Тут  $R_s, R_r$  - активний опір фази статора й ротора відповідно,  
 $L_s, L_r$  - величини повної індуктивності обмоток статора й ротора,  
 $M$  – величина взаємної індуктивності між обмотками статора й ротора. Значення векторних струмів пов'язані із потокозчепленням наступними рівняннями

$$\begin{aligned} i_\alpha^s &= a_{13} \psi_\alpha^s - a_{14} \psi_\alpha^r , \\ i_\beta^s &= a_{15} \psi_\beta^s - a_{16} \psi_\beta^r , \\ i_\alpha^r &= a_{17} \psi_\alpha^r - a_{18} \psi_\alpha^s , \\ i_\beta^r &= a_{19} \psi_\beta^r - a_{20} \psi_\beta^s , \end{aligned} \quad (3.14)$$

де

$$a_{13} = a_{15} = \frac{R_s}{L_s L_r - M^2} , \quad (3.15)$$

$$a_{17} = a_{19} = \frac{R_r}{L_s L_r - M^2} , \quad (3.16)$$

$$a_{14} = a_{16} = a_{18} = a_{20} = \frac{M}{L_s L_r - M^2} . \quad (3.17)$$

Проведемо спрощення рівнянь й приведемо їх до виду, зручного для моделювання.

Тоді система диференціальних рівнянь для потокозчеплення буде мати вигляд:

$$\frac{d\psi_{\lambda s}}{dt} = U_{\lambda s} - AR_s (\psi_{\lambda s} L'_r - \psi_{\lambda r} L_\mu)$$

$$\begin{aligned}
\frac{d\psi_{\beta s}}{dt} &= -U_{\beta s} - AR_s(\psi_{\beta s}L'_r - \psi_{\beta r}L_\mu) \\
\frac{d\psi_{\lambda r}}{dt} &= -AR'_r(\psi_{\lambda r}L_s - \psi_{\lambda s}L_\mu) + \psi_{\beta r}\omega \\
\frac{d\psi_{\beta r}}{dt} &= -AR'_r(\psi_{\beta r}L_s - \psi_{\beta s}L_\mu) + \psi_{\lambda r}\omega \\
M &= \frac{3}{2}pL_\mu A(\psi_{\lambda r}\psi_{\beta r} - \psi_{\beta s}\psi_{\lambda r}) \\
\frac{d\omega}{dt} &= \frac{1}{J}pM - M\omega,
\end{aligned} \tag{3.18}$$

та

$$\left. \begin{aligned}
i_{\lambda s} &= A(R_s\psi_{\lambda s} - L_\mu\psi_{\lambda r}) \\
i_{\beta s} &= A(R_s\psi_{\beta s} - L_\mu\psi_{\beta r}) \\
i_{ds} &= A(L_s\psi_{\lambda r} - L_\mu\psi_{\lambda s}) \\
i_{\beta r} &= A(L_s\psi_{\beta r} - L_\mu\psi_{\beta s})
\end{aligned} \right\} \tag{3.19}$$

тут

$$L_s = L_1 + L_\mu = 0,014072 \text{ Гн.} \tag{3.20}$$

$$L_r = L_2 + L_\mu = 0,014058 \text{ Гн.} \tag{3.21}$$

$$A = \frac{1}{L_s \cdot L_r - L_\mu^2}, \tag{3.22}$$

де  $L_s$  - повна індуктивність статора,

$L_r$  - повна індуктивність ротора,

$L_\mu$  - індуктивність контуру намагнічування.

$$A = \frac{1}{0,02 \cdot 0,02 - 0,013^2} = 5,1 \cdot 10^4.$$

Із застосуванням пакета Matlab виконуємо моделювання пуску АД [7]. Структурна схема моделі наведена на рисунку 3.1.

Центральним вузлом даної моделі є модуль DEE, у якому записана система диференціальних рівнянь. Внутрішня структура модуля наведена на рисунку 3.2

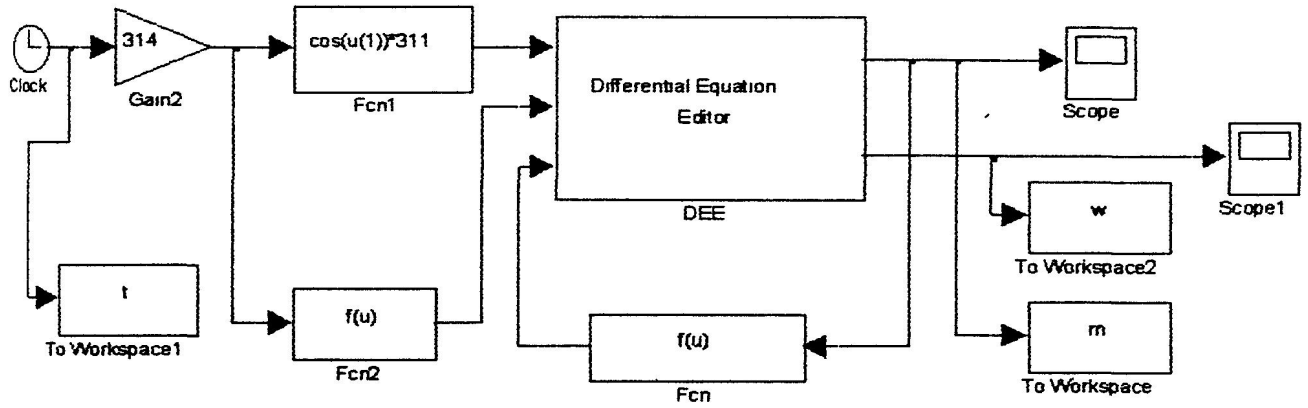


Рисунок 3.1 – Структурна схема моделі для дослідження пуску АД

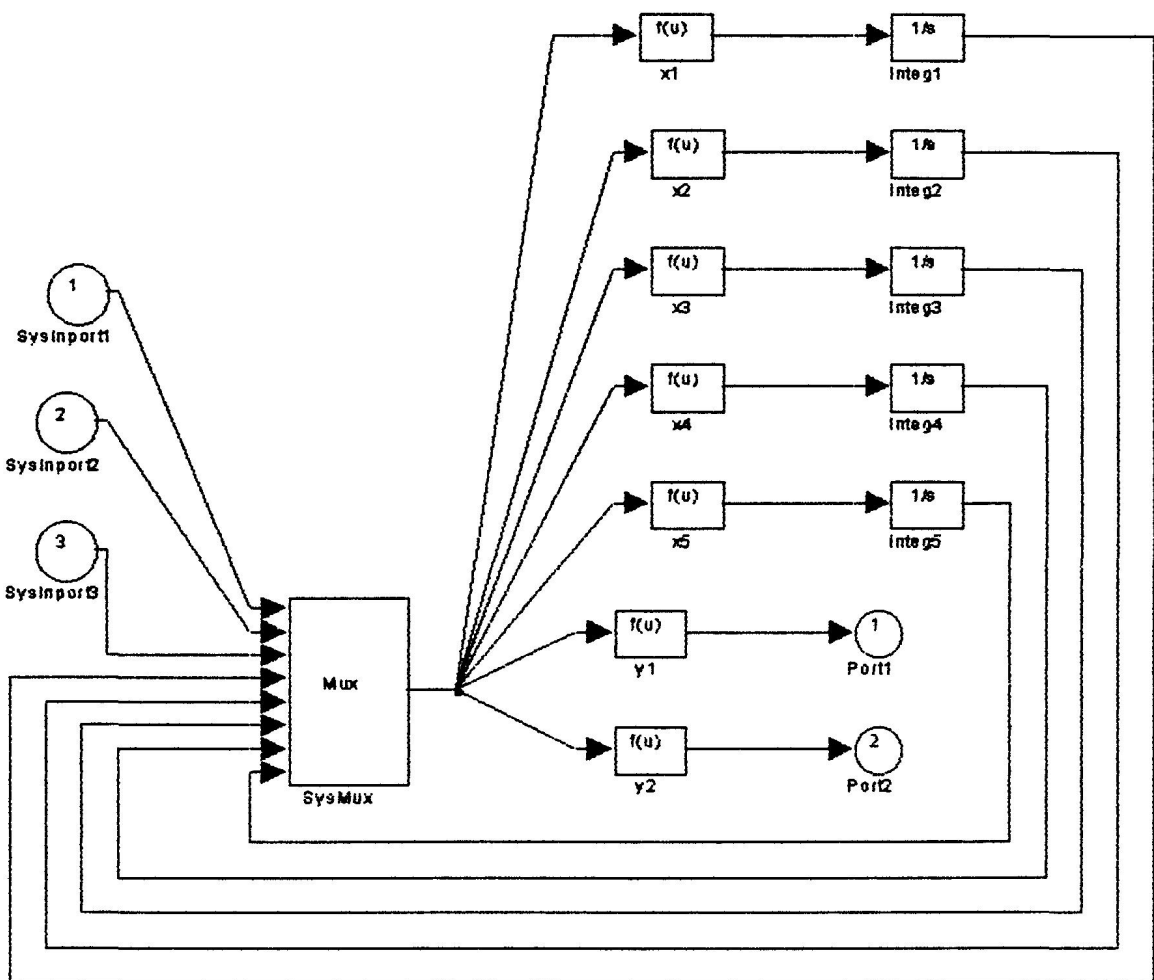


Рисунок 3.2 – Внутрішня структура модуля DEE

В результаті моделювання були отримані такі графіки зміни швидкості обертання  $\omega, \text{c}^{-1}$  і моменту  $M \text{ (Нм)}$  під час пуску (рис. 3.3).

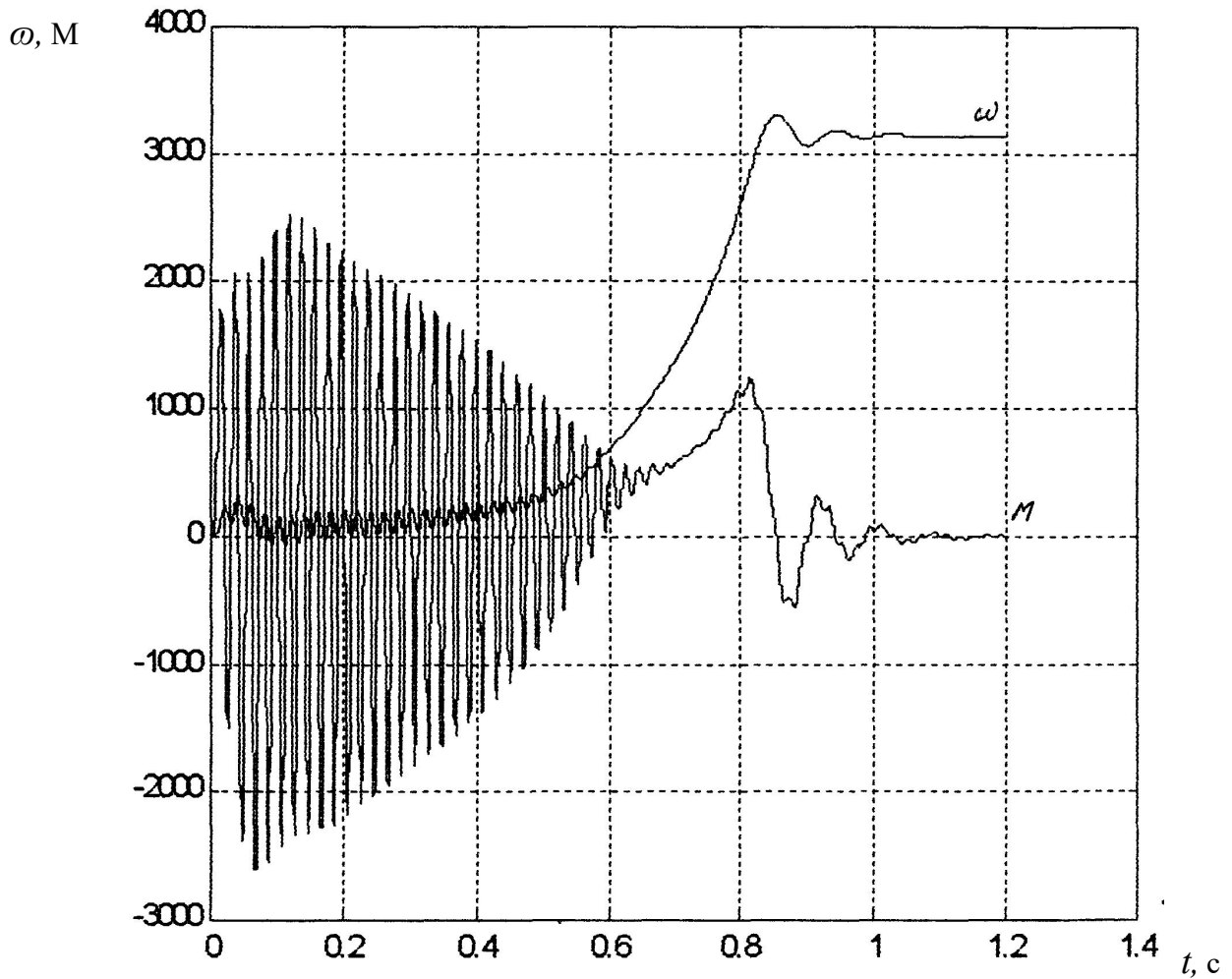


Рисунок 3.3 – Прямий пуск асинхронного двигуна

### 3.3 Моделювання пускових режимів у замкнутій системі

Для розрахунку системи регулювання, режимів регулювання двигуна а також продуктивності досить розглянути лінійну ділянку характеристики АД. Тоді можна скористатися лінеаризованою моделлю [7].

Рівняння для механічної характеристики асинхронного двигуна на лінійній ділянці має вигляд:

$$M = \frac{M_k}{S_k} S \quad , \quad (3.23)$$

звідки можна записати

$$M = \frac{M_k}{S_k} \cdot \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} = \frac{M_k}{S_k \omega_0} (\omega_0 - \omega) = \beta (\omega_0 - \omega). \quad (3.24)$$

Вводимо електромагнітну постійну часу  $T_e$  для обліку часу протікання електромагнітних процесів:

$$T_e = \frac{1}{\omega_s S_k} = \frac{X_k}{\omega_s R'_2} = \frac{L_k}{R'_2}, \quad (3.25)$$

тоді можна побудувати структурну схему АД в межах лінійної ділянки характеристики (рис. 3.4):

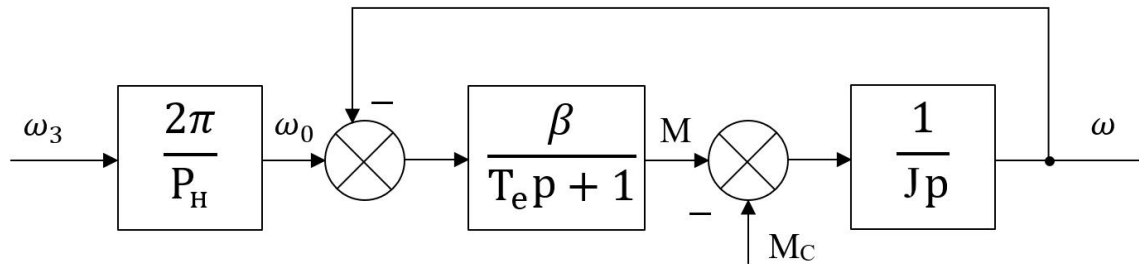


Рисунок 3.4 – Структурна схема АД

Продиференціювавши рівняння для теплообмінника, одержимо вираз:

$$\left. \begin{aligned} m_c c_c \frac{dT_c}{dt} + \lambda_p S_t T_c &= r F_t = \lambda_p S_t T'_p \\ m_c c'_p \frac{dT'_p}{dt} + F_p C_p T'_p + \lambda_p S_t T'_p &= F_p C_p T_p + \lambda_p S_t T_c \end{aligned} \right\} \quad (3.26)$$

Перше рівняння описує баланс теплоти теплоносія, а друге – баланс теплоти нагрівального продукту.

Можна вважати, що втрати теплоти  $\lambda_{\text{qвт}}$  незначні й з ними можна зневажити, а також, що за припустимих відхилень температури зміна теплоємностей  $C_c$ ,  $C_p$ ,  $C'_p$  незначна й нею також можна зневажити.

Постійними параметрами можна вважати масу стінок  $m_c$ , площа  $S_t$ , теплоту фазового переходу  $r$  і масу продукту в теплообміннику  $m_p$ .

До змінних параметрів відносяться температура стінки  $T_c$ , витрати теплоносія  $F_t$ , температура продукту на вході  $T_p$  і на виході  $T'_p$  теплообмінника, а також витрати  $F_p$ .

Змінні параметри об'єкта керування запишемо так:

$$\begin{aligned} T_c &= T_{co} + \Delta T_c & F_t &= F_{to} + \Delta F_t & F_p &= F_{po} + \Delta F_p \\ T_p' &= T_{po}' + \Delta T_p' & T_p &= T_{po} + \Delta T_p \end{aligned} \quad (3.27)$$

Підставимо ці рівняння в (3.26) у результаті одержимо:

$$m_c C_c \frac{d(T_{co} + \Delta T_c)}{dt} + \lambda_p S_t (T_{co} + \Delta T_c) = r(F_{to} + \Delta F_t) + \lambda_p S_t (T_{po}' + \Delta T_p') \quad (3.28)$$

$$\begin{aligned} m_p C_p \frac{d(T_{po}' + \Delta T_p')}{dt} + C_p' (F_{po} + \Delta F_p) (T_{po}' + \Delta T_p') + \lambda_p S_t (T_{po}' + \Delta T_p') &= \\ = C_p (F_{po} + \Delta F_p) (T_{po} + \Delta T_p) + \lambda_p S_t (T_{co} + \Delta T_c) \end{aligned} \quad (3.29)$$

Після множення й знехтування складовими малого ступеня важливості одержимо вирази:

$$m_c C_c \frac{d\Delta T_c}{dt} + \lambda_p S_t T_{co} + \lambda_p S_t \Delta T_c = rF_{to} + r\Delta F_t + \lambda_p S_t T_{po}' + \lambda_p S_t \Delta T_p' \quad (3.30)$$

$$\begin{aligned} m_p C_p' \frac{d\Delta T_p'}{dt} + F_{po} C_p' T_{po}' + F_{po} C_p' \Delta T_p' + C_p' T_{po}' \Delta F_p + \lambda_p S_t T_{po}' + \lambda_p S_t \Delta T_p' &= \\ = F_{po} C_p T_{po} + F_{po} C_p \Delta T_{po} + C_p T_{po} \Delta F_p + \lambda_p S_t T_{co} + \lambda_p S_t \Delta T_c \end{aligned} \quad (3.31)$$

Рівняння статички:

$$rF_{to} = \lambda_p S_t (T_{co} - T_{po}') \quad (3.32)$$

$$\lambda_p S_t (T_{co} - T_{po}') + F_{po} C_p T_{po} = F_{po} C_p' T_{po}' \quad (3.33)$$

виключимо відповідно рівняння (3.33) і (3.32) з (3.31) і (3.30) одержимо:

$$m_c C_c \frac{d\Delta T_c}{dt} + \lambda_p S_t \Delta T_p' \quad (3.34)$$

$$m_p C_p' \frac{d\Delta T_p'}{dt} + (F_{po} C_p' + \lambda_p S_t) \Delta T_p' = (C_p T_{po} - C_p' T_{po}') \Delta F_p + F_{po} C_p \Delta T_{po} + \lambda_p S_t \Delta T_c \quad (3.35)$$

Запишемо рівняння (3.34) і (3.35) у відносній формі перед цим зазначимо для складових цього рівняння:

$$y_1 = \frac{\Delta T_c}{T_{co}}; \quad x_1 = \frac{\Delta F_t}{F_{to}}; \quad x_2 = \frac{\Delta F_p}{F_{po}}; \quad z = \frac{\Delta T_p}{T_{po}}; \quad y_2 = \frac{\Delta T_p'}{T_{po}'} \quad (3.36)$$

В результаті маємо вирази:

$$m_c C_c T_{po}' \frac{dy_1}{dt} + \lambda_p S_t T_{co} y_1 = rF_{to} x_2 + \lambda_p S_t T_{po}' y_2 \quad (3.37)$$

$$m_p C_p T_{po}' \frac{dy_2}{dt} + (F_{po} C_p' + \lambda_p S_t) T_{po}' y_2 = (C_p T_{po} - C_p' T_{po}') F_{po} X_2 + F_{po} C_p T_{po} Z + \lambda_p S_t T_{co} Y_1 \quad (3.38)$$

Розділимо рівняння (3.37) на добуток  $\lambda_p S_t T_{co}$ , а (3.38) на вираз  $(F_{po} C_p' + \lambda_p S_t) T_{po}'$  і введемо позначення:

$$\begin{aligned} \tau_1 &= \frac{m_c C_c}{\lambda_p S_t}; & \tau_2 &= \frac{m_p C_p}{F_{po} C_p' + \lambda_p S_t}; & k_1 &= \frac{r F_{to}}{\lambda_p S_t T_{co}}; \\ k_2 &= \frac{T_{po}'}{T_{co}}; & k_3 &= \frac{(C_p T_{po} - C_p' T_{po}') F_{po}}{(F_{po} C_p' + \lambda_p S_t) T_{po}'}; \\ k_4 &= \frac{F_{po} C_p T_{po}}{(F_{po} C_p' + \lambda_p S_t) T_{po}'}; & k_5 &= \frac{\lambda_p S_t T_{co}}{(F_{po} C_p' + \lambda_p S_t) T_{po}'} \end{aligned} \quad (3.39)$$

Підставимо ці параметри у вихідне рівняння. У результаті одержимо:

$$\tau_1 \tau_2 \frac{d^2 y_2}{dt^2} + (\tau_1 + \tau_2) \frac{dy_2}{dt} + (1 + k_2 k_5) y_2 = k_1 k_5 k_4 + (\tau_1 k_3 \frac{dx_3}{dt} + k_3 k_2) + \tau_1 k_4 (\frac{dz}{dt} + k_4 z) \quad (3.40)$$

Введемо ще такі позначення:

$$\begin{aligned} \tau' &= \frac{\tau_1 + \tau_2}{1 + k_2 k_5}; & \tau'' &= \frac{\tau_1 \tau_2}{1 + k_2 k_5}; & k_6 &= \frac{k_1 k_5}{1 + k_2 k_5}; \\ k_7 &= \frac{k_3}{1 + k_2 k_5}; & k_8 &= \frac{k_4}{1 + k_2 k_5}. \end{aligned} \quad (3.41)$$

Тоді рівняння математичної моделі теплообмінника буде мати вигляд:

$$\tau'' \frac{d^2 y_2}{dt^2} + \tau' \frac{dy_2}{dt} + y_2 = k_6 x_1 + k_7 (\tau_1 \frac{dx_2}{dt} + x_2) + k_8 (\tau_1 \frac{dz}{dt} + z). \quad (3.42)$$

Передавальна функція об'єкта керування (теплообмінника) з урахуванням часу запізнення для каналу регулювання матиме вигляд:

$$W_p(S) = \frac{K_t}{\tau'' S^2 + \tau' S + 1} e^{-\tau S} \quad (3.43)$$

Математична модель об'єкта керування, побудована по вищеприведеним рівнянням, представлена на рис. 3.5.

Структурна схема САК системи «ПЧ-АД – теплообмінник» представлена на рис. 3.6.

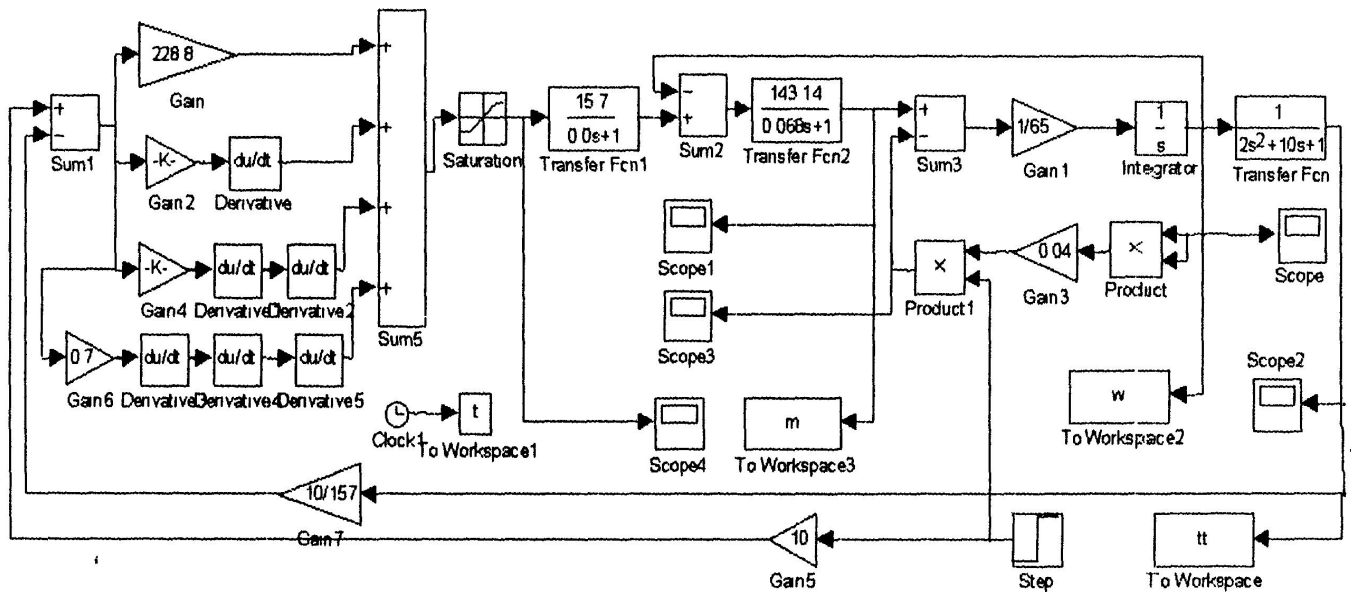


Рисунок 3.5 – Математична модель теплообмінника

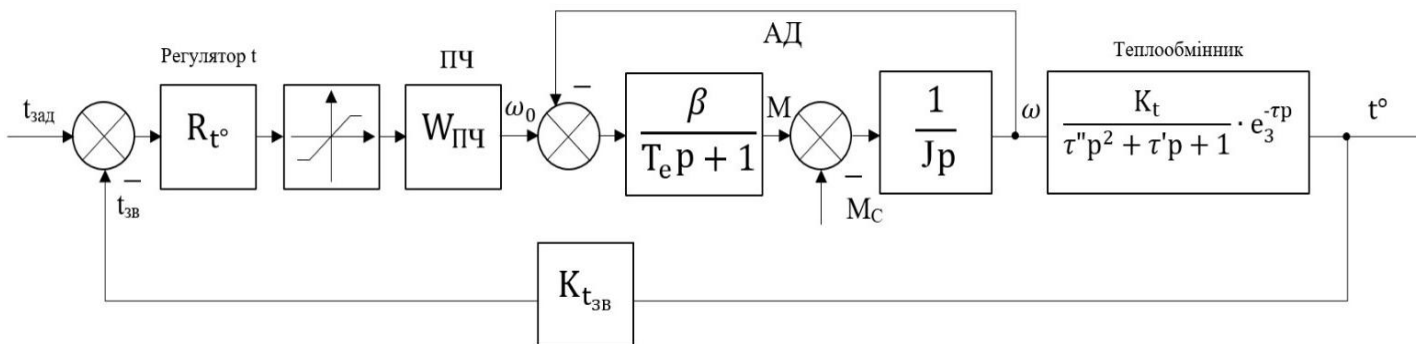


Рисунок 3.6 – Структурна схема САК системи «ПЧ-АД – теплообмінник»

На рисунках 3.7 та 3.8 приведені результати досліджень побудованої моделі. Рисунок 3.7 – графіки зміни температури в часі на вході та виході теплообмінника. Рисунок 3.8 показує зміну моменту та швидкості обертання двигуна при зміні температури в часі.

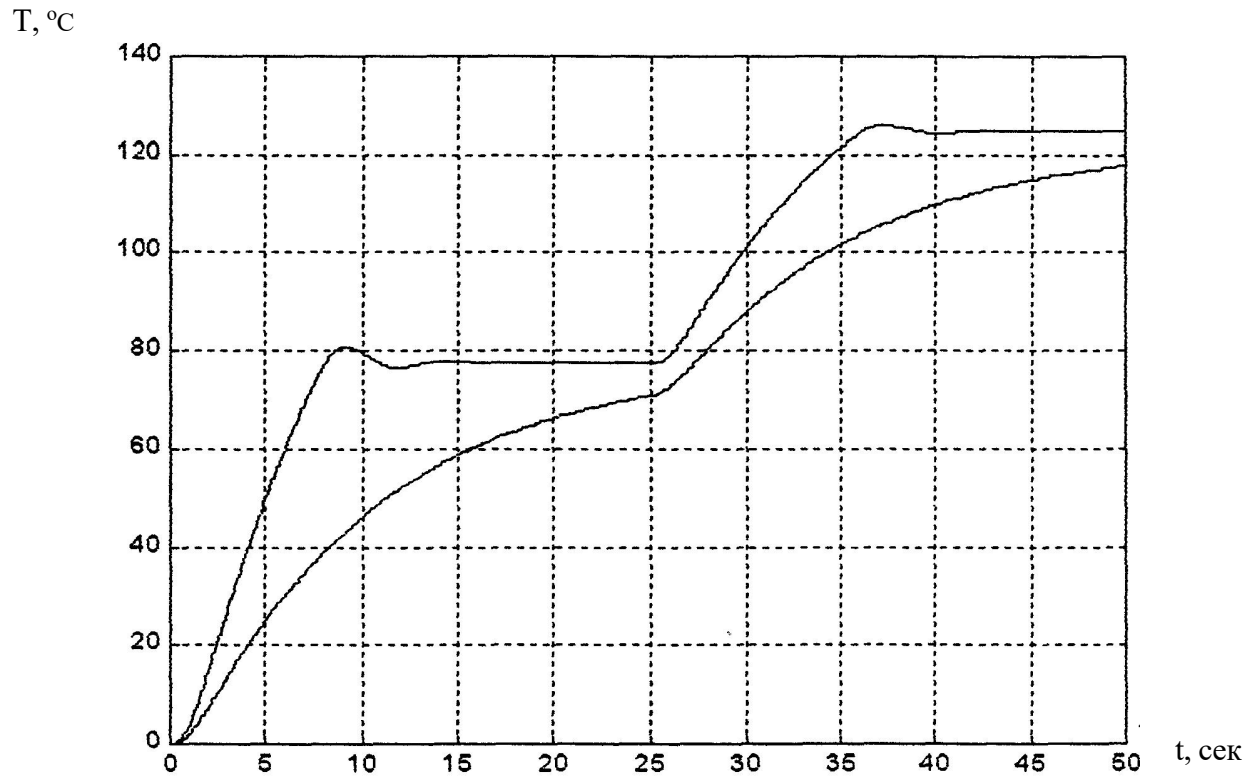


Рисунок 3.7– Зміна температури в часі на вході та виході теплообмінника

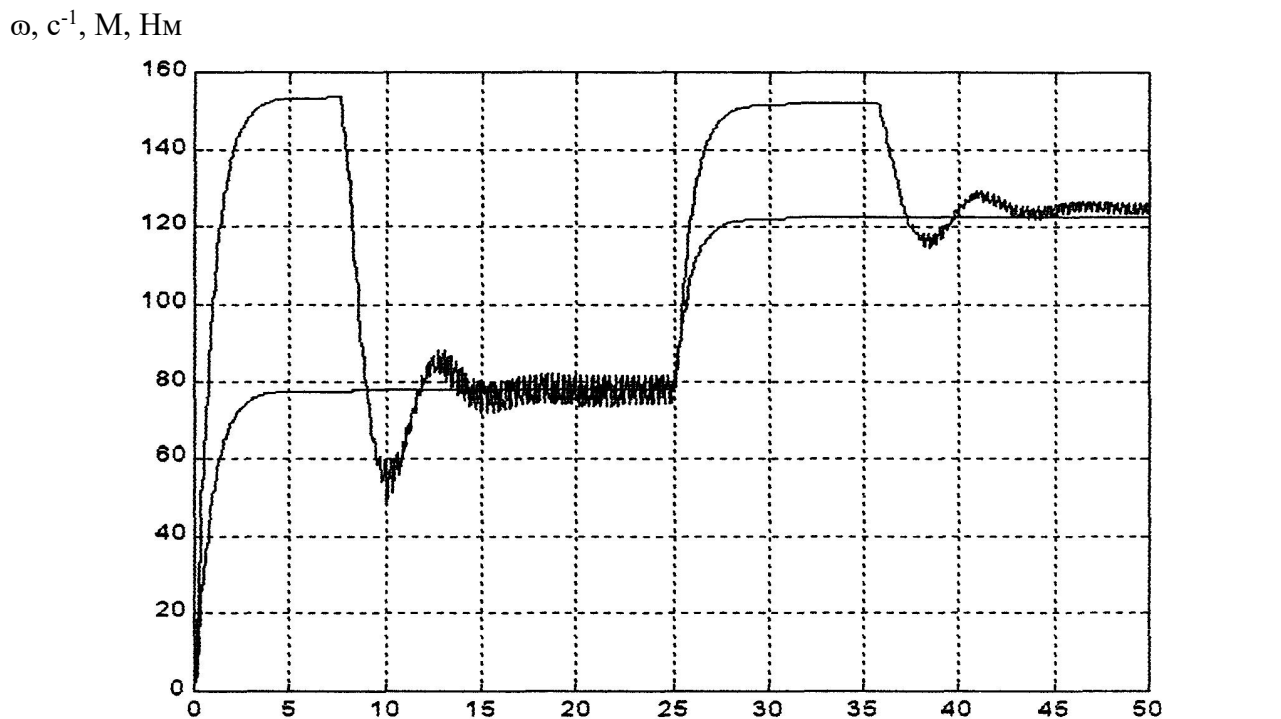


Рисунок 3.8 – Зміна моменту та швидкості двигуна при зміні температури в часі

**Висновок.** Як можна побачити з вигляду графіків, система відпрацьовує стрибки температури в теплообміннику належним чином і у відповідності з завданням.

## ВИСНОВКИ

В кваліфікаційній роботі було розглянуто технологічний процес очищення відходів нафтопереробного виробництва та розроблена автоматизована система електропривода насосного агрегату знесолювальної установки.

Розрахована потужність двигуна насоса, вибраний більш сучасний двигун відповідної потужності типу AIP 315 S4. Проведений аналіз принципів керування швидкістю асинхронних двигунів та доведена доцільність використання для насосного агрегату знесолювальної установки сучасного асинхронного електропривода на базі перетворювача частоти.

Відповідно до параметрів системи вибран перетворювач частоти типу ACS 600.

В роботі проведене складання схеми заміщення двигуна та розрахунок основних її параметрів, побудовані механічні і швидкісні характеристики двигуна. Проведене дослідження роботи електропривода в статичному та динамічному режимах, побудовані та проаналізовані графіки зміни найбільш важливих параметрів. Розрахунок енергетичних параметрів системи показав доцільність її впровадження.

Результати даної роботи (після більш детальної доробки) можуть бути впроваджені в технологічний процес знесолювання нафтових відходів.

## ВИКОРИСТАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Ковальчук В. А. Очистка стічних вод : навч. посібник / В. А. Ковальчук. – Рівне : ВАТ «Рівненська друкарня», 2003. – 622 с.
2. Обробка технологічних рідин та стічних вод : навч. посібник / С. С. Рижков [та ін.] ; Нац. ун-т кораблебудування ім. адмірала Макарова, Херсон. філ. – Херсон : Грінь Д. С. [вид.], 2017. – 315 с.
3. Ткачов В. О. Конспект лекцій з дисципліни «Водопідготовка в системах ТГП і В» для студентів 5 і 6 курсу всіх форм навчання спеціальності «Теплогазопостачання й вентиляція» / В. О. Ткачов, І. М Чуб; Харк. нац. акад. міськ. госп-ва; - Х.: ХНАМГ, 2012. - 50 с.
4. Попович М.Г., Лозинський О.Ю., Клепиков В.Б. та інш. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи. Навч. посіб. за напрямом «Електромеханіка» / М.Г. Попович, О.Ю. Лозинський, В.Б. Клепиков та інш. – К.: Либідь, 2005. – 680 с. Ч1.
5. Шефер, В.В. Електричні машини: навчальний посібник / В.В. Онушко, О.В. Шефер. – Полтава, ПолтНТУ, 2015. – 536 с.
6. Каталог електродвигунів серії АІР. – Режим доступу: [https://air.com.ua/katalog\\_elektrodivigatelei\\_air/](https://air.com.ua/katalog_elektrodivigatelei_air/)
7. Лазарев Ю. Ф. Моделювання динамічних систем у Matlab. Електронний навчальний посібник. – Київ: НТУУ "КПІ", 2011. – 421 с.
8. Основи комп'ютерного моделювання: навч. посібник / М.С. Барабаш, П.М. Кір'язев, О.І. Лапенко, М.А. Ромашкіна. 2-е вид. стер. – К.: НАУ, 2019. – 492 с.
9. Голодний І.М., Червінський Л.С., Жильцов А.В., Санченко О.В. Романенко О.І. Моделювання регульованого електропривода: Підручник. – К.: Аграр Медіа Груп, 2019. – 266 с.: іл.
10. Колб Ант. А, Колб А. А. Теорія електроприводу: Навчальний посібник. – 2-е вид. перероб. і доп. – Д.: Національний гірничий університет, 2011. – 540 с.

11. MATLAB Programming for Engineers Stephen J. Chapman 2020. – 305с.
12. Шефер О.В. Автоматизований електропривод загальнопромислових механізмів: конспект лекцій / О.В. Шефер – Полтава: ПолтНТУ, 2020. – 154 с.
13. Павленко Т.П. Автоматизований електропривод загальнопромислових механізмів. Конспект лекцій (для студентів усіх форм навчання за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка, електромеханіка) / Т.П. Павленко, О.В. Донець, О.М. Петренко; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О.М. Бекетова. – Харків: ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2018. – 132с.
14. Bavafa-Toosi Y. Introduction to Linear Control Systems – Academic Press, 2017. — 929 p. — ISBN 978-0-12-812748-3.
15. Шефер О.В., Єрмілова Н.В. Методичні рекомендації до виконання кваліфікаційної роботи бакалавра для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня зі спеціальності G3 «Електрична інженерія» (141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»). – Полтава: Національний університет імені Юрія Кондратюка, 2025. – 18 с.

## 1 TECHNOLOGICAL PART

### 1.1 Description of technological process of evaporation of drains

The Oil refinery (OR) has a closed, irreversible cycle of water defense. The refinery should be a set of treatment plants, the purpose of which is to maintain the quality of circulating water. The purpose of these structures is to purify water from mechanical impurities, residues of petroleum products and reduce its salt content [1]. For this purpose, the refinery is constructed in the complex of heat treatment and removal of irreversible wastewater, which is called ELOV drains (which reduces the pollution of the environment).

The technological process of sewage evaporation includes the following basic operations:

- preliminary heating of ELOV drains;
- intensive heating of the coolant in a special furnace;
- evaporation of drains and output of dense residues from the installation.

If you heat the salty water to the temperature of its boiling, it will release the water vapor, which when cooled are converted to fresh water, and mechanical impurities and salts will be condensed in the remains of the brine.

ELOV stench evaporation is carried out according to a complex multi -stage scheme [1]. This scheme is presented in Figure 1.1.

The thermal essence of adiabative boiling is reduced to the following: drains (salt water) under pressure are heated in regenerative heat exchangers and in heat exchangers 1T-9/1-4 to a given temperature, and then come to the first stage of evaporation, ie in the first evaporator, where the pressure is reached. This step is a regenerative heat exchanger, where giving heat to a colder flow of runoff condensed.

The circulating juice, which boils in the evaporator, which became more salty from the loss of steam, is transferred to the next evaporator, where by

reducing the pressure, it boils again, giving the next part of its heat in the form of vapors.

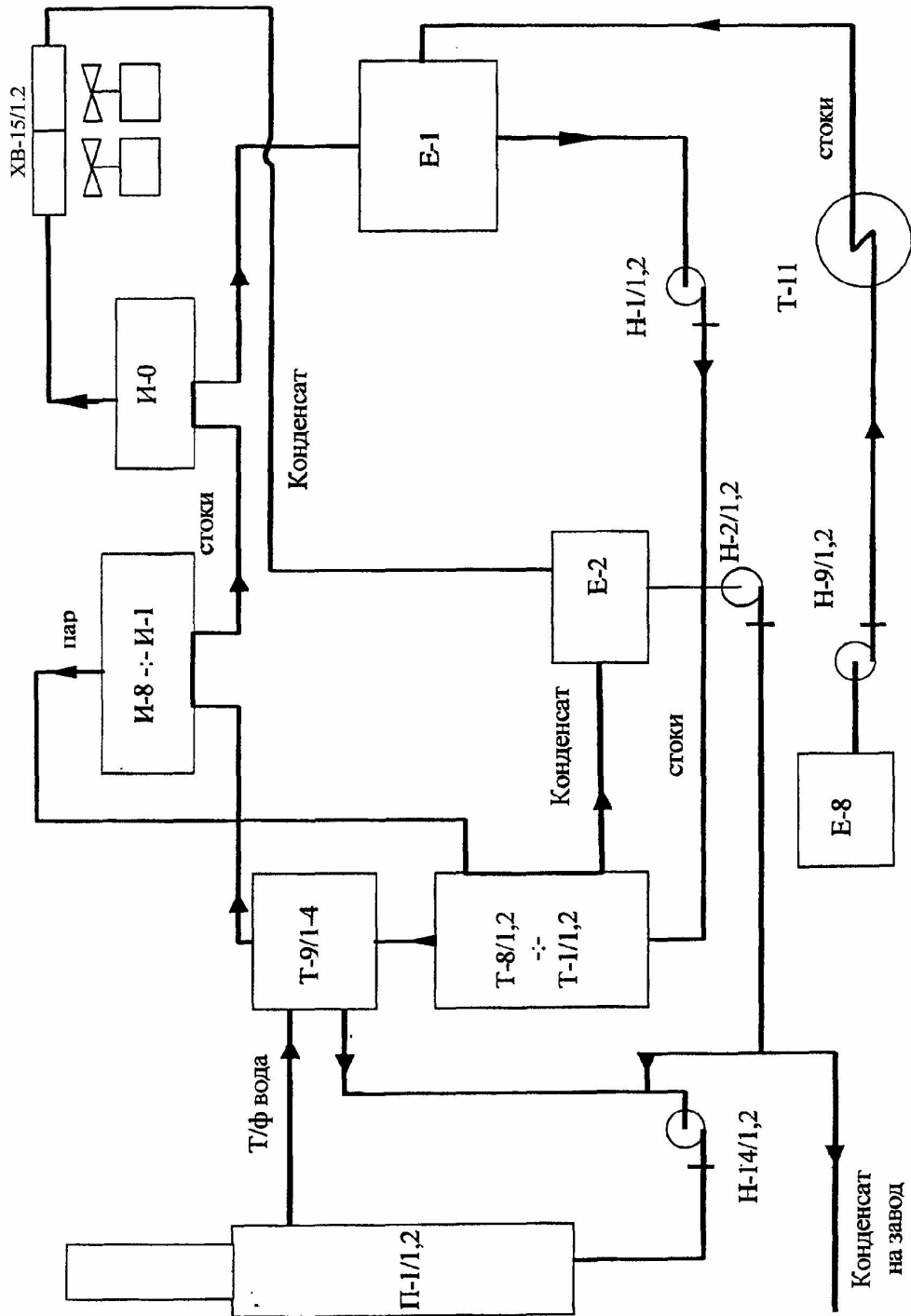


Figure 1.1 - Scheme of technological process of wastewater treatment

The first technological line of installation has eight regenerative steps of evaporation in one non-regenerative stage of i-o, that is, all eight evaporators have the corresponding steam capacitors, which comes out in evaporators during instant boiling, and the evaporator I-O does not have a capacitor, as it would require a health-remedy.

The presence of dissolved air (gas) in the drains has a negative impact on the process. With increasing temperature in the process of evaporation there is a dear of dissolved gases. Remembering from the circulating solution, they accumulate in regenerative heat exchangers, blocking the surface of heat exchange.

Consider more detailed technological operations.

1) Preparation and preliminary heating of ELOV runoff.

Softened runoff, after ELOV runoff floats, pumping pumping station of industrial runoff of treatment structures are fed to the installation in the E-8 capacity, which is intended for the collection and additional residency of drains. If necessary, softened runoff can be fed into the E-1 capacity directly, bypassing the training unit and the E-2 capacity. The remaining drains with E-8 pumps H-9/1,2,3 are fed to the E-1, having passed the pipe space of the heat exchanger T-11, where they are heated to 50 °C due to the heat of the capacitor after the separators C-1/1,2.

2) Intense heating of the coolant in the furnace. Elou drains, pre-heated to a temperature of 125 °C in regenerative heat exchangers, come to additional heating into the heat exchangers T-9/ 1-4, where they are heated to a temperature of 136 °C.

Elou runoff with two parallel flows pass through a group of heat exchangers T-9/1-4 and heated due to the heat of the coolant (hot water), which circulates on a closed circulation circuit:

Furnace P-1/1,2-heat exchanger T-9/1-4-pump H-14/1,2.

Heated in T-9/1-4 heat exchangers through pressure regulator are pre-entered into evaporators I-8-I-1 for evaporation.

The operation of the circulation circuit for heating the coolant is carried out as follows: first the specified circulation circuit is filled with water from the line of

promptification of factory networks. Water H-14/1,2 pumps are fed to the heating in the oven P-1/1,2, where they are heated to a temperature of 151<sup>0</sup>C. Water heating in the furnace is due to the heat of the burned fuel gas.

The combustible gas through the cost regulator and the pressure regulator is fed to the POP P-1/1.2 for burning. The coolant oven is a vertical apparatus that is equipped with safety valves.

The heated coolant (water) to a temperature of 151<sup>0</sup>C from the furnace with two streams enters the interior space of heat exchangers T-9/1,2, where through the walls of the pipe beam gives its heat to the drains.

The coolant from the heat exchangers T-9/1.2 enters the heat exchangers T-9/3.4, where it also heats the circulating drains there.

The coolant from the heat exchangers T-9/3.4 enters the entrance of the circulation pumps H-14/1,2, which is re-sent to the stove for gripping. In this way, the coolant of the circulating circuit is heated in the furnace. The pressure at the outlet of the H-14/1.2 pumps in the circulation circuit is maintained within 7.5 kg/cm<sup>2</sup>, and at the input of these pumps at 132<sup>0</sup>C-within 3.4 kg/cm<sup>2</sup>.

At the exit of the P-1/ 1.2 coil, two safety valves designed to protect against exceeding the pressure in the furnace and in the housing of the T-9/ 1-4 heat exchanger.

The water pressure in the circulation circuit is controlled by pressure gauges installed on the water line at the inlet of the H-14/1,2 pumps.

### 3) Evaporation of drains.

The output drains with a temperature of 100<sup>0</sup>C from the capacity of E-1 circulation pumps H-1/1.2 are sent by two streams for heating in series in the T-1/1.2-T-8/1.2 evaporated cascade, while heating to a temperature of 136 <sup>0</sup>C. The heating of drains in T-1/1,2-T-8/1,2 is due to the regenerative heat of the secondary boiling pair from evaporators I-1-I-8 of the corresponding steps of evaporation.

One stream passes through the pipe space of the T-1/1,2-T-8/1,2, where it is heated to a temperature of 136 <sup>0</sup>C due to the heat of the secondary boil of evaporators I-1-I-8.

After that, one flow is sent to the space of the heat exchanger T-9/3.4, where it is heated to a temperature of 136 °C, due to the heat of the coolant coming from the inter-pipe space of the heat exchangers T-9/1.2.

Further, the drains enter the space of heat exchangers T-9/1,2, where they are heated to a temperature of 151°C due to the heat of the coolant, which enters the interstitial space of a given heat exchanger after heating it in the p-1/1.2 furnaces.

Heated in T-9/1.2 heat exchangers to a temperature of 136 °C drains through pressure regulators come in series in the evaporator I-8.

In the evaporants of I-8-I-0 there is an adiabatic evaporation of drains due to the difference of pressure and temperatures in the evaporators and drains that come to them on the burner. Moreover, the temperature of the drains included in each of the evaporators is 5°C higher than the boiling point in these evaporators.

The drains pass the evaporated cascade from i-8 to I-1, where the runoff temperature in each subsequent evaporator decreases by 5°C, while getting up from 136 °C to 105 °C. The steam, which is released from the drains, from the evaporators enters the corresponding heat exchangers for heating the drains circulating in them. In evaporated runoff from the evaporator to the evaporator increases the concentration of salts.

Further drains from the evaporator I-1 come into the evaporator I-0, where their additional evaporation occurs. Condensed pair of T-1/1,2 heat exchangers-T-8/1,2 enters the separators C-1/1,2. After the separators, the steam condensate partially enters the air refrigerators HI-15/1.2 for cooling, and partly into the T-11 heat exchanger, where to cool up to 70°C enters the E-2 capacity for condensate collection. Chilled in the min-15/1.2 to 90 °C condensate enters the E-2 container.

In the case of storage of drains for installation from treatment structures for warming up the system when the installation is released to the mode of condensation from the exits of the pumps H-2/1,2 into a special capacity of the EE. On the same line, the condensate returns for processing in E-1, if its quality does not meet the standards of technological regime.

The steam condensate formed in the E-1 container comes to cool in air refrigerators HI-19/1,2. The steam from the evaporator I-0 is fed into the air cooling apparatus HI-15/1,2 for cooling. The evaporated drains from the evaporator I-0 are collected in E-1, where they are mixed with fresh drains, and the circulation pumps H-1/1.2 are re-entered into the T-1/1.2-T-8/1,2 heat exchangers for heating. To maintain a constant and permissible concentration of salts in the system, the scheme provides continuous purging of salts on drains:

T-1/1,2 heat exchangers-T-8/1,2 - heat exchanger T-9/1,2 -evaporators I-8-i0-capacity E-1 -pumps H-1/1,2.

Purges are carried out together with the most concentrated drains, namely from the evaporator I-0. These drains (thick rape) from the evaporator I-0 are pumped out for installation in a specially designated place.

## **1.2 Characteristics of basic equipment cycle equipment**

This installation uses a variety of equipment. These include pumps, evaporators, heat exchangers, furnaces and air refrigerators [2].

The pumps are designed to move liquids and provide them with energy. In this case, centrifugal pumps are used in the installation. Their widespread is explained by the high efficiency, compactness and convenience of combining with drive electric motors (EM).

Used pump of type 10nka-7-2-centrifugal, horizontal, spiral type, two-stage. It is connected to the engine by means of an elastic mucous coupling.

Technical characteristics of the pump 10nka-7-2 (cipher according to the scheme H-14/1,2)

Pump parameters:

Productivity  $Q = 500 \text{ m}^3/\text{h}$

Napir  $H = 75 \text{ m}$

Rotation speed  $n = 1500 \text{ rpm}$

Efficiency = 0.64

An electric motor of type A-315 S2-4U3 was installed for the pump.

EM Options:

Power  $P = 160$  kW

Rotation speed  $n = 1500$  r/m

The supply voltage  $U = 380$  V.

The technological cycle also contains other types of pumps, which are marked in the scheme of the technological process with the corresponding ciphers (Table 1.1).

Table 1.1 - Characteristics of pumping equipment

№	Pump brand	Cipher according to the Scheme	Question Q, M <sup>3</sup> /h	Height H, m	Power of EM pump P, kW	Speed rotation n, r/m
1	CE1250/140	H-1/1,2	1250	140	630	1500
2	XO-90185ECD	H-2/1,2	90	85	55	3000
3	D-200/90	H-3/1,2	100	22	37	1500
4	X280/7, I-CD	H-9/1,2	280	72	100	1500
5	D- 320-50	H-14/1,2	320	50	75	1450

The evaporators are intended for evaporation of drains, they have adiabatic boil of drains due to the difference of pressure and temperatures in the evaporators and in the tanks coming to them on the parcel. Moreover, the amount of drains coming to each evaporator is 5 0C higher than the boiling point in these evaporators. In heat exchangers, the drains are heated due to the heat of the steam of the secondary boil of the evaporator.

Furnaces - designed to heat the product (coolant) by burning combustible gas in radiant chambers.

Air refrigerators (min) - intended for condensation (cooling) of vapors that did not conduct in regenerative heat exchangers.

### 1.3 Calculation of the Pumping Installation Engine Power

The choice of the motor is of great economic importance, because the correct choice depends on the performance of the working machine, the energy indicators and the reliability of the entire electric drive.

The first condition for the choice of EM is the correspondence between its capacity and the capacity of the working machine (in this case the pump). For EP industrial installations, you should choose the simplest design and control of the engine, reliable in operation and which has high technical and economic indicators. However, ED must fully meet the requirements of the technological process.

The most appropriate in this are asynchronous engines with short -circuited rotor. Quite simply, the choice of EM, which works in long -term mode with constant load. This mode of operation is characteristic of the electric drive of the pumping installation.

Power on the pump engine shaft can be calculated by a known formula:

$$P = \frac{Q \cdot H \cdot \rho \cdot g}{\eta_h \cdot \eta_n} \cdot 10^{-3} \cdot K_3 \quad (1.1)$$

where Q is the pump supply, m<sup>3</sup>/h, we have Q = 500 m<sup>3</sup>/h;

H - total pressure, we have 75m;

$\rho$  - pumped fluid density, we have = 935 kg/m<sup>3</sup>;

g = 9.81 m/s<sup>2</sup> - acceleration of free fall;

$\eta_h$  - pump efficiency (for pumps with pressure more than 40 kPa = 0.6–0.8);

$\eta_n$  - efficiency of transmission (accept = 1);

CC is a reserve ratio that takes into account non -calculation formulas (for ED more than 150 kW is usually accepted by  $K_3 = 1,1$ ).

Substituting input, we get the value of power

$$P = \frac{500 \cdot 75 \cdot 935 \cdot 9,81}{3600 \cdot 0,64 \cdot 1} \cdot 10^{-3} \cdot 1,1 = 160 \text{ kW.}$$

#### 1.4 Overview of the electric drive adjustment system

Currently, in the installation of the crash under consideration in this work, mostly use manual or easiest automatic control of the technological process, the equipment is outdated and requires almost constant maintenance.

The most important areas of the processes occurring in the evaporation installation are the evaporation contour and the contour of the furnace. The parameters of the evaporation circuit control are the pressure, consumption and the stock temperature, which depends on the amount of steam formed as a result of evaporation of wastewater [2].

For the qualitative course of the technological regime it is necessary to constantly monitor the temperature of the circulation runoff, while maintaining at a given level the pressure of the coolant (water) in the pipe circuit. For this purpose it is necessary to adjust the speed of the drive motor of the pump.

The most well-known and effective from modern methods of regulating the speed of asynchronous engines with short-circuited rotor (AM SC rotor) is to adjust the speed of changing the frequency of nutrient voltage [5]. With this adjustment of the sliding of the machine, regardless of the regulation range is maintained relatively small, the losses in the engine will be small, so the efficiency of the system is high enough. Given the above, to maintain the given pressure of the coolant, we stop on the frequency method of adjusting the speed of the engine.

Determine the required regulation range:

$$\frac{H_1}{H_2} = \left( \frac{\omega_1}{\omega_2} \right)^2 \quad (1.2)$$

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{H_1 \cdot \omega_2^2}{H_2}} \quad (1.3)$$

Substituting in (1.3) From the input data the values  $H_1, H_2, \omega^2$  are obtained:

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{3,4 \cdot 1500^2}{7,5}} = 1003,4 \text{ r/m}$$

So we have a regulation range:

$$D = \frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{1500}{1003,4} = 1,5:1. \quad (1.4)$$

Many electric drive systems show the ability to effectively adjust the angular speed and performance of the pump. However, the development of a power element base for frequency converters - power transistors, makes it possible to implement regulated EP systems based on modern frequency converters.

The main indicators of the pumps are the supply, pressure and efficiency in optimal modes of operation [3].

Electricity deficiency and its high cost cause the need for savings and normalization at the operation of pumps. The assessment of the equipment is performed on the basis of data on electricity consumption and information about the amount of drains that are pumped over a certain period. In such circumstances, it is advisable to use regulated EP, which allows to reduce the productivity of the pump to the required values without unnecessary power loss. Thus, it can be concluded that the more effective and economic method is to adjust the fluid supply by changing the speed of the pump impeller.

Figure 1.2 shows the position of the pressure characteristics of the pump and pipeline, respectively, at the speed of rotation of the wheel  $N_1 > N_2$ . Because the overall resistance of the pipeline does not change and the position of its characteristics will be unchanged as the speed of rotation of the impeller, the working mode "A" will move on the characteristics of Q-H network, the feed and pressure of the pump will decrease.

The range of mode rotation frequency will be:

$$d = \sqrt{\frac{H_1 - H_2}{H_1}}, \quad (1.5)$$

where  $H_1$ ,  $H_2$  is a needed upper and lower border of drainage pump respectively

$$d = \sqrt{\frac{7,5 - 3,4}{7,5}} = 0,7 \text{ ,}$$

That is, we have  $N_{\min} = 0,7 N_{\max}$ .

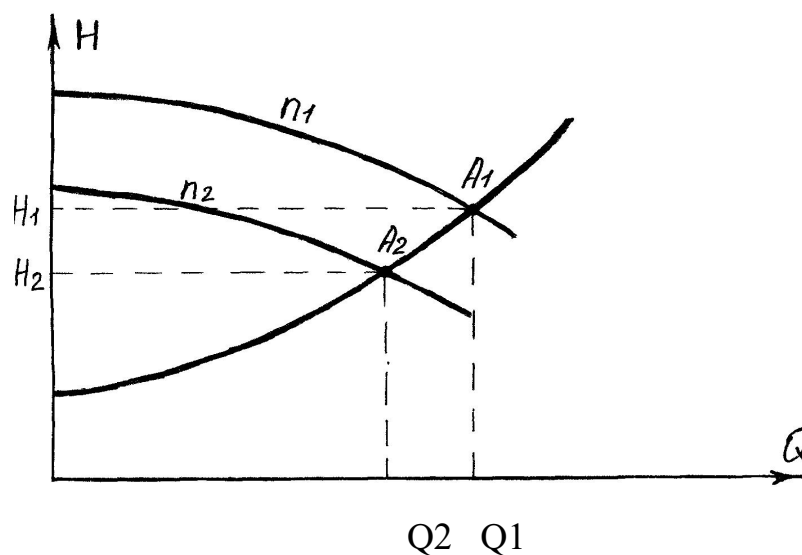


Figure 1.2 - Characteristics of the pump and pipeline when adjusting the supply change of speed of rotation

As can be seen from Figure 1.2 and the universal characteristics of the pumping unit 10nky-7-2, when adjusting the pump supply by changing the speed of the impeller, there is no unproductive loss of power. This will be based on further construction of the control system.

Thus, the main tasks for this development are:

- calculation of power and replacement of the pump engine with a more modern;
- inspection of speed adjustment systems and choice of type of modernized system;
- choice of equipment of the modernized system;
- study of static and dynamic characteristics of the system;
- calculation of the energy parameters of the system.

**Додаток Б**

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

Кафедра автоматики, електроніки та телекомунікацій

## **Модернізація електропривода установки для очищення оборотної води в замкненому циклі нафтопереробних заводів**

Кваліфікаційна робота бакалавра

Виконав:

студент групи 201пМЕ

Клименко Є.М.

Керівник:

Д.Т.Н., професор

Сільвестров А.М.

Полтава 2025

**Актуальність теми.** Успіхи в області силових напівпровідникової техніки, мікроелектроніки, систем автоматичного керування створюють необхідні передумови для вдосконалювання сучасного електропривода й значного розширення його функціональних і технічних можливостей, що дозволяє найбільш повно задовільнити всі технологічні вимоги, що постійно ускладнюються, і забезпечити ефективну роботу виробничих машин і агрегатів.

Відомо, що електроприводи насосів знесольовальних установок, які входять в склад обладнання нафтопереробних заводів для очищення води від залишків нафтопродуктів, значно зношені, а використання старих типів двигунів є низькоефективними. Тому використання сучасних електроприводів для надійної роботи насосів таких установок є досить **актуальною темою.**

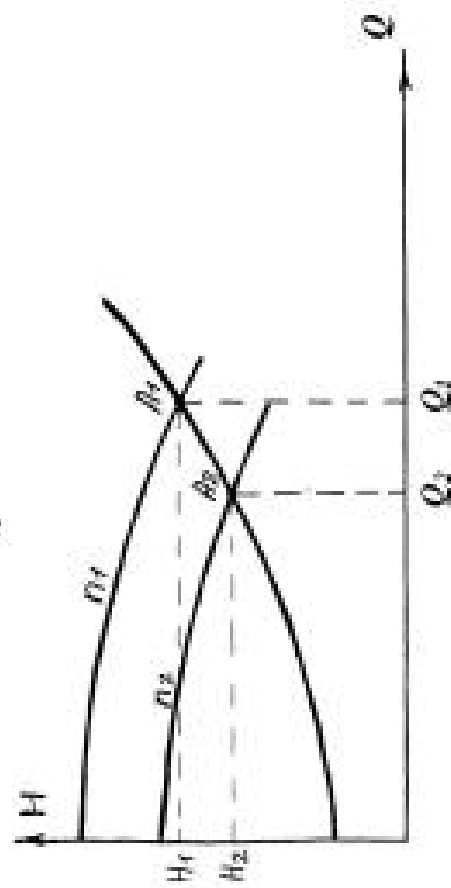
**Метою роботи** є модернізація електропривода насоса електрознесольованої установки, як однієї з найенергоємніших ланок цієї установки. Це призведе до економії електроенергії, підвищення надійності системи та виключення простоїв в її роботі. Для цього потрібно обрати сучасний двигун та розробити більш нову - надійну та ефективну систему керування електроприводом насоса знесольовальної установки.



## Характеристики насосного устаткування

4

№ з/п	Марка насоса	Шифр за схемою	Подія $Q$ , м <sup>3</sup> /год	Висота напору $H$ , м	Потужність ЕД насоса $P$ , кВт	Швидкість обертання двигуна $n$ , об/хв
1	СЕ1250/140	Н-1/1,2	1250	140	630	1500
2	ХО-90185ЕСД	Н-2/1,2	90	85	55	3000
3	Х280/7, І-СД	Н-9/1,2	280	72	100	1500
4	Д-320-50	Н-14/1,2	320	50	75	1450



Характеристики насоса й трубопроводу при регулюванні подачі змінюю частоти обертання

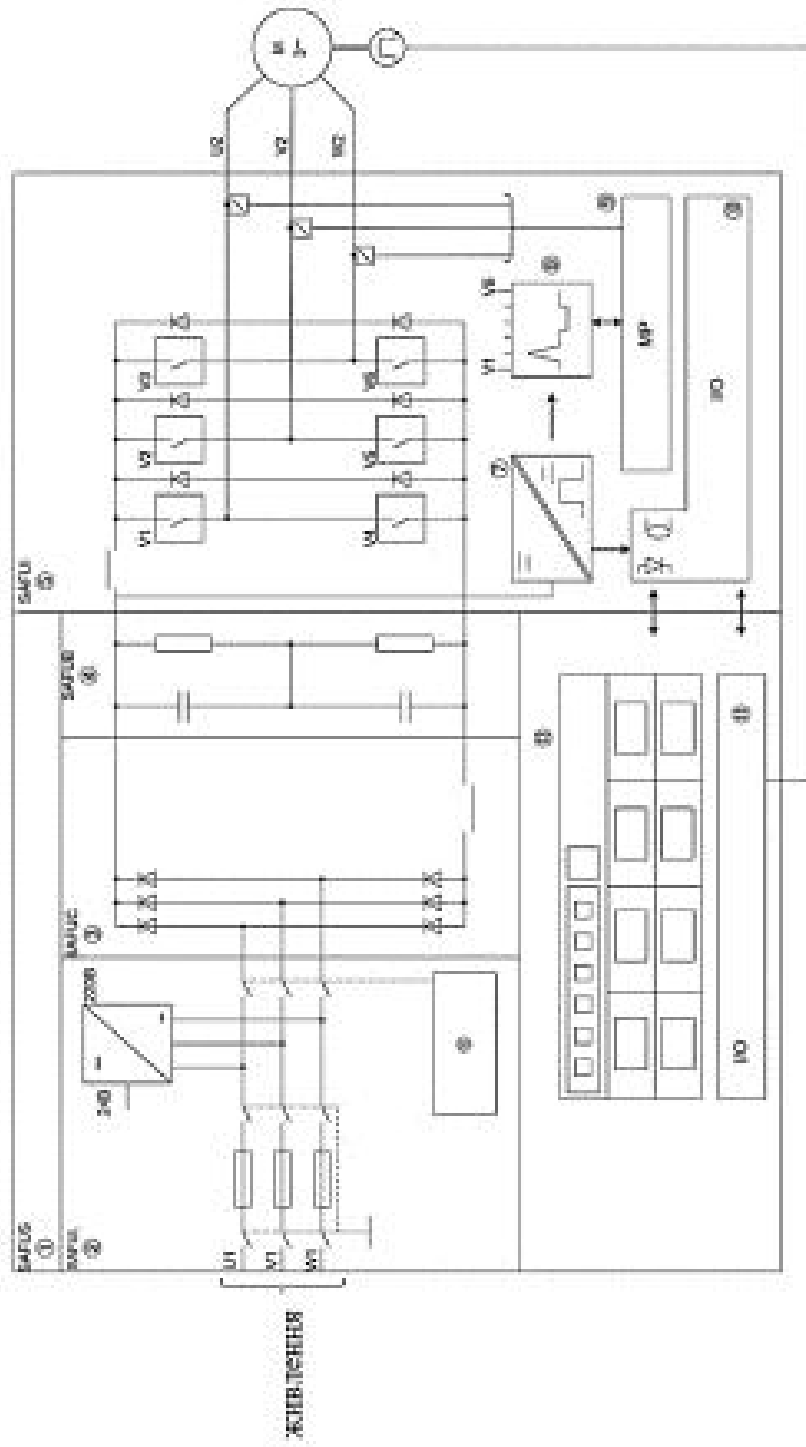


## Характеристики двигуна та перетворювача частоти

6

Характеристики двигуна типу АІР 315 S4	Позначення та величина
Потужність	$P_n = 160 \text{ кВт}$
Напруга	$U_n = 380 \text{ В}$
Частота обертання поля статора	$n_s = 1500 \text{ об/хв}$
Коефіцієнт номінального	$\zeta_n = 2,5\%$
ККД	$\eta = 94,9\%$
Коефіцієнт потужності	$\cos\varphi = 0,9$
Номінальний струм	$I = 288 \text{ А}$
Кратність максимального моменту	$\lambda_{\text{M}} = M_{\text{max}}/M_{\text{ном}} = 2,0$
Кратність пускового моменту	$\lambda_{\text{D}} = M_{\text{D}}/M_{\text{ном}} = 2,1$
<b>Характеристики перетворювача частоти типу ACS 600</b>	Значення
Напруга живлення (трифазна), В	380 +/- 10%
	400 +/- 10%
	415 +/- 10%
Номінальний вихідний струм ( $I_{\text{D}}$ )	300 А
Номінальна потужність двигуна ( $P_{\text{D}}$ )	160 кВт
Частота	48...63 Гц
Коефіцієнт потужності ( $\cos\varphi$ )	0,97
ККД при номінальній потужності	98%
Ступінь захисту	IP22

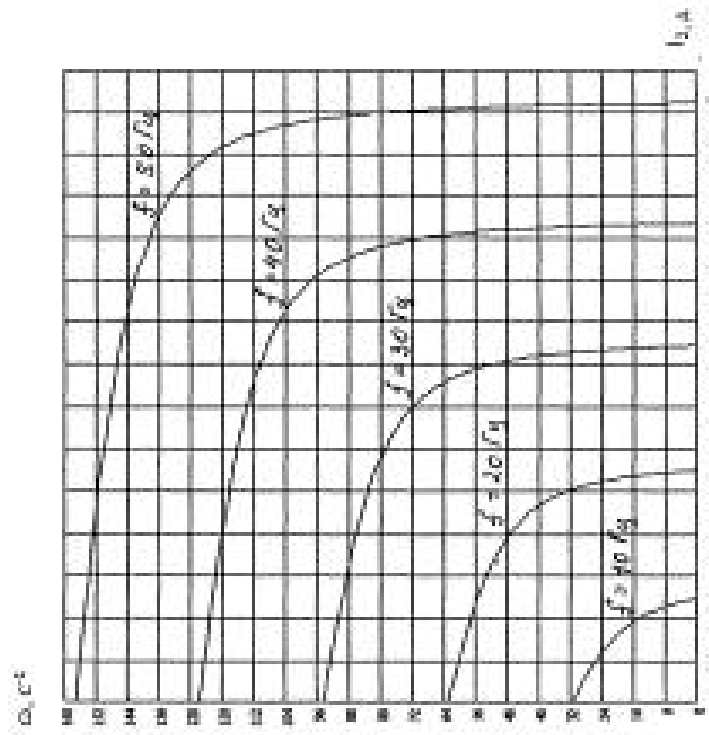
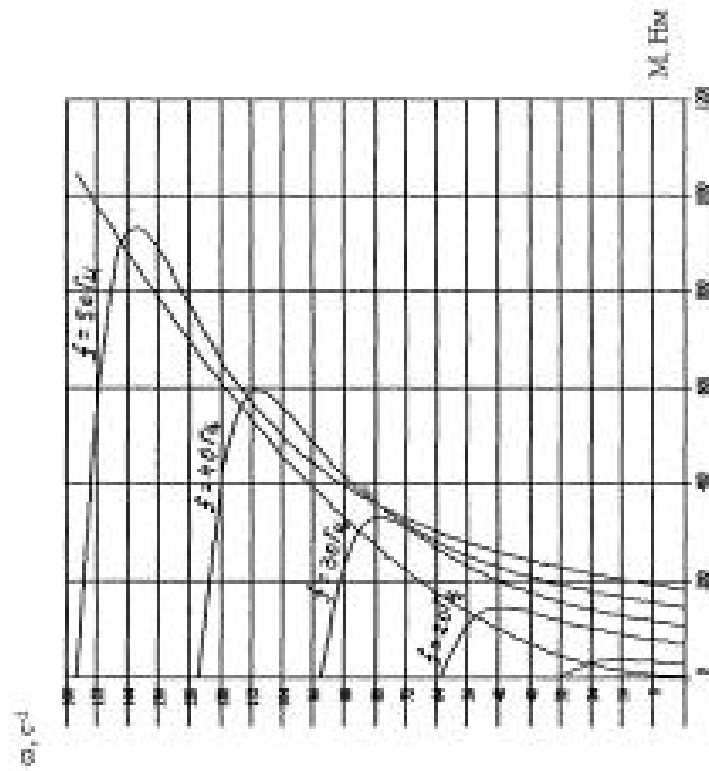
## Функціональна схема перетворювача частоти ACS 600 7



- 1 - блок джерела живлення, 2 - блок комутаційної апаратури, 3 - блок мережевого випрямляча, 4 - блок конденсаторної батареї, 5 - блок інвертора, 6 - плата керування словим контактором, 7 - джерело оперативної напруги, 8 - плата імпульсних підсилювачів, 9 - плата центрального процесора, 10 - плата інтерфейсу, 11 - плата клемних колодок, 12 - плата керування.

# Дослідження характеристик системи ПЧ-АД

8



Механічні характеристики системи ПЧ-АД

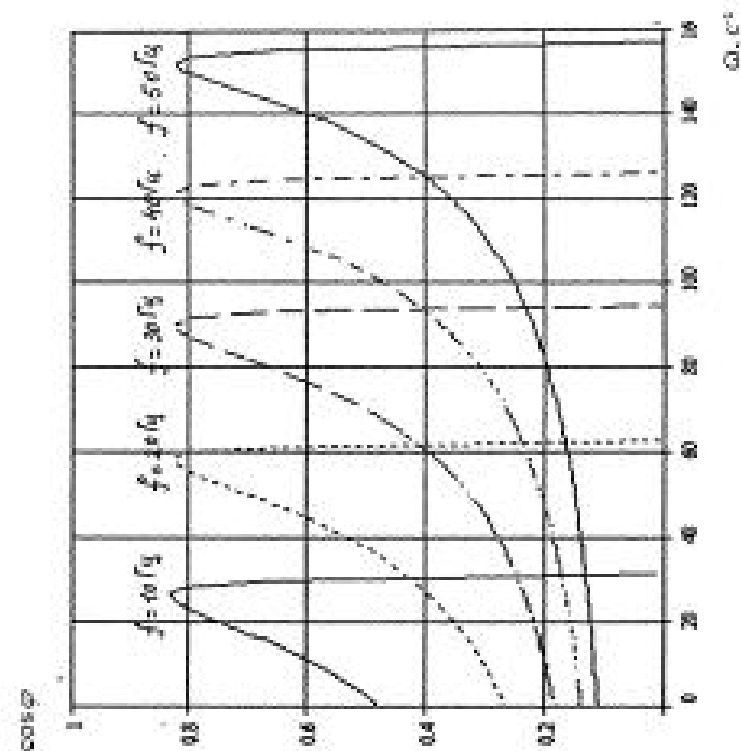
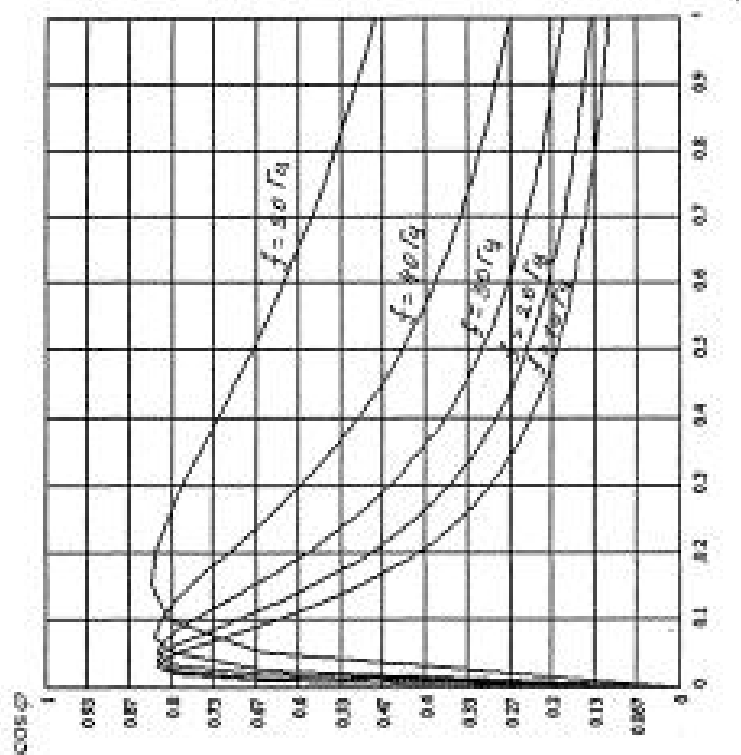
$$M = f(\omega)$$

Швидкісні характеристики систем ПЧ-АД

$$I_{1,4} = f(\omega)$$

## Дослідження характеристик системи ПЧ-АД

9



Залежність коефіцієнта потужності від швидкості обертання

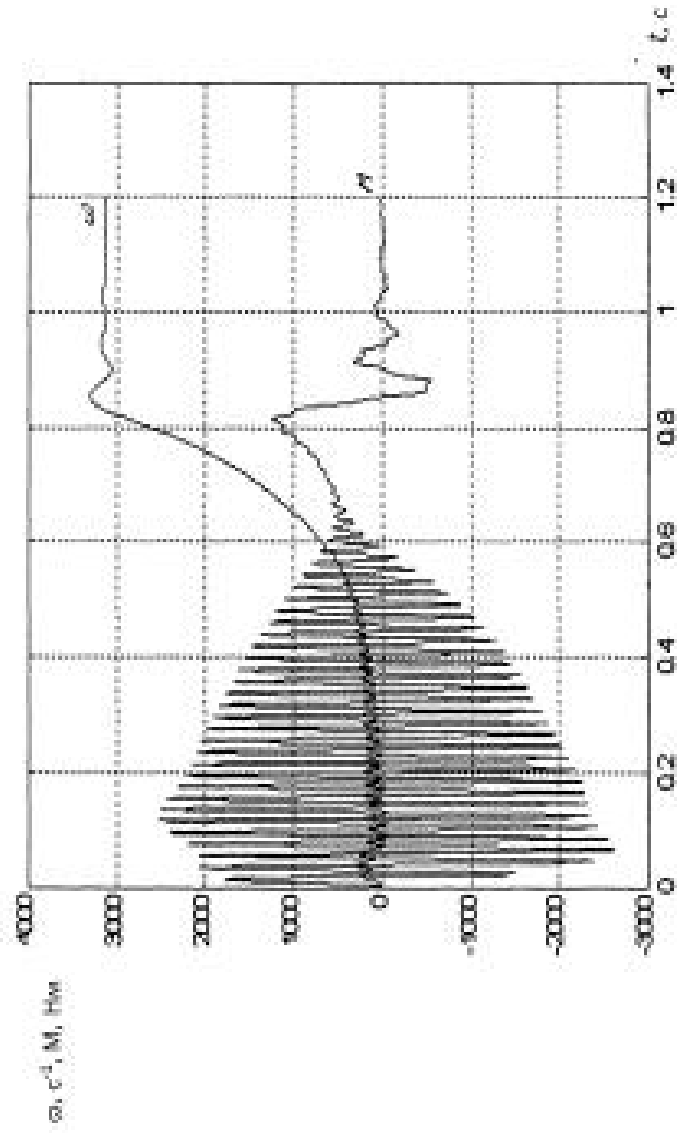
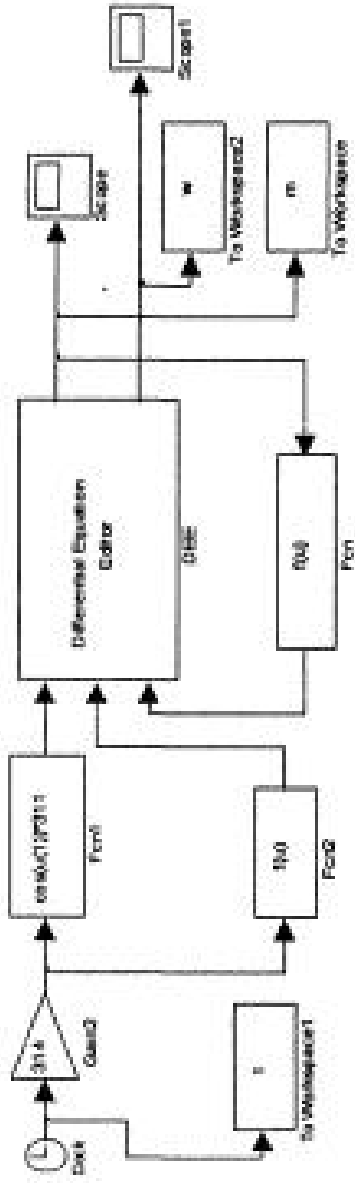
$$\cos \varphi = f(\omega)$$

Залежність коефіцієнта потужності від швидкості обертання

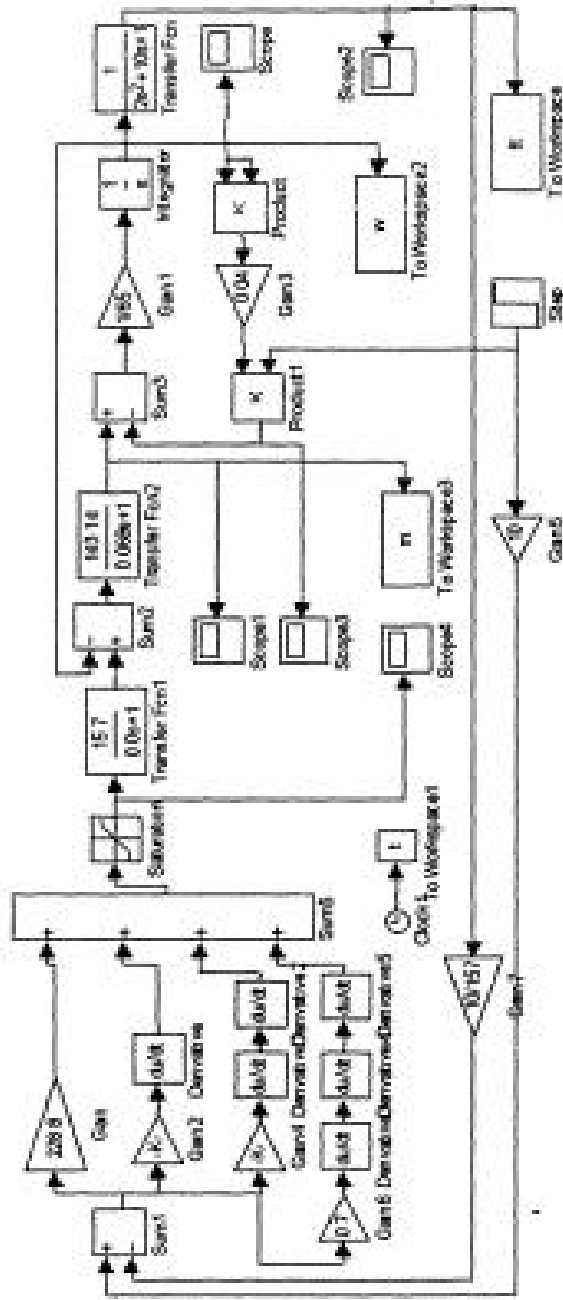
$$\cos \varphi = f(\omega)$$

## Моделювання пускових характеристик

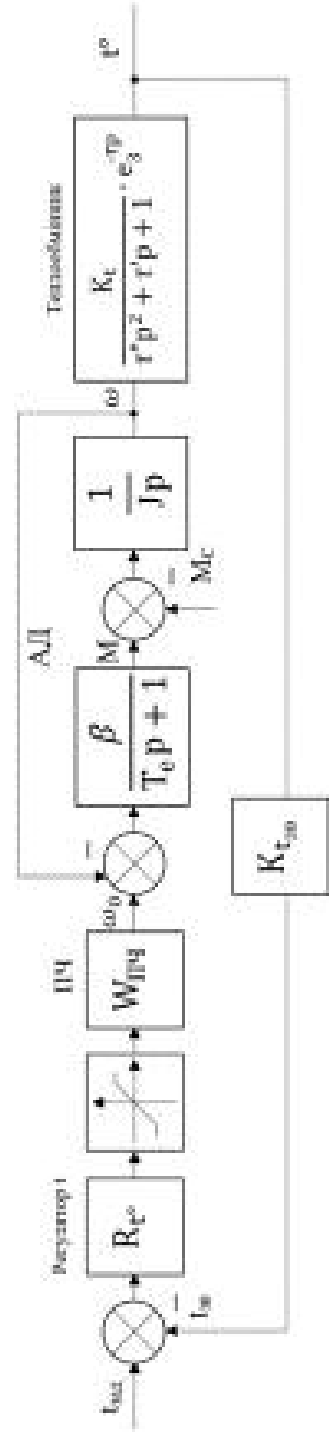
10



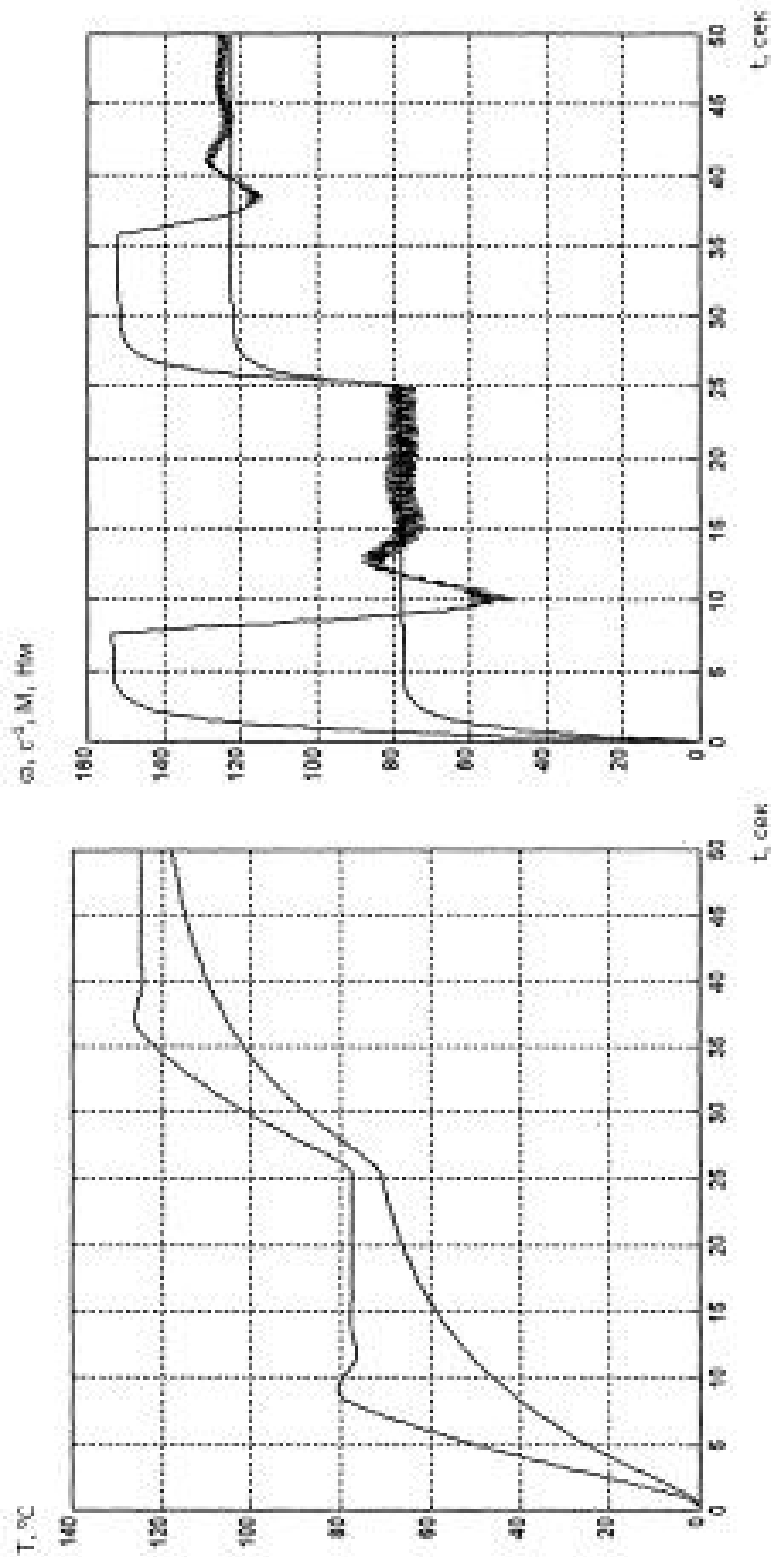
Математична модель теплообмінника



Структурна схема САК системи «ПЧ-АД – теплообмінник»



## Дослідження динамічних характеристик системи



Зміна температури в часі на вході та виході теплообмінника

Зміна моменту та швидкості двигуна при зміні температури в часі

1. В кваліфікаційній роботі було розглянуто технологічний процес очищення відходів нафтопереробного виробництва та розроблена автоматизована система електропривода насосного агрегату знесолувальної установки.
2. Розрахована потужність двигуна насоса, вибраний новий двигун відповідної потужності типу AP 315 S4.
3. Проведений аналіз принципів керування швидкістю асинхронних двигунів та доведена доцільність використання для насосного агрегату знесолувальної установки сучасного асинхронного електропривода на базі перетворювача частоти. Відповідно до параметрів системи вибраний перетворювач частоти типу ACS 600.
4. В роботі проведене складання схеми заміщення двигуна та розрахунок основних її параметрів, побудовані механічні і швидкісні характеристики двигуна.
5. Проведене дослідження роботи електропривода в статичному та динамічному режимах, побудовані та проаналізовані графіки зміни найбільш важливих параметрів. Розрахунок енергетичних параметрів системи показав доцільність її впровадження.
6. Результати даної роботи після більш детальної доробки можуть бути впроваджені в технологічний процес знесолування нафтових відходів.