

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістр
(назва освітнього ступеня)

на тему: **ДОСЛІДЖЕННЯ РЕГУЛЮВАННЯ НАПОРУ ВОДИ В СИСТЕМАХ ОПАЛЕННЯ**

Виконав(ла): студент(ка) VI курсу, групи ЕТм-61
спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка
та електромеханіка
(шифр і назва спеціальності)

	(підпис)	<u>Шворак Д. А.</u> (прізвище та ініціали)
Керівник	(підпис)	<u>Наконечний М. С.</u> (прізвище та ініціали)
Нормоконтроль	(підпис)	<u>Коваль В. П.</u> (прізвище та ініціали)
Завідувач кафедри	(підпис)	<u>Коваль В. П.</u> (прізвище та ініціали)
Рецензент	(підпис)	<u>Микитишин А. Г.</u> (прізвище та ініціали)

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)
Кафедра електричної інженерії
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

(підпис) (прізвище та ініціали)
« » 20__ р.

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня магістр
(назва освітнього ступеня)
за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(шифр і назва спеціальності)
студенту Шворак Дмитрій Анатолійович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження регулювання напору води в системах опалення

Керівник роботи Наконечний Мирослав Степанович, к.т.н.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від « 11 » жовтня 2024 року № 4/7-988

2. Термін подання студентом завершеної роботи грудень 2024 року

3. Вихідні дані до роботи

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

1 Аналітичний розділ

2 Проектно-конструкторський розділ

3 Розрахунково-дослідницький розділ

4 Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях

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

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	Гурик О. Я. к.т.н., доцент		
	Клепчик В. М. ст. викладач		
Нормоконтроль	Коваль В. П. к.т.н. доцент		

7. Дата видачі завдання 14 жовтня 2021 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

[illegible]

Студент

(підпис)

Шворак Д. А.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Наконечный М. С.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Шворак Д. А. Дослідження регулювання напору води в системах опалення. 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка; Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії. Кафедра електричної інженерії, група ЕТм-61. – Тернопіль: ТНТУ, 2024

сторінок. – 68, рисунків - 21; таблиць -3; джерел – 15.

У даній кваліфікаційній роботі на основі аналізу технологічної схеми системи теплопостачання визначено необхідність забезпечення продуктивності насоса 275 м³/год, для чого обрано насос НК 100-200/198 і асинхронний двигун MMG225M з короткозамкненим ротором. Виконано розрахунки механічних і електромеханічних характеристик двигуна, розроблено математичну модель у рухомій системі координат і створено її структурну схему.

За допомогою моделі в SIMULINK змодельовано динамічні характеристики двигуна при прямому пуску, що виявило недостатню якість перехідних процесів за змінного навантаження. Для покращення характеристик запропоновано використання частотного перетворювача Emotron FDU 40-090 СЕВ і проведено розрахунки характеристик при частотах 50, 40, 25 та 10 Гц за законом регулювання з I·R-компенсацією. Дослідження підтвердили, що додавання позитивного зворотного зв'язку за струмом розширює область максимального моменту на механічних характеристиках, забезпечуючи плавність перехідних процесів і обмеження динамічного моменту струму.

Ключові слова: частотне регулювання, електропривід, моделювання, ефективність.

ЗМІСТ

ВСТУП	7
1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ	10
1.1 Особливості опалювальної мережі та насосної станції як об'єктів управління.....	10
1.2 Методи та пристрої керування насосною станцією	15
1.3 Огляд систем керування та методів регулювання електропривода.....	17
1.4 Висновки до розділу	19
2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ.....	21
2.1 Опис системи теплопостачання.....	21
2.2 Вибір насоса.....	22
2.3 Вибір методу регулювання напору	27
2.4 Вибір датчика тиску.....	28
2.5 Перевірка двигуна за потужністю	30
2.6 Розрахунок основних параметрів та характеристик асинхронного електродвигуна.....	31
2.7 Рівняння асинхронної машини у системі відносних одиниць	38
2.8 Висновки до розділу	43
3 РОЗРАХУНКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ.....	44
3.1 Імітаційна модель асинхронного електродвигуна у програмному середовищі MATLAB	44
3.2 Моделювання динамічних характеристик асинхронного електродвигуна при прямому пуску.....	46
3.3 Вибір перетворювача частоти.....	50
3.4 Статистичні характеристики скалярного керування електроприводом насоса.....	52
3.5 Регулювання швидкості електроприводу за допомогою з I·R - компенсацією.....	57
3.6 Висновки до розділу	59
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	61
4.1 Причини електротравм та умови ураження людини електричним струмом	61

4.2 Система засобів та заходів з безпечної експлуатації електроустановок	62
4.3 Інженерні норми проектування об'єктів енергетики.	64
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	66
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	68

ВСТУП

Актуальність теми роботи. Сучасний стан систем теплопостачання потребує значних капітальних вкладень та інвестицій на оновлення магістральних мереж. Першочерговим завданням залишається продовження терміну служби теплотрас. Рішення цієї проблеми може здійснюватися за рахунок оптимізації теплових і гідравлічних характеристик і приведення параметрів магістралі до реального навантаження. Застосування систем контролю тиску в умовах відкритого водозабору системи дозволяє вирішити частину цієї проблеми. З практичної точки зору регулювати тиск можна за рахунок використання змінного електроприводу. В даний час електроприводи більшості установок виконані на базі асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором, керованим частотним перетворювачем.

Однак на більшості промислових підприємств вже є виконавчий механізм з електродвигуном. Система перетворювач частоти – асинхронний двигун (ПЧ-АД), в порівнянні з приводами постійного струму, має свої переваги і недоліки. Головними перевагами є простота налаштування та експлуатації системи. Основним недоліком є висока вартість частотного перетворювача. Ця система також має ряд особливостей:

1. Різноманітність частотних перетворювачів з однаковими технічними характеристиками;
2. Регулювання витрати та крутного моменту з боку статора;
3. Застосування обертової системи координат для розгляду процесів в асинхронному двигуні.

Метою роботи є розгляд векторного частотно-струмового керування для побудови імітаційної моделі в рухомій системі координат, з подальшою реалізацією в системі регульованого електроприводу магістрального насоса тепломережі.

Відповідно до поставленої мети були сформульовані такі **завдання дослідження**:

1. Проаналізувати процеси що протікають в системі опалення та з'ясувати вимоги до ведення процесу транспорту теплової енергії, які необхідно враховувати під час вибору систем управління електроприводом

2. На основі розрахунків електромеханічних характеристик електродвигуна побудувати його структурну схему.

3. Зробити обґрунтування вибору системи керування електроприводом системи опалення і на підставі цього, розробити та дослідити регульований електропривід з векторно-частотним струмовим керуванням.

Об'єкт дослідження: методи частотного регулювання швидкості електроприводу

Предмет дослідження: імітаційна модель електроприводу системи теплопостачання.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. За допомогою розробленої імітаційна модель асинхронного електродвигуна в системі візуального моделювання SIMULINK проведено моделювання динамічних характеристик асинхронного електродвигуна при прямому пуску.

2. Дослідження продемонстрували, що додавання позитивного зворотного зв'язку за струмом у систему керування сприяє розширенню області максимального моменту на механічних характеристиках. При цьому перехідні процеси в електроприводі проходять досить плавно, із забезпеченням обмеження динамічного моменту струму електродвигуна.

Практична цінність результатів дослідження: розроблено імітаційну модель для дослідження параметрів частотно-регульованого приводу в комп'ютерному середовищі MATLAB-Simulink.

Апробація результатів магістерської роботи. Основні положення роботи і її результати доповідалися на XIII Міжнародна науково-технічна конференція молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій» (Тернопіль, 2024 р.)

Структура роботи. Робота складається з розрахунково-пояснювальної записки та графічної частини. Розрахунково-пояснювальна записка складається з вступу, 4 розділів, висновків та переліку посилань.

АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1 Особливості опалювальної мережі та насосної станції як об'єктів управління

У водяних теплових мережах насоси використовують для підтримання заданих тисків і подачі необхідної кількості води до споживачів. Мережеві насоси створюють циркуляцію води в системі теплопостачання, а підживлювальні компенсують витік води і підтримують необхідний рівень п'єзометричних ліній як за статичного, так і динамічного режимів.

Особливістю роботи насосних агрегатів у системах теплопостачання є нерівномірність графіка споживання води залежно від часу доби, дня тижня і пори року. Підтримка постійного обсягу подачі води призводить до значного ослаблення напору в трубопроводі в «години пік», підвищення забору води споживачами і до істотного збільшення тиску в магістральному трубопроводі. збільшення тиску в магістральному трубопроводі, а коли витрата води знижується, виникають втрати води на шляху до споживача і виникає ймовірність розривів трубопроводу, тобто виникнення гідравлічного удару.

У трубопроводах теплових мереж цей процес виникає під час раптового відключення мережевих насосів або насосів на насосних підстанціях, у разі увімкнення насосів на повністю відкриті засувки на всмоктуванні та виході води і супроводжується миттєвими місцевими підвищеннями і зниженнями тиску, що призводять до руйнування трубопроводів

Через ці причини з'являється дедалі більша кількість розробок у сфері автоматизації насосних станцій. При цьому існують певні вимоги до роботи насосних станцій, основними з яких є такі чинники: підтримання високої точності заданого тиску в системі теплопостачання; діагностика напруги живлення станцій і відновлення роботи насосної станції після різних збоїв живлення; діагностика всіх датчиків системи і підтримання працездатності

станції у разі несправності датчиків; калібрування датчиків із пульта керування; захист елементів насоса при роботі на сухому ходу; діагностика та функціональна перевірка роботи насосів; можливість передавання параметрів роботи станції виділеними каналами зв'язку; коригування параметру роботи станції з пульта керування; забезпечення протипожежного режиму роботи; реалізація ручного режиму роботи станції під час технічного обслуговування.

Теплова мережа, як об'єкт управління, є складною динамічною системою, що складається з просторово-розподілених елементів із різними теплогідравлічними характеристиками. Багато її особливостей притаманні й іншим великим енергетичним системам.

Серед загальних особливостей теплопостачального комплексу слід відзначити:

- безперервність у часі процесів пов'язаних з виробництвом, транспортуванням, розподілом та споживанням теплової енергії;

- складність внутрішніх взаємозв'язків процесів опалення, гарячого водопостачання та вентиляції;

- зміна споживання з часом теплової енергії та гарячого водопостачання, гідравлічного і теплового режимів теплопостачання;

- стохастичність характеру збурень;

- просторову розподіленість елементів комплексу за геодезичними відмітками місцевості;

- схильність теплоносія на певних ділянках та вузлах мережі теплопостачання до аварій та витоків води;

- виникнення труднощів під час оцінювання актуальних значень техніко-економічних показників, які характеризують якість ведення процесу;

- ієрархічність структур управління за безпосередньої участі суб'єкта в контурі управління;

- висока централізація управління поєднується з децентралізованим оперативним управлінням процесами теплопостачання.

Наступна особливість полягає в тому, що теплопостачальний комплекс характеризується невизначеністю :

- пов'язані з нестационарністю параметрів об'єкта;
- на гідравлічну характеристику трубопроводів впливає термін їх служби;
- стан теплової ізоляції трубопроводу залежить від рівня її зволоженості, тепловтрати будівель визначаються кліматичними умовами та інфільтрацією через дверні й віконні прорізи, а споживачі розташовані розосереджено на території міста.
- зовнішні збурення мають стохастичний характер, зумовлений кліматичними чинниками та структурою споживаного навантаження, яка варіюється залежно від часу доби, дня тижня тощо.
- критерії управління супроводжуються протиріччям між інтересами виробника й споживача: виробник прагне максимізувати відпуск теплової енергії при мінімальних витратах, тоді як споживач зацікавлений у задоволенні власних потреб.

Його метою є забезпечення власних потреб, зокрема:

- для систем опалення – підтримання температури в приміщенні на рівні 22–24 °С;
- для систем вентиляції – забезпечення належного повітрообміну та температури 18–20 °С;
- для систем гарячого водопостачання – підтримання температури води в межах 55–60 °С.

Централізація виробництва теплоти вигідна виробнику.

До основних специфічних особливостей теплопостачального комплексу належать: динамічні властивості комплексу, які характеризуються великими ємнісними і транспортними запізненнями по каналах передачі збурень і керуючих впливів.

Режим функціонування теплопостачального комплексу характеризується різними за фізичною сутністю параметрами:

- Динамічні характеристики по трактах передачі тиску і температури різко відрізняються одна від одної. Витрати води в системі теплових мереж змінюються практично миттєво, без інерційності. Натомість процес поширення температурної хвилі розгалуженою тепловою мережею, який залежить від швидкості руху теплоносія, може тривати кілька годин. Якщо перегріта вода з температурою 130 °С, що подається від центрального джерела, проходить через регульовальну арматуру або автоматичні клапани, і при цьому тиск у трубопроводі знижується, частина води може закипіти. У результаті в трубопроводі утворюється водяна пара, що призводить до розриву потоку води (утворення парової пробки). Під час відновлення циркуляції це може спричинити гідравлічний удар, який здатний пошкодити трубопровід, арматуру та нагрівальні прилади в будівлях. Щоб уникнути таких аварій, перегріта вода повинна транспортуватися за тиску, вищого за тиск пароутворення, відповідного температурі теплоносія. Дотримання цього правила є обов'язковим під час експлуатації теплових мереж.

- Висока теплоємність, масова щільність і відмінні гігієнічні властивості роблять воду найефективнішим теплоносієм для систем опалення, за умови її достатньої кількості. Проте головним недоліком води є ризик замерзання в трубопроводах при температурах нижче 0 °С, що може спричинити розрив труб, їх пошкодження та утворення високого гідростатичного тиску в системі теплопостачання.

Інерційні властивості окремих паралельно розташованих ланок суттєво відрізняються між собою. Теплові хвилі, які виникають через коливання температури зовнішнього повітря та проходять крізь теплоємні огороження (стіни), значно затухають, відстають за фазою й характеризуються як повільні теплові втрати. Натомість теплові хвилі, що проникають крізь нетеплоємні огороження (вікна), практично синхронні зі зміною зовнішньої температури й визначаються як швидкі теплові втрати.

Дослідження [9] показали, що для оптимізації автоматичного управління відпуском теплоти необхідно враховувати диференційовані підходи до повільних і швидких тепловтрат.

У зв'язку з чим під час управління системою централізованого теплопостачання (СЦТ) доводиться враховувати не тільки комплекс метеофакторів у цей момент часу, але й також погодні умови як за попередній період, так і з врахуванням можливих змін в майбутньому;

"Окрім загальних та специфічних особливостей систем централізованого теплопостачання (СЦТ), їх також вирізняють наступні характеристики:

Нерівномірна автоматизація: Джерела теплоти, як правило, мають високий рівень автоматизації, натомість обладнання теплових мереж та теплових пунктів у споживачів майже не автоматизоване.

Транспортування параметрів, а не продукту: На відміну від інших трубопровідних систем, теплові мережі транспортують не сам продукт (наприклад, нафту чи газ), а його параметри – теплоту, температуру та тиск. Ці параметри повинні відповідати вимогам різних споживчих систем, таких як опалення, вентиляція та гаряче водопостачання.

Інерційність опалювального навантаження: Основне навантаження споживачів – опалення – характеризується низькою чутливістю до змін параметрів теплоносія через високу акумулюючу здатність будівель. Це означає, що будівлі здатні зберігати тепло протягом певного часу, що згладжує вплив короточасних коливань температури теплоносія.

Різні режими споживання та неефективність управління: Споживачі теплоти перебувають у різних режимних умовах, що змушує систему управління орієнтуватися на «найгіршого» або «найдалшого» споживача. Внаслідок цього інші споживачі отримують надмірну кількість теплоти, що призводить до неефективного використання енергії."

1.2 Методи та пристрої керування насосною станцією

Методи регулювання режимами роботи насосних установок Для відцентрових насосів застосовують такі способи регулювання подачі рідини і тиску:

- дросельне регулювання;
- перепуск частини потоку рідини з вихідного патрубка насоса у вхідний;
- ступінчате регулювання;
- зміна частоти обертання насоса.

Дроселювання полягає у створенні штучного опору руху рідини (теплоносія) в трубопроводі. Цей опір "зменшує" здатність насоса прокачувати рідину, що призводить до зменшення витрати (подачі) теплоносія в систему. Завдяки чому характеристика $Q - H$ мережі піднімається крутіше $Q - H'_{тр}$ (рисунок.1.1) та перетинається з характеристикою насоса в точці 2, що забезпечує необхідну подачу Q_3 .

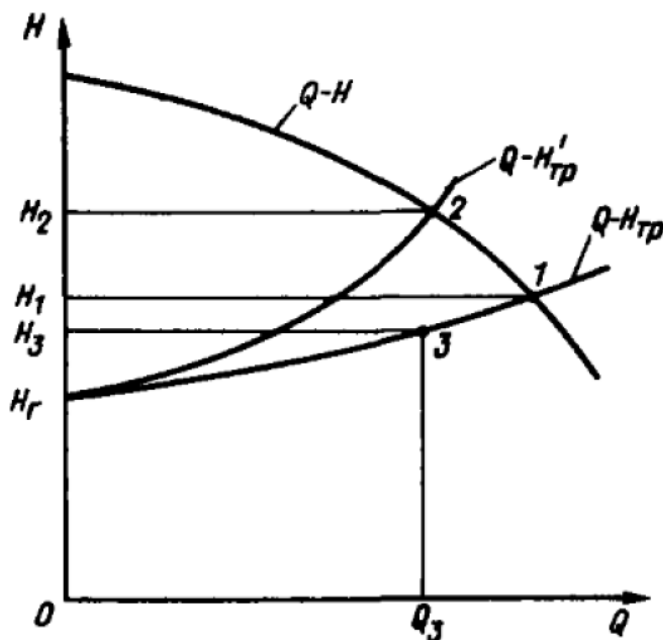


Рисунок 1.1 - $Q - H$ характеристика системи при регулюванні за допомогою дроселювання

В такому випадку напір системи становить H_3 , а напір насоса H_2 . Тоді, втрата енергії в результаті збільшення опору в засувці становитиме $N = Q_{зр} p$, де $p = H_2 - H_3$

В робочій точці 3 потужність насоса становитиме:

$$N_3 = \rho g Q_3 H_3 / 102$$

Тоді повна потужність:

$$N = \rho g Q_3 H_3 / 102 \eta_3$$

Остаточню ККД установки:

$$\eta = \eta_3 H_3 / H_2$$

З вище наведеного тексту стає зрозуміло, що коефіцієнт корисної дії (ККД) насосної установки знижується зі збільшенням різниці між напором, який створює насос, та напором, що фактично потрібен для мережі. Це відбувається тому, що при великій різниці значна частина енергії витрачається неефективно.

Регулювання напору перепуском: Цей метод передбачає відведення частини рідини з виходу насоса назад на його вхід за допомогою засувки. Енергія, витрачена на циркуляцію рідини по цьому замкнутому колу, не виконує корисної роботи, що призводить до зниження ККД. Подача регулюється лише у бік зменшення. Хоча перепуск рідини покращує кавітаційні характеристики насоса, він також знижує ККД системи, вимагає додаткових трубопроводів та арматури, що ускладнює монтаж та обслуговування. Через ці недоліки цей метод не набув поширення у міському водопостачанні.

Ступеневе регулювання: Цей метод полягає у вмиканні або вимиканні насосів. Він простий в управлінні, оскільки не потребує складних регулювальних пристроїв. Однак, він не забезпечує плавного регулювання подачі, що призводить до частих пусків та зупинок двигунів, скорочуючи термін їх служби. Також для згладжування коливань подачі необхідний

проміжний акумулюючий резервуар. Ці недоліки обмежують застосування цього методу.

Регулювання частоти обертання: Зміна частоти обертання робочого колеса дозволяє здійснювати безперервне регулювання продуктивності з найменшими втратами енергії порівняно з іншими методами. Це досягається шляхом точного регулювання потужності насоса відповідно до потреб мережі. Однак, цей метод вимагає значних витрат на регулювальне обладнання, особливо для потужних установок, та може впливати на електромагнітну сумісність з мережею. Незважаючи на це, завдяки зниженню вартості регульованих електроприводів, цей спосіб вважається найбільш перспективним. Але все-таки вартість регульованих електроприводів знижується, робить цей спосіб найперспективнішим.

1.3 Огляд систем керування та методів регулювання електропривода

Системи керування та способи регулювання електропривода є важливими складовими сучасних технологій, які забезпечують автоматизацію виробничих процесів, енергоефективність та надійність обладнання. Розглянемо основні аспекти цих систем та методів їх регулювання.

Електропривод — це комплекс пристроїв, який забезпечує перетворення електричної енергії в механічну і її передачу для виконання певної роботи. До його складу входять електродвигун, перетворювач енергії, пристрої керування та регулювання. Системи керування електроприводами поділяються на декілька основних типів: релейно-контакторні, системи з імпульсною модуляцією, адаптивні та інтелектуальні системи керування.

Релейно-контакторні системи

Ці системи базуються на використанні реле та контакторів для забезпечення комутації електричних ланцюгів. Вони є найпростішими та найдешевшими, але з точки зору точності та швидкодії мають обмеження.

Релейно-контакторні системи використовуються в основному для керування простими механізмами, такими як підйомники, конвеєри чи вентилятори.

Системи з імпульсною модуляцією

Широтно-імпульсна модуляція (ШІМ) є одним із найпоширеніших методів керування сучасними електроприводами. Вона забезпечує плавне регулювання швидкості обертання електродвигуна шляхом зміни середньої напруги на його вході. ШІМ-системи є енергоефективними, компактними та забезпечують високий рівень точності. Їх часто використовують у промислових установках, транспорті, а також у побутових пристроях, таких як кондиціонери чи пральні машини.

Адаптивні системи керування

Адаптивні системи здатні змінювати параметри керування залежно від змінних умов роботи електропривода. Вони використовують спеціальні алгоритми, що аналізують стан системи в реальному часі та підлаштовують параметри для досягнення оптимальних результатів. Такі системи ефективні в умовах змінних навантажень і широко застосовуються в складному промисловому обладнанні.

Інтелектуальні системи керування

Інтелектуальні системи використовують елементи штучного інтелекту, нейронні мережі та алгоритми машинного навчання для керування електроприводами. Вони забезпечують не лише високий рівень точності й адаптивності, але й здатність до самонавчання та прогнозування. Наприклад, вони можуть передбачати зношування обладнання та запобігати аварійним ситуаціям. Інтелектуальні системи часто застосовуються у високотехнологічних галузях, таких як робототехніка та автоматизоване виробництво.

Способи регулювання електропривода

Регулювання електропривода здійснюється шляхом зміни швидкості, крутного моменту чи положення ротора двигуна. Основні методи регулювання включають:

Амплітудний метод: Цей метод полягає у зміні амплітуди напруги, що подається на двигун. При зменшенні напруги зменшується потужність, що передається двигуном, і, відповідно, його швидкість обертання. Цей спосіб є простим у реалізації, але має деякі обмеження. Наприклад, при значному зниженні напруги двигун може втратити стабільність роботи через недостатню величину моменту, що розвивається. Тому амплітудний метод зазвичай застосовується для керування в умовах, де не потрібна висока точність або великий діапазон регулювання швидкості.

Частотний метод: Один із найефективніших способів регулювання швидкості обертання двигуна. Він базується на зміні частоти напруги живлення, що безпосередньо впливає на швидкість обертання ротора. Цей метод реалізується за допомогою перетворювачів частоти (інверторів), які генерують змінну частоту для подачі на двигун. Частотний метод дозволяє досягати високої точності регулювання, забезпечує стабільність роботи двигуна в широкому діапазоні швидкостей і є енергоефективним. Завдяки цим перевагам він широко використовується в промислових та побутових електроприводах, наприклад, у насосах, вентиляторах та конвеєрах.

Фазовий метод: застосовується для регулювання асинхронних двигунів шляхом зміни кута фазового зсуву.

Комбіновані методи: поєднання декількох методів для досягнення високої точності та ефективності.

1.4 Висновки до розділу

Аналіз процесів, що протікають у системі опалення показав, що вони належать до класу безперервних, просторово-розподілених, нелінійних, багатовимірних процесів.

Випадкові коливання кількісних і якісних характеристик теплової енергії та дрейф характеристик відцентрових насосів визначають стохастичність і нестационарність процесу.

Особливості об'єкта накладають певні вимоги до ведення процесу транспорту теплової енергії, які необхідно враховувати під час вибору систем управління в системі опалення.

ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

2.1 Опис системи теплопостачання

Система теплопостачання включає в себе чотири основних паралельних контуру. Відкрита система забору води має на увазі нестабільність робочої точки насоса. У деяких будинках району воду для технічних потреб беруть безпосередньо з системи теплопостачання. Отже, замкнута система - це на практиці система зі змінною витратою і тиском. Тому необхідно як регулювати тиск в залежності від витрати в весняний сезон при профілактичних роботах, так і підтримувати його на заданому рівні в зимовий період. Швидкість потоку змінюється дроселюванням за допомогою регулюючого клапана. Таким чином, змінюється опір трубної мережі. Це дуже простий, але вкрай неекономічний метод.

Насос запускається при мінімальному навантаженні. Цей режим може бути реалізований шляхом закриття заслінки, яка відсікає навантаження від насоса. Якщо такого клапана немає, то в процесі запуску насоса в системі теплопостачання будуть виникати гідравлічні удари, які негативно позначаються на довговічності насоса. Після запуску насос виходить на робочу точку, завдяки поступовому відкриттю заслінки. Напруга живильної мережі нестабільна, тому можливі короточасні провали насоса. Електромагнітний момент напруги живлення асинхронного двигуна має квадратичну залежність, яка показує можливе відключення електродвигуна насоса при малому зниженні напруги. При наступних запусках насоса необхідно повторити всі необхідні дії для доведення його до робочої точки. Ці заходи вимагають великих витрат і стають недоцільними при частих перепадах напруги[1].

Часто після запуску насоса заслінка не відкривається вчасно або закривається під час роботи насоса. У системах теплопостачання це призводить до кавітації. При обертанні колесо насоса спінює непроточну нагріту воду, в результаті чого рідина «закипає» з утворенням пружних

бульбашок, які розривають крильчатку. Явище супроводжується появою шуму

На рисунку 2.1 показана схема системи теплопостачання котельні.

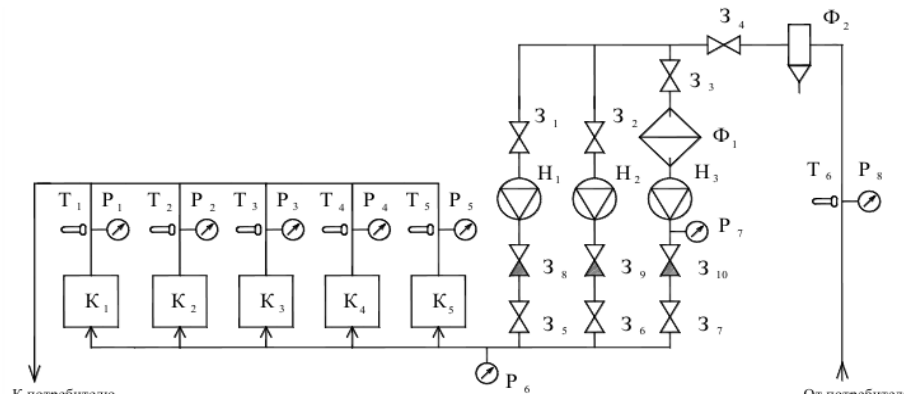


Рисунок 2.1 - Технологічна схема системи теплопостачання.

Т – датчик температури, Р – датчик тиску, З – клапан, К – котел, Ф – фільтр, Н – насос.

Для нагріву води система обладнана котлами К1 - К5, що працюють на твердому вугіллі. Котли оснащені датчиками тиску і температури Р1 - Р5, Т1 - Т5. Циркуляція води забезпечується насосами Н1 - Н3. Насос Н3 новий з датчиком тиску Р7 і механічним фільтром F1. Для запобігання зворотного потоку води через насос передбачені зворотні клапани 38 - 310. Клапани 35 - 37 - запірні і контрольні. На вході в систему також встановлений великий фільтр-відбійник Ф2, запірний вентиль 34, датчики температури на вході Т6 і датчики тиску Р8.

2.2 Вибір насоса

Основним показником при підборі циркуляційного мережевого насоса для системи теплопостачання є визначення споживаної теплової енергії всіх будівель, згідно з розрахунковим навантаженням на найхолоднішу пору року. Попередньо розраховую її по площі опалювального приміщення. Згідно з європейськими стандартами, для обігріву 1 м² в будинках з декількома

квартирами потрібно 100 Вт, для будинків з трьома і більше квартирами потрібно 70 Вт. У разі невідповідності будівлі необхідним стандартам, проектувальнику необхідно враховувати значення питомого споживання тепла вище, щоб врахувати необхідні недоліки. Для житлових будівель та виробничих приміщень з покращеними теплоізоляційними властивостями необхідно 30 - 50 Вт/м². В ДБН В.2.5-39:2008 "Теплові мережі" рекомендовано при розрахунку максимального теплового потоку для обігріву 1 м² площі житлових будинків, використовувати наступні показники:

- для 1-2-поверхових будівель - 173 Вт/м² при розрахунковій температурі зовнішнього повітря 25°C і 177 Вт/м² при -30 °C;
- для 3-4-поверхових будівель - 97 і 101 Вт/м² відповідно.

Визначивши витрату тепла $\sum G = 5960458,4$ ккал, необхідно переходити до розрахунку потужності насоса.

$$Q = \frac{3.6 \cdot \sum G}{c \cdot \Delta T};$$

де c — питома теплоємність води, що дорівнює 4,2 кДж/кг °C;

ΔT - різниця температур між подаючим та зворотним трубопроводами системи опалення ($\Delta T = 22$ °C).

Щоб перевести отримане значення в м³/год, необхідно його розділити на густину води при температурі 80°C, вона становить 971,8 кг/м³. Підсумкова формула розрахунку продуктивності насоса при обліку теплових втрат в кілокалоріях може бути спрощена:

$$Q = \frac{\sum G}{\Delta T} = \frac{5960458.4 \cdot 10^{-3}}{22} \approx 275 \text{ м}^3/\text{год}$$

Насос повинен бути забезпечений необхідним тиском для подолання опору трубопроводу подачі тепла. Для цього необхідно визначити втрати найдовшої ділянки магістралі. Система теплопостачання чотирьохконтурна. Проводимо розрахунки для найдовшого контуру $H = 45$ м.

Робочою характеристикою насосного агрегату є залежність між

витратою насоса Q , $\text{м}^3/\text{год}$; Напір дорівнює висоті, на яку рідина може піднятися над опорною поверхнею.

Для забезпечення нормальної роботи основного відцентрового насоса, особливо в системах з великою протяжністю або значною висотою підйому рідини, часто необхідно забезпечити достатній тиск на його вході. Ця умова називається "кавітаційним запасом" і запобігає кавітації – утворенню бульбашок пари в рідині, що може призвести до пошкодження насоса та зниження його ефективності. Для створення необхідного тиску на вході основного насоса часто використовують допоміжний підвищувальний насос.

Допоміжний підвищувальний насос, також відомий як бустерний насос, встановлюється перед основним насосом на всмоктувальному трубопроводі. Його основна функція полягає у підвищенні тиску рідини перед її потраплянням в основний насос. Це забезпечує наступні переваги:

Запобігання кавітації: Підвищення тиску на вході основного насоса запобігає утворенню бульбашок пари (кавітації), які можуть руйнувати робоче колесо та інші елементи насоса.

Покращення характеристик основного насоса: Забезпечення стабільного та достатнього тиску на вході дозволяє основному насосу працювати в оптимальному режимі, забезпечуючи необхідну подачу та напір.

Можливість підйому рідини на більшу висоту: У системах з великою висотою підйому допоміжний насос допомагає основному насосу подолати гравітаційну силу та забезпечити подачу рідини на потрібний рівень.

Компенсація втрат тиску у всмоктувальному трубопроводі: Довгі або складні всмоктувальні трубопроводи можуть створювати значні втрати тиску. Допоміжний насос компенсує ці втрати, забезпечуючи необхідний тиск на вході основного насоса.

В даний час в якості циркуляційних насосів широко використовуються насоси з «сухим» ротором. У них електродвигуни не контактують з водою, що перекачується. До них відносяться традиційні консольні насоси, моноблочні насоси, а також насоси Inline [2].

Використовуючи задані і розраховані параметри системи, підбирається насос. Для цього була використана програма пошуку і підбору насосного обладнання міжнародного концерну Grundfos: Grundfos Product Center.

На рисунку 2.2 показані наступні характеристики: насос $H = f(Q)$; магістралі; потужність двигуна $P2 = f(Q)$; напір на вході $NPSH = f(Q)$; ККД насоса $\eta = f(Q)$.

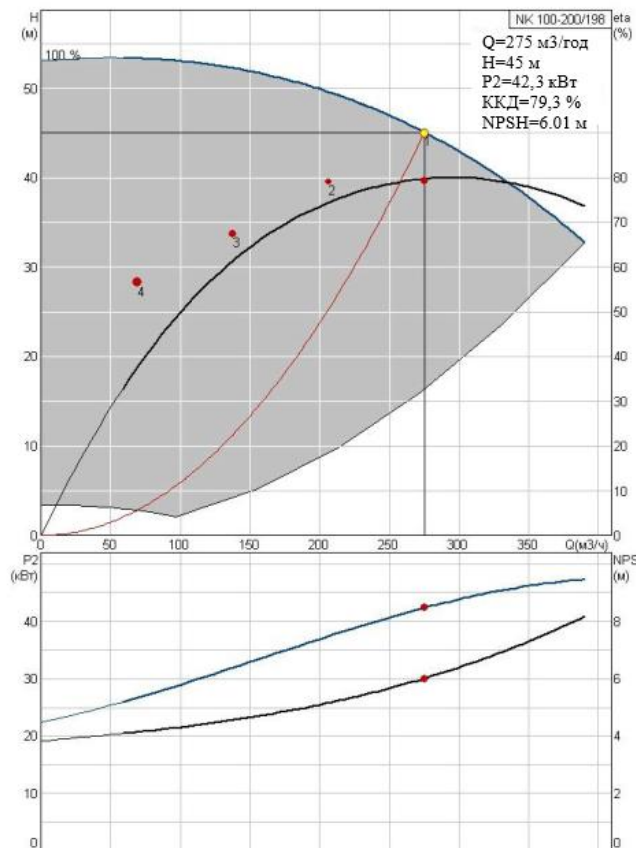


Рисунок 2.2 – Характеристики насоса

Ці характеристики є основою для підбору насоса. Програма підбрала насос NK 100 - 200/198, де 100 - номінальний діаметр відвідного патрубка; 200 - номінальний діаметр крильчатки, 198 - фактичний діаметр крильчатки в міліметрах.

Насос призначений для подачі чистих або злегка каламутних рідин без абразивних або довговолонистих включень і агресивних до матеріалу деталей насоса речовин. Область застосування:

- Опалювальне обладнання.

- Системи водопостачання.
- Системи вентиляції та кондиціонування.
- Насос води в системах водяного охолодження.
- Перекачування технічної та побутової води.
- Протипожежне обладнання.
- Спринклерні та зрошувальні системи.

Одноступінчастий відцентровий насос з горизонтальним розташуванням валу, осьовим всмоктуванням і радіальним нагнітальним патрубками. Розміри і технічні характеристики насоса NK відповідають стандарту EN 733, 10 бар, корпус і торцеве ущільнення насоса розраховані на тиск 16 бар. Фланці на всмоктувальних і нагнітальних патрубках відповідають стандарту EN 7005 PN 10/16. Всі насоси мають гідравлічний відведення від осьового навантаження відповідно до ISO 1940 Клас 6.3. Робоче колесо гідравлічно збалансоване.

Параметри рідини, що перекачується:

- Мінімальна температура рідини: -10°C
- Максимальна температура рідини: 120°C

Технічні характеристики:

Тип ущільнення валу: BAQE; В - гумове сильфонне ущільнення, А - графіт з дифузійним насиченням металом (антифрикційне кільце), Q - карбід кремнію (зустрічне кільце), Е - EPDM (допоміжне ущільнення).

Матеріали насоса:

- Матеріал, робоче колесо: Чавун; EN-JL1040 DIN W.-Nr.
- Клас 35-40 ASTM

Умови монтажу:

- Максимальна температура оточуючого середовища: 60°C
- Максимальний робочий тиск: 16 Бар
- Стандартне з'єднання труб: DIN
- Розмір вхідного отвору насоса: DN 125

- Розмір вихідного отвору насоса: DN 100
- Тип зчеплення: розпирний
- Щілинне ущільнення: присутній
- Опорна рама: С-канал

Насос поставляється в зібраному вигляді і складається з основної насосної частини, опорної плити, муфти із захисним кожухом і електродвигуна відповідно до DIN 24 259.



Рисунок 2.3 – Загальний вигляд насоса NK 100 - 200/198

2.3 Вибір методу регулювання напору

Найбільш простим і часто використовуваним методом регулювання частоти обертання насоса є зменшення перетину напірного трубопроводу, тобто створення додаткового опору потоку води, що забезпечується замикання органу управління клапаном. Так як кожен ступінь замикання керуючої штанги відповідає певним втратам напору, то можна отримати будь-який режим роботи насоса аж до нульової подачі.

Перевага цього методу полягає в тому, що процес дроселювання легко автоматизувати і дистанційно управляти і не вимагає установки спеціального

додаткового обладнання. Однак при такому способі регулювання знижується ККД насосів і збільшується питома витрата електроенергії. При дроселюванні зазвичай використовується схема з установкою регулюючої штанги на виході з насосної станції. Перспективною альтернативою цьому способу регулювання є частотне регулювання частоти обертання асинхронного електродвигуна. Для цього не потрібний великий діапазон зміни швидкості насоса. Тому тут небезпечні малі швидкості, за яких двигун може перегріватися не потрібні. На рисунку 2.4 зображено схему насоса в зборі з габаритними та настановними розмірами.

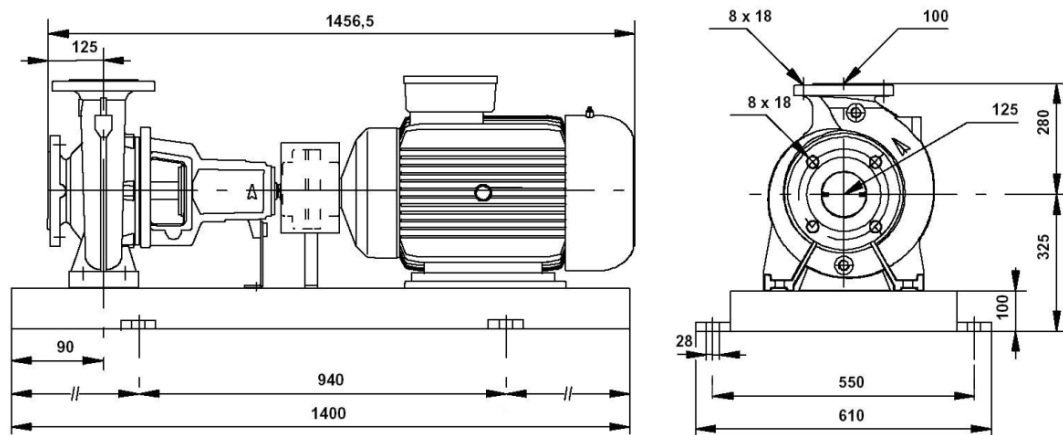


Рисунок 2.4. Насос з двигуном з настановними та габаритними розмірами

2.4 Вибір датчика тиску

Для контролю величини тиску на виході насоса потрібний датчик тиску. Вибір датчика здійснюється відповідно до робочих характеристик та можливості сполучення з іншим обладнанням. Вибираємо датчик MBS 1700 (060G61076) виробництва Danfoss [3].

Даний тип датчика використовується для постійного перетворення надлишкового тиску в струмовий сигнал 4 - 20 мА. Виготовлений на основі чутливих тензорезистивних елементів. Складається з блоку чутливого елемента і електронного перетворювача. Блок складається з штуцера, виконаного з корозійностійкого сплаву, корозійностійкого роздільника та

тензочутливого елемента. Електронний перетворювач розташований на друкованій платі і поміщений у корпус з гумовим кільцем, що герметизує. На торці корпусу розташовані клемна колодка та регулювальні отвори для корекції мінімального та максимального значень струмового виходу. На рисунку 2.5 зображено перетворювач тиску MBS-1700 [2].



Рисунок 2.5. Перетворювач тиску MBS-1700 фірми Danfoss

Основні технічні характеристики:

- Межі вимірювання в кгс/смг: від 0 до 6.
- Штуцер з різьбленням G 1/2
- Висока вібростійкість
- Робоча температура довкілля: від -40 до +70 °C
- Середній термін служби 10 років
- Корпус та основні частини з нержавіючої сталі (AISI 316L)
- Напруга живлення 9-32 В
- Граничний струм 28 мА
- Час реакції 4 мс
- Клас точності 0,5
- Клас захисту IP65
- Маса приладу не більше 0,45 кг

2.5 Перевірка двигуна за потужністю

Потужність двигуна вибраного насоса за програмою повинна становити не менше 42,4 кВт (див. рисунок 2.2). Проводимо перевірку цієї величини:

$$P_{\text{дв}} = \frac{g \cdot Q \cdot H}{\eta_H \cdot 3600} = \frac{9.81 \cdot 275 \cdot 45}{0.795 \cdot 3600} = 42.418 \text{ кВт} \quad (0.1)$$

де $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – прискорення вільного падіння.

Згідно з ISO 5199 повинен забезпечуватися запас потужності двигуна. Тому потужність двигуна вибираємо не менше 45 кВт. За даною величиною та рекомендаціями виробника насоса, концерну Grundfos [2], вибираємо асинхронний двигун з короткозамкненим ротором серії MMG.

Таблиця 2.1. Паспортні дані двигуна MMG225M

Задані величини	Умовне позначення	Одиниця вимірювання	Чисельне значення
Фазна напруга обмотки статора	$U_{1\phi}$	В	220
Потужність двигуна	$P_{\text{дв}}$	кВт	45
Номінальна швидкість ротора	n_H	об/хв	2950
ККД двигуна	η_H	в.о.	0,92
Синхронна частота обертання ротора	n_0	об/хв	3000
Коефіцієнт потужності двигуна	$\cos \varphi_H$	в.о.	0,88
Кратність пускового струму	k_i	в.о.	7,9
Кратність пускового моменту	k_{II}	в.о.	2,4
Кратність максимального моменту	k_{max}	в.о.	3

2.6 Розрахунок основних параметрів та характеристик асинхронного електродвигуна

Зробимо розрахунок основних параметрів асинхронної машини для побудови механічної та електромеханічної характеристик асинхронного електродвигуна [4].

Величина синхронної кутової швидкості:

$$\omega_0 = \frac{\pi \cdot n_0}{30} = \frac{3.14 \cdot 3000}{30} = 314.159 \text{ рад/с} \quad (0.2)$$

Номінальне ковзання:

$$s_H = \frac{n_0 - n_H}{n_0} = \frac{3000 - 2950}{3000} = 0.0167 \quad (0.3)$$

Номінальний струм обмотки статора двигуна:

$$I_{1H} = \frac{P_H}{3 \cdot U_{1\phi} \cdot \cos \varphi_H \cdot \eta_H} = \frac{45 \cdot 10^3}{3 \cdot 220 \cdot 0.88 \cdot 0.92} = 84.22 \text{ А} \quad (0.4)$$

Конструкція сучасних асинхронних двигунів оптимізована таким чином, що їхній максимальний коефіцієнт корисної дії (ККД) досягається не при повному (номінальному) навантаженні, а при дещо нижчому – приблизно на 10-15%. Це означає, що двигун працюватиме найефективніше, коли його навантаження буде на 10-15% меншим за номінальне.

Коефіцієнт потужності ($\cos \varphi$) при навантаженні, що становить 75% від номінальної потужності ($0,75 \cdot P_H$), суттєво відрізняється від коефіцієнта потужності при номінальному навантаженні. Величина цієї різниці значною мірою залежить від потужності самого двигуна. Для типових серій асинхронних двигунів ця залежність з достатньою для практичних розрахунків точністю описується графіком, що наведено на рисунку 2.6.

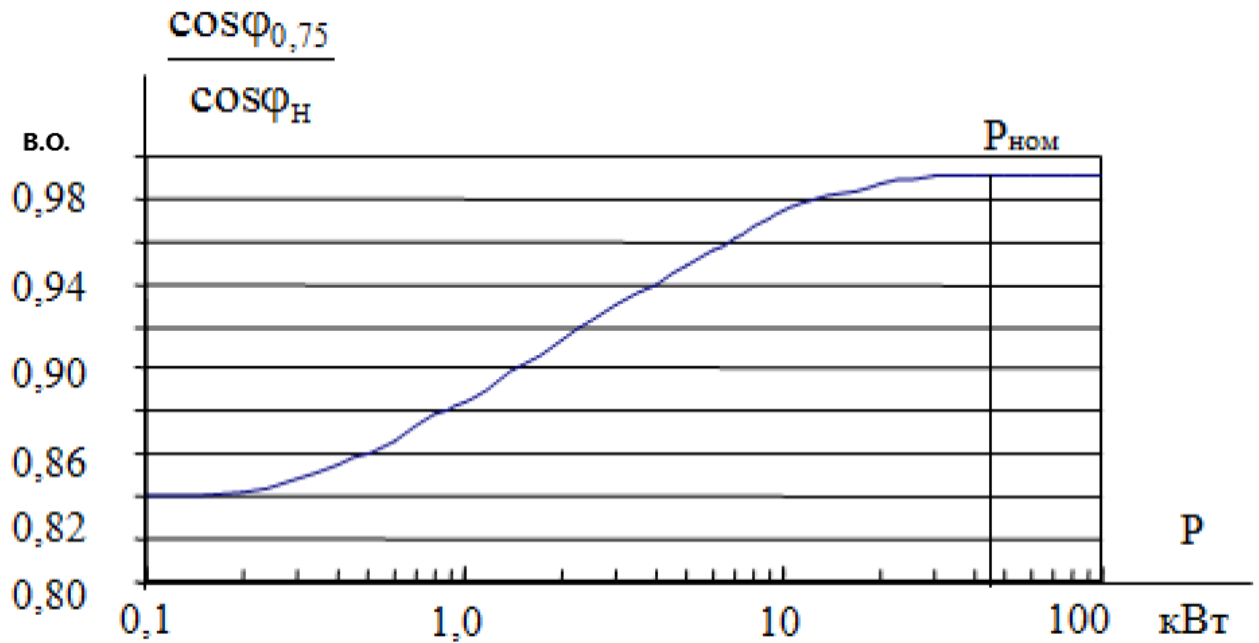


Рисунок 2.6- Залежність $\cos \varphi_{0.75} / \cos \varphi_H$ від потужності асинхронного двигуна:

У випадку часткового завантаження коефіцієнт потужності становитиме:

$$\cos \varphi_{p^*} = 0.99 \cos \varphi_H = 0.99 \cdot 0.88 = 0.871 \quad (0.5)$$

Оскільки сучасні асинхронні двигуни проектується для досягнення максимального ККД при навантаженні, дещо меншому за номінальне (приблизно на 10-15%) то коефіцієнт завантаження двигуна приймаємо $p^* = 0.75$.

При вибраному завантаженні струм статора дорівнює:

$$I_{11} = \frac{p^* \cdot P_H}{3 \cdot U_{1\phi} \cdot \cos \varphi_{p^*} \cdot \eta_H} = \frac{0.75 \cdot 45 \cdot 10^3}{3 \cdot 220 \cdot 0.871 \cdot 0.92} = 63.801 \quad (0.6)$$

Розрахуємо величину струму холостого ходу

$$I_0 = \sqrt{\frac{I_{11}^2 - [p^* \cdot I_{1H} (1 - s_H) / (1 - p^* \cdot s_H)]^2}{1 - p^* \cdot (1 - s_H) / (1 - p^* \cdot s_H)^2}} = \quad (0.7)$$

$$= \sqrt{\frac{63.801^2 - [0.75 \cdot 84.22 (1 - 0.0167) / (1 - 0.75 \cdot 0.0167)]^2}{1 - 0.75 \cdot (1 - 0.0167) / (1 - 0.75 \cdot 0.0167)^2}} = 16.098$$

Критичне ковзання розрахуємо скориставшись формулою Клосса:

$$s_{kr} = s_H \frac{k_{max} + \sqrt{k_{max}^2 + [1 - 2 \cdot s_H \cdot \beta \cdot (k_{max} - 1)]}}{1 - 2 \cdot s_H \cdot \beta \cdot (k_{max} - 1)} =$$

$$0.07 \frac{3 + \sqrt{3^2 + [1 - 2 \cdot 0.8 \cdot 0.0167 \cdot (3 - 1)]}}{1 - 2 \cdot 0.8 \cdot 0.0167 \cdot (3 - 1)} = 0.1028 \quad (0.8)$$

Для нашого випадку коефіцієнт β виберемо рівним 0,8.

Для розрахунку активних та індуктивних опорів обмоток статора та ротора асинхронного двигуна проведемо розрахунок необхідних коефіцієнтів:

$$C_1 = 1 + \frac{I_0}{2 \cdot k_i \cdot I_{1H}} = 1 + \frac{16.098}{2 \cdot 7.9 \cdot 84.22} = 1.012 \quad (0.9)$$

$$A_1 = \frac{m \cdot U_{1\phi}^2 \cdot (1 - s_H)}{2 \cdot C_1 \cdot k_{max} \cdot P_H} = \frac{3 \cdot 220^2 \cdot (1 - 0.0167)}{2 \cdot 1.012 \cdot 3 \cdot 45 \cdot 10^3} = 0.522 \quad (0.10)$$

Активний опір ротора, приведений до обмотки статора:

$$R'_2 = \frac{A_1}{C_1(\beta + 1/s_{kr})} = \frac{0.522}{1.012(0.8 + 1/0.1028)} = 0.04903 \text{ Ом} \quad (0.11)$$

Активний опір обмотки статора:

$$R_1 = C_1 \cdot R'_2 \cdot \beta = 1.012 \cdot 0.04903 \cdot 0.8 = 0.0397 \text{ Ом} \quad (0.12)$$

Знаючи параметр γ розрахуємо опір короткого замикання:

$$\gamma = \sqrt{(1/s_{kr}^2) - \beta^2} = \sqrt{(1/0.1028^2) - 0.8^2} = 9.697 \quad (0.13)$$

$$X_k = \gamma \cdot C_1 \cdot R_2 = 9.697 \cdot 1.012 \cdot 0.04903 = 0.48116 \text{ Ом} \quad (0.14)$$

Проведемо розрахунок величини індуктивного опору обмотки ротора, наведеного до обмотки статора:

$$X'_2 = 0.58 \cdot X_k / C_1 = 0.58 \cdot 0.48116 / 1.012 = 0.2757 \text{ Ом} \quad (0.15)$$

Визначимо величину індуктивного опору обмотки статора:

$$X_1 = 0.42 \cdot X_k = 0.42 \cdot 0.48116 = 0.2021 \text{ Ом} \quad (0.16)$$

Знаючи величину ЕРС проведемо розрахунок індуктивного опору ланки намагнічування:

$$E_1 = \sqrt{(U_{1H} \cdot \cos \varphi_{1H} - R_1 \cdot I_{1H})^2 + (U_{1H} \cdot \sin \varphi_{1H} - X_1 \cdot I_{1H})^2} =$$

$$\sqrt{(220 \cdot 0.88 - 0.0397 \cdot 84.22)^2 + (220 \cdot \sqrt{1 - 0.88^2} - 0.2021 \cdot 84.22)^2} = \quad (0.17)$$

$$= 225.75$$

Величина індуктивного опору намагнічування:

$$X_\mu = \frac{E_1}{I_0} = \frac{225.75}{16.098} = 14.024 \text{ Ом} \quad (0.18)$$

Визначимо критичний момент машини у руховому режимі:

$$M_{kr} = \frac{m \cdot U_{1\phi}^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot C_1 \cdot [R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2)^2}]} =$$

$$\frac{3 \cdot 220^2}{2 \cdot 314.159 \cdot 1.012 \cdot [0.0397 + \sqrt{0.0397^2 + 0.48116^2}]} = 439.8 \quad (0.19)$$

Задаємо діапазон зміни ковзання $S \in [-1, 1]$ з кроком 0,001, тоді механічна характеристика асинхронного електродвигуна за формулою Клосса:

$$M = \frac{2 \cdot M_{kr} \cdot (1 + a \cdot s_{kr})}{\frac{s_{kr}}{s} + \frac{s}{s_{kr}} + 2 \cdot a \cdot s_{kr}} \quad (0.20)$$

$$\text{де коефіцієнт } a \text{ дорівнює: } a = \frac{R_1}{R_2} = \frac{0.0397}{0.04903} = 0.81$$

тоді розрахунковий вираз для механічної характеристики набуде наступного вигляду:

$$M(s) = \frac{953.306}{\frac{0.1028}{s} + \frac{s}{0.1028} + 0.168} \text{ Н} \times \text{м} \quad (0.21)$$

Механічна характеристика асинхронного електродвигуна зображено рисунку 2.7, характеристика 1. Вона справедлива лише області номінальних швидкостей.

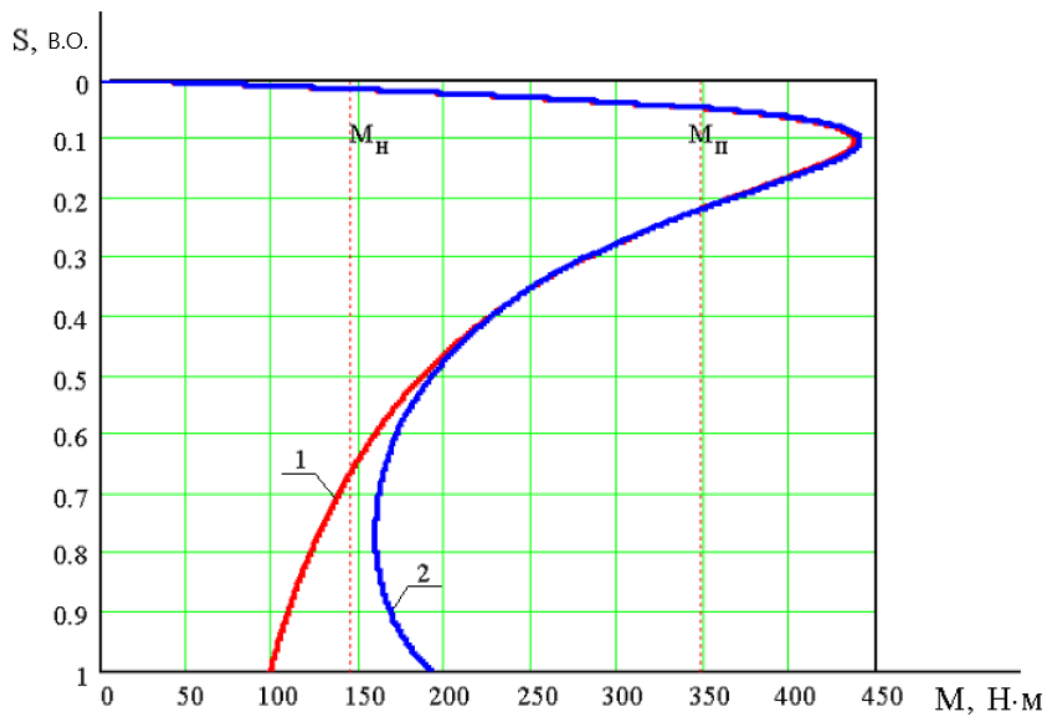


Рисунок 2.7 – Графік механічної характеристики асинхронного електродвигуна

Для врахування зміни параметрів асинхронної машини в момент пуску, вводимо поправочні коефіцієнти, які необхідно помножити на величини активних і реактивних опорів обмотки ротора:

$$R'_2(s) = R'_2 \cdot f_1(s) = 0.04903 \cdot f_1(s) \quad (0.22)$$

$$X'_2(s) = X'_2 \cdot f_2(s) = 0.2757 \cdot f_2(s) \quad (0.23)$$

Коефіцієнти $f_1(s)$, $f_2(s)$ є функціями ковзання. Емпіричні вирази для коефіцієнтів відповідні даної моделі асинхронного двигуна наступні:

$$f_1(s) = \frac{0.78 - 0.1 \cdot s^2 + 3 \cdot s^2 \cdot \sqrt{s}}{0.78 - 0.09 \cdot s^2 + s^2 \sqrt{s}} \quad (0.24)$$

$$f_2(s) = 1 - \frac{0.04 - 0.65 \cdot s^2 + 1.05 \cdot s^2 \cdot \sqrt{s}}{0.4 - 0.065 \cdot s^2 \cdot \sqrt{s}} \quad (0.25)$$

При цьому необхідно дотримуватися умови, при якій величина активного опору обмотки ротора при $S = 1$ має максимальне значення, а відповідне реактивне опір - мінімальне, що обумовлюється фізичними

явищами збільшення активного опору за рахунок ефекту витіснення струму на поверхню обмотки ротора зубцевої зони ротора відповідно.

Вирази, які послідовно підставляються $R'_2(s)$, $X'_2(s)$) також є функціями ковзання. Механічна характеристика з урахуванням зміни опорів обмотки ротора наведена на рисунку 2.7, характеристика 2.

За побудованими механічними характеристиками проводимо аналіз розрахованих даних, після чого порівнюємо їх з паспортними.

1) Момент номінальний:

$$M_{H(\text{паспорт})} = P_H / \omega_{\text{ном}} = 45 \cdot 10^3 / 308.9 = 145.68 \quad (0.26)$$

те саме значення, але за формулою Клосса:

$$\begin{aligned} M(s) &= \frac{953.306}{\frac{0.1028}{s_H} + \frac{s_H}{0.1028} + 0.168} = \\ &= \frac{953.306}{\frac{0.1028}{0.01667} + \frac{0.01667}{0.1028} + 0.168} = 145.807 \end{aligned}$$

2) Момент критичний:

$$M_{kr} = k_{kr} \cdot M_{H(\text{паспорт})} = 3 \cdot 145.68 = 437.04 \quad (0.27)$$

3) Пусковий момент

$$M_{\text{пуск}} = k_{\Pi} \cdot M_{\Pi(\text{паспорт})} = 2.4 \cdot 145.68 = 349.63 \quad (0.28)$$

те саме значення, але для характеристики 1:

$$M_{\text{пуск}} \Big|_{s=1} = 95.97 \text{ Нм}$$

для характеристики 1:

$$M_{\text{пуск}} \Big|_{s=1} = 180.2 \text{ Нм}$$

Для побудови електромеханічних характеристик скористаємося наступним виразом для наведеного струму обмотки ротора:

$$I'_2(s) = \frac{U_{1\phi}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + (X_1 + X'_2)^2}} =$$

$$= \frac{220}{\sqrt{\left(0.0397 + \frac{0.04903}{s}\right)^2 + (0.45116)^2}} \quad (0.29)$$

Граничне асимптотичне значення струму ротора за виразом:

$$I'_{2cp} = \frac{U_{1\phi}}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X'_2)^2}} = \frac{220}{\sqrt{0.0397^2 + (0.45116)^2}} = 458.84 \text{ А} \quad (0.30)$$

Критичне значення струму ротора:

$$I'_{kr} = U_{1\phi} / (X_1 + X'_2) = 220 / 0.48116 = 460.45 \text{ А} \quad (0.31)$$

Це значення відповідає наступній величині ковзання:

$$s_{kr} = -R'_2 / R_1 = -0.04903 / 0.0397 = -1.2351 \quad (0.32)$$

Для побудови електромеханічної характеристики струму обмотки статора скористаємося наступним виразом:

$$I_1(s) = \sqrt{I_0^2 + (1 + 2 \cdot \alpha \cdot \sqrt{1 - a^2 \cdot s_{kr}^2}) \cdot (I'_2(s))} =$$

$$\sqrt{16.098^2 + 0.07(I'_2(s))^2} \quad (0.33)$$

де коефіцієнт $\alpha = I_0 / I'_{2np} = 16,098/458,84 = 0,0351$.

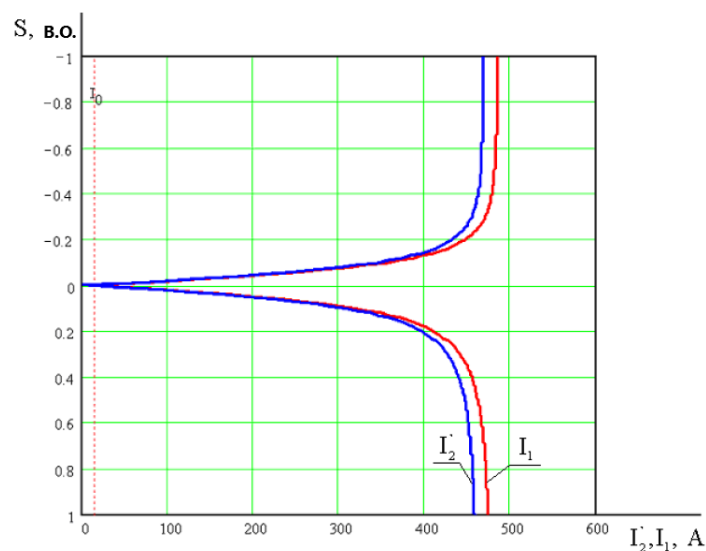


Рисунок 2.8. Електромеханічні характеристики асинхронного електродвигуна

Задаючись діапазоном зміни ковзання $S \in [-2, 1]$ з кроком 0,001, побудуємо повну електромеханічну характеристику асинхронного двигуна, яка охоплює всі режими його роботи. Електромеханічні характеристики двигуна наведені на рисунку 2.8.

2.7 Рівняння асинхронної машини у системі відносних одиниць

Введемо відносну систему одиниць, прийнявши як базові:

Амплітуда миттєвого значення номінальної фазної напруги [5]:

$$U_B = \sqrt{2} \cdot U_{1\phi} = \sqrt{2} \cdot 220 = 311.13 \text{ В}$$

Амплітуда миттєвого значення номінального фазного струму:

$$I = \sqrt{2} \cdot I_{1\phi} = \sqrt{2} \cdot 84.22 = 119.1 \text{ А}$$

Опір

$$R_B = \frac{U_B}{I_B} = \frac{311.13}{119.1} = 2.6123 \text{ Ом}$$

Значення номінальної кутової частоти напруги живлення електродвигуна в його номінальному режимі:

$$\omega_B = 2 \cdot \pi \cdot f_c = 2 \cdot 3.145 \cdot 50 = 314.159 \text{ рад/с}$$

Потокозчеплення:

$$\Psi_B = \frac{U_B}{\omega_B} = \frac{311.13}{314.159} = 0.99 \text{ В} \cdot \text{с/рад}$$

Електромагнітний момент:

$$M_B = \frac{3}{2} p \frac{U_B \cdot I_B}{\omega_B} = \frac{3}{2} \frac{311.11 \cdot 119.1}{314} = 179.93 \text{ В} \cdot \text{с/рад}$$

Час

$$t_B = \frac{1}{\omega_B} = 0.00318 \text{ с.}$$

Оскільки надалі використовуватимуться переважно рівняння у відносній системі одиниць (у безрозмірному вигляді), то в них позначення струмів, напруг, потокозчеплень, опорів залишимо попередніми. Щоб

записати векторне рівняння (2.17) у безрозмірному вигляді, розділимо його на U_B .

З урахуванням (2.12), (2.13) у відносних одиницях отримуємо[6]:

$$\begin{cases} \vec{U}_1 = \vec{I}_1 \cdot r_1 + \frac{d\vec{\Psi}_1}{dt} + jv_{KC} \cdot \vec{\Psi}_1; & \vec{\Psi}_1 = x_1 \cdot \vec{I}_1 + x_m \cdot \vec{I}_2 \\ \vec{U}_2 = \vec{I}_2 \cdot r_2 + \frac{d\vec{\Psi}_2}{dt} + j(v_{KC} - v) \cdot \vec{\Psi}_2; & \vec{\Psi}_2 = x_m \cdot \vec{I}_1 + x_2 \cdot \vec{I}_2 \end{cases} \quad (0.34)$$

де, $v_{KC} = \frac{\omega_{KC}}{\omega_B}$, $v = \frac{\omega_r}{\omega_B}$ - відносні значення швидкості обертання системи

координат та електрична швидкість вала двигуна. У цьому рівнянні опору r_1 і r_2 подано також у відносних одиницях. За відсутності живлення з боку ротора в (2.25) слід прийняти $\vec{U}_2 = 0$.

Аналогічно до двигуна рівняння (3.19) у відносних одиницях запишеться у вигляді:

$$\begin{cases} \vec{U}_1 = r_1 \cdot \vec{I}_1 + \frac{d}{dt}(x_1 \cdot \vec{I}_1 + x_m \vec{I}_2) + jv_{KC}(x_1 \cdot \vec{I}_1 + x_m \vec{I}_2); \\ \vec{U}_2 = r_2 \cdot \vec{I}_2 + \frac{d}{dt}(x_m \cdot \vec{I}_2 + x_2 \vec{I}_2) + j(v_{KC} - v)(x_m \cdot \vec{I}_1 + x_2 \vec{I}_2); \end{cases} \quad (0.35)$$

де, $x_1 = \frac{\omega_B \cdot L_1}{R_B}$, $x_2 = \frac{\omega_B \cdot L_2}{R_B}$, $x_m = \frac{\omega_B \cdot L_m}{R_B}$ - індуктивні опори обмоток двигуна у

відносних одиницях.

Рівняння для обертового моменту двигуна у відносних одиницях отримаємо після ділення (2.22), (2.23) на M_B :

$$\begin{cases} \vec{\mu} = \vec{\Psi}_1 \times \vec{I}_1; & \mu = \text{Im}[\vec{I}_1 \cdot \vec{\Psi}_1^*] = (\psi_{1x} \cdot i_{1y} - \psi_{1y} \cdot i_{1x}) \\ \vec{\mu} = x_m [\vec{I}_2 \times \vec{I}_1]; & \mu = x_m \cdot \text{Im}[\vec{I}_2 \cdot \vec{I}_1^*] = x_m (i_{2x} \cdot i_{1y} - i_{1x} \cdot i_{2y}) \end{cases} \quad (0.36)$$

Використовуючи рівняння зв'язку між векторами потокозчеплення і струмів (2.25), момент можна виразити через будь-яку пару векторів $\vec{I}_1$, $\vec{I}_2$, $\vec{\Psi}_1$, $\vec{\Psi}_2$ і отримати додатково співвідношення:

$$\mu = \frac{x_m}{x_2} \operatorname{Im}[\vec{I}_1 \times \vec{\Psi}_2];$$

$$\mu = \frac{x_m}{x_1 \cdot x_2 \cdot \sigma} \operatorname{Im}[\vec{\Psi}_1 \times \vec{\Psi}_2]$$
(0.37)

де, $\sigma = 1 - \frac{x_m^2}{x_1 \cdot x_2}$ - коефіцієнт розсіювання.

Рівняння руху двигуна у відносних одиницях отримаємо, розділивши (2.24) на M_B

$$\mu - \mu_c = H \frac{dv}{dt}$$
(0.38)

де, $H = \frac{J_\Sigma \cdot \omega_B^2}{M_B \cdot p}$ - еквівалент моменту інерції у відносних одиницях.

Рівняння асинхронної машини з короткозамкненим ротором (АКЗ) отримують з (2.25), якщо обмотки ротора замкнуті накоротко. Відповідно будемо вважати $\vec{U}_2 = 0$.

Для побудови асинхронного двигуна необхідно привести розраховані основні параметри машини до системи відносних одиниць. Тоді значення швидкості обертання системи координат [8]:

$$v_{KC} = \frac{\omega_{KC}}{\omega_B} = 1;$$

Проведемо розрахунок швидкості обертання ротора:

$$v = \frac{\omega_r}{\omega_B} = \frac{2950}{3000} = 0.9833;$$

Визначимо величину активного опору статора обмотки:

$$r_1 = \frac{R_1}{R_B} = \frac{0.09599}{2.6123} = 0.0368;$$

Тоді, значення активного опору обмотки ротора становитиме:

$$r_2 = \frac{R_2}{R_B} = \frac{0.04742}{2.6123} = 0.01815;$$

Індуктивний опір обмотки статора:

$$x_1 = \frac{X_1 + X_\mu}{R_B} = \frac{0.1745 + 13.698}{2.6123} = 5.1305;$$

Індуктивний опір обмотки ротора:

$$x_2 = \frac{X_2 + X_\mu}{R_B} = \frac{0.2381 + 13.698}{2.6123} = 5.3348;$$

Індуктивний опір ланки намагнічування:

$$x_m = \frac{X_m}{R_B} = \frac{13.698}{2.6123} = 5.2432;$$

Момент інерції:

$$H = \frac{J_\Sigma \cdot \omega_B^2}{M_B \cdot p} = \frac{0.15 \cdot 314.159^2}{176.93 \cdot 1} = 83.674;$$

Для побудови структурної моделі асинхронного електродвигуна, перепишемо систему рівнянь (2.35) у вигляді:

$$\begin{cases} \vec{U}_1 = \left(r_1 + r_2 \left(\frac{x_m}{x_c} \right)^2 + jv_{KC} \left(x_1 - \frac{x_m^2}{x_2} \right) \right) \vec{I}_1 + \left(x_1 - \frac{x_m^2}{x_2} \right) \frac{d\vec{I}_1}{dt} - \vec{\Psi}_2 \left(\frac{x_m \cdot r_2}{x_2^2} + jv_r \frac{x_m}{x_2} \right) \\ 0 = \frac{x_m \cdot r_2}{x_2} \vec{I}_1 + \frac{r_2}{x_2} \vec{\Psi}_2 + \frac{d\vec{\Psi}_2}{dt} + j(v_{KC} - v_r) \vec{\Psi}_2 \end{cases} \quad (0.39)$$

Визначимо наступні безрозмірні коефіцієнти:

$$k = \frac{x_m}{x_2} = \frac{5.2437}{5.3348} = 0.979;$$

$$T_2 = \frac{x_2}{r_2} = \frac{5.3348}{0.01815} = 270.947;$$

$$x'_1 = \left[x_1 - \frac{x_m^2}{x_2} \right] = \left[5.1305 - \frac{5.2437^2}{5.3348} \right] = 0.181;$$

$$r = (r_1 + k_2^2 \cdot r_2) = (0.0368 + 0.979^2 \cdot 0.01815) = 0.03319;$$

$$T_1 = \frac{x'_1}{r} = \frac{0.181}{0.03319} = 5.445.$$

Запишемо цю систему рівнянь в операторній формі в рухомій системі координат, що обертається зі швидкістю v_{KC} . Для цього розкладемо векторні величини на проекції по дійсній та уявній осях x та jy відповідно і

переведемо систем в операторну площину, зробимо заміну $p = \frac{d}{dt}$, де p - оператор Лапласа:

$$\begin{cases} U_{1x} = r \left(1 + \frac{x'_1}{r} p \right) I_{1x} - x'_1 v_{KC} I_{1y} - \frac{k_2}{T_2} \Psi_{2x} - k_2 v_r \Psi_{2y}; \\ U_{1y} = r \left(1 + \frac{x'_1}{r} p \right) I_{1y} - x'_1 v_{KC} I_{1x} - \frac{k_2}{T_2} \Psi_{2y} - k_2 v_r \Psi_{2x}; \\ 0 = -k_2 r_2 I_{1x} + \frac{1}{T_2} \Psi_{2x} + p \Psi_{2x} - (v_{KC} - v_r) \Psi_{2y}; \\ 0 = -k_2 r_2 I_{1y} + \frac{1}{T_2} \Psi_{2y} + p \Psi_{2y} - (v_{KC} - v_r) \Psi_{2x}. \end{cases} \quad (0.40)$$

Запишемо рівняння руху електроприводу (3.29) і вираз для моменту (3.28) в рухомій системі координат, в операторній формі:

$$H \cdot p \cdot v_r = \mu - \mu_c \quad (0.41)$$

$$\mu = k_2 (\Psi_{2x} \cdot I_{1y} - \Psi_{2y} \cdot I_{1x}) \quad (0.42)$$

Остаточна система рівнянь для побудови математичної моделі асинхронного електроприводу в рухомій системі координат;

$$\begin{cases} r(1 + T_1 p) I_{1x} = U_{1x} + x'_1 v_{KC} I_{1y} + \frac{k_2}{T_2} \Psi_{2x} + k_2 v_r \Psi_{2y}; \\ r(1 + T_1 p) I_{1y} = U_{1y} - x'_1 v_{KC} I_{1x} + \frac{k_2}{T_2} \Psi_{2y} - k_2 v_r \Psi_{2x}; \\ \frac{(1 + T_2 p)}{T_2} \Psi_{2x} = k_2 r_2 I_{1x} + (v_{KC} - v_r) \Psi_{2y}; \\ \frac{(1 + T_2 p)}{T_2} \Psi_{2y} = k_2 r_2 I_{1y} - (v_{KC} - v_r) \Psi_{2x}; \\ H \cdot p \cdot v_r = \mu - \mu_c; \\ \mu = k_2 (\Psi_{2x} \cdot I_{1y} - \Psi_{2y} \cdot I_{1x}). \end{cases} \quad (0.43)$$

$$\text{де, } T_1 = \frac{x'_1}{r}.$$

На рисунку 2.9 наведено структурну схему лінеаризованої моделі асинхронного електродвигуна, складену за системою рівнянь (3.43)

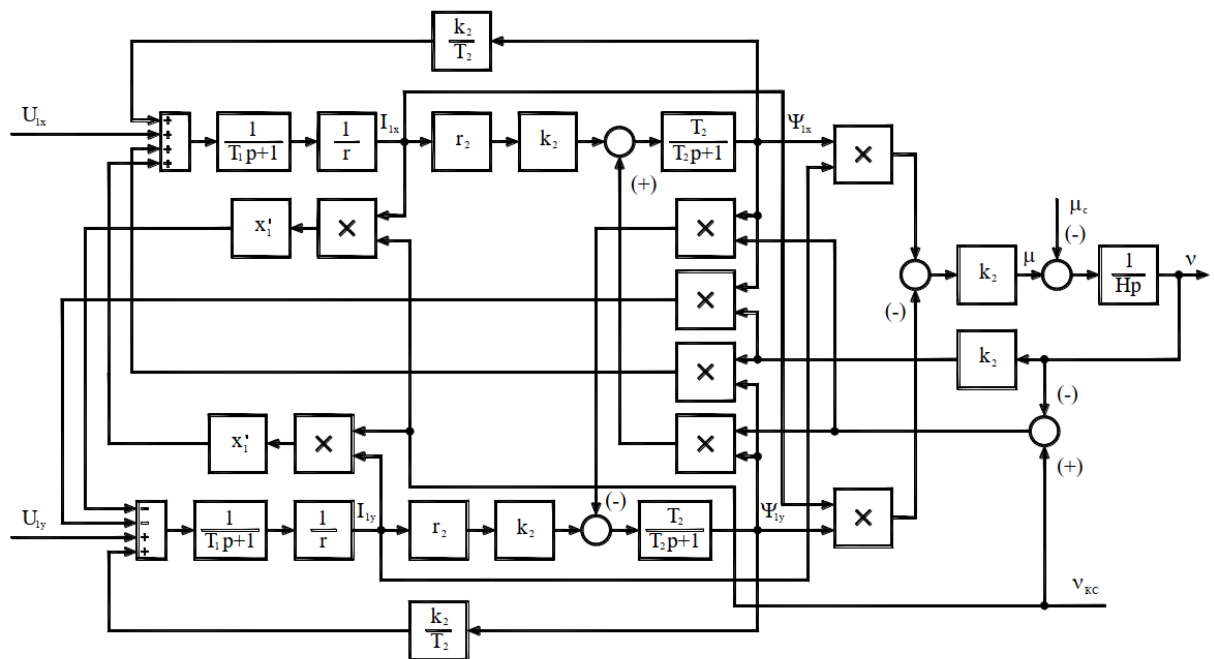


Рисунок 2.9. Структурна схема моделі асинхронного електродвигуна в рухомій системі координат.

2.8 Висновки до розділу

1. На основі технологічної схеми системи теплопостачання визначено, що продуктивність насоса повинна становити 275 м³/год. Для забезпечення даної продуктивності вибрано насос марки насос НК 100 - 200/198. В якості електродвигуна вибрано асинхронний двигун з короткозамкнутим ротором MMG225M.

2. Проведено розрахунок механічних та електромеханічних характеристик електродвигуна. Отримано систему рівнянь для побудови математичної моделі асинхронного електроприводу в рухомій системі координат, та побудовано Структурну схему моделі асинхронного електродвигуна в рухомій системі координат.

3 РОЗРАХУНКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ

3.1 Імітаційна модель асинхронного електродвигуна у програмному середовищі MATLAB

Моделювання асинхронного електродвигуна та електроприводу здійснюється за допомогою системи візуального моделювання SIMULINK, яка є складовою програмний пакет MATLAB. [7].

Основна перевага пакету MATLAB є те, що для роботи користувачеві достатньо дізнатися про нього рівно стільки, скільки вимагає поставлене - завдання. Якщо ж поставлене завдання вимагає створення будь-яких спеціальних інструментів, MATLAB надає в розпорядження користувача практичну універсальну мову об'єктно-орієнтованого програмування у поєднанні з різними засобами налагодження створюваних програм. Структура даного пакету дозволяє поєднувати основні підходи до створення моделі: аналітичний та імітаційний. Основне місце серед наборів інструментів займає система візуального моделювання SIMULINK .

Як елементи для побудови моделей за допомогою SIMULINK використовуються модулі, що знаходяться у відповідній бібліотеці. Бібліотека блоків SIMULINK представляє набір візуальних об'єктів, використовуючи які можна збирати, як із кубиків, довільну конструкцію. Практично для всіх блоків існує можливість індивідуальних налаштувань: можна змінити як внутрішні параметри блоків, так і зовнішнє оформлення. На порядок з'єднання блоків не накладається жодних обмежень, але необхідно дотримуватися ряду правил, обумовлених в основному логікою роботи самої моделі, а не спеціальними вимогами SIMULINK.

MATLAB також надає широкий вибір вбудованих функцій для виконання складних математичних розрахунків, обробки сигналів, аналізу даних та побудови графіків. Гнучка інтеграція з іншими мовами програмування, такими як Python, C++, та Java, робить MATLAB зручним інструментом для розробників у різних галузях науки та інженерії.

Особливу увагу слід приділити інструментам для обробки великих обсягів даних, зокрема засобам для роботи з масивами, матрицями та системами рівнянь. Завдяки цьому MATLAB широко використовується для інженерних розрахунків, аналізу великих даних, фінансового моделювання та наукових досліджень.

Крім того, MATLAB пропонує спеціалізовані пакети розширень, які дозволяють вирішувати специфічні завдання у таких сферах, як біоінженерія, автомобільна промисловість, робототехніка та управління процесами. Унікальність підходу MATLAB полягає у поєднанні простоти використання для початківців із потужними інструментами для професійного застосування

Реалізація структурної схеми електродвигуна (рисунок 2.11) в середовищі SIMULINK показано на рисунку 3.1.

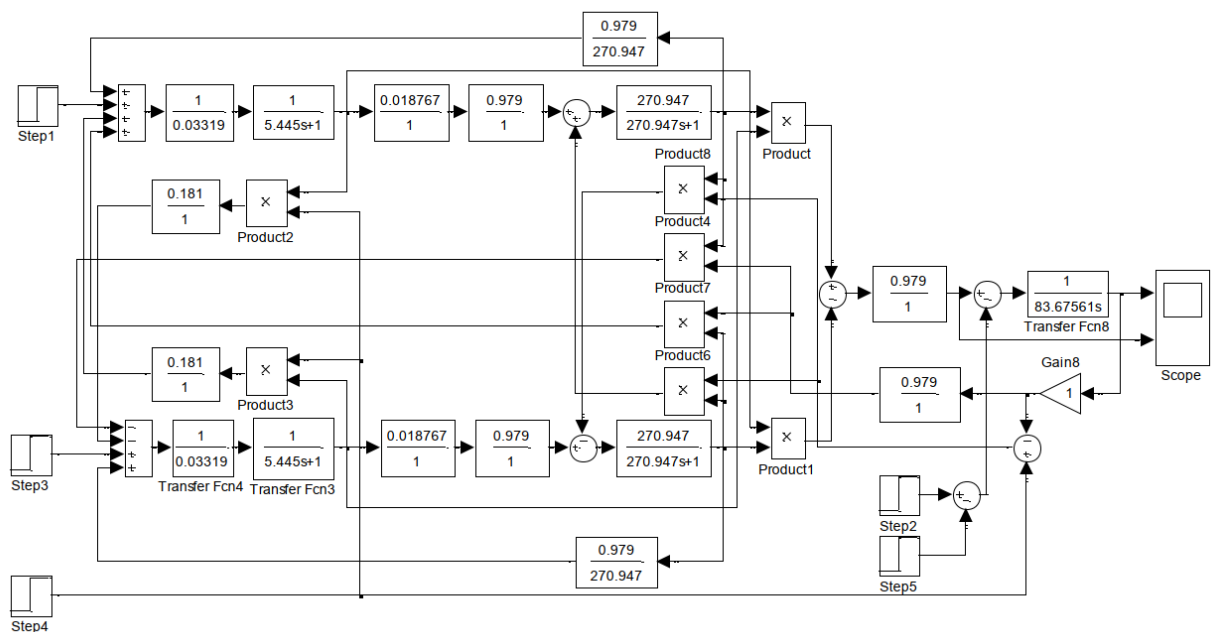


Рисунок 3.1. Імітаційна модель асинхронного електродвигуна у програмному середовищі MATLAB/SIMULINK.

3.2 Моделювання динамічних характеристик асинхронного електродвигуна при прямому пуску

У даній моделі в першому наближенні в якості навантаження використовується момент вентилятора, якому відповідає квадратична залежність моменту навантаження від швидкості обертання валу двигуна:

$$M_c = \frac{M_H}{\omega_H^2} \omega^2$$

В системі відносних одиниць,

$$\mu_c = \frac{M_H \cdot \omega_B^2}{\omega_H^2 \cdot M_B} v^2 = \frac{145.68 \cdot 314.159^2}{308.92^2 \cdot 176.93} v^2 = 0.8515 \cdot v^2, \text{ в.о.}$$

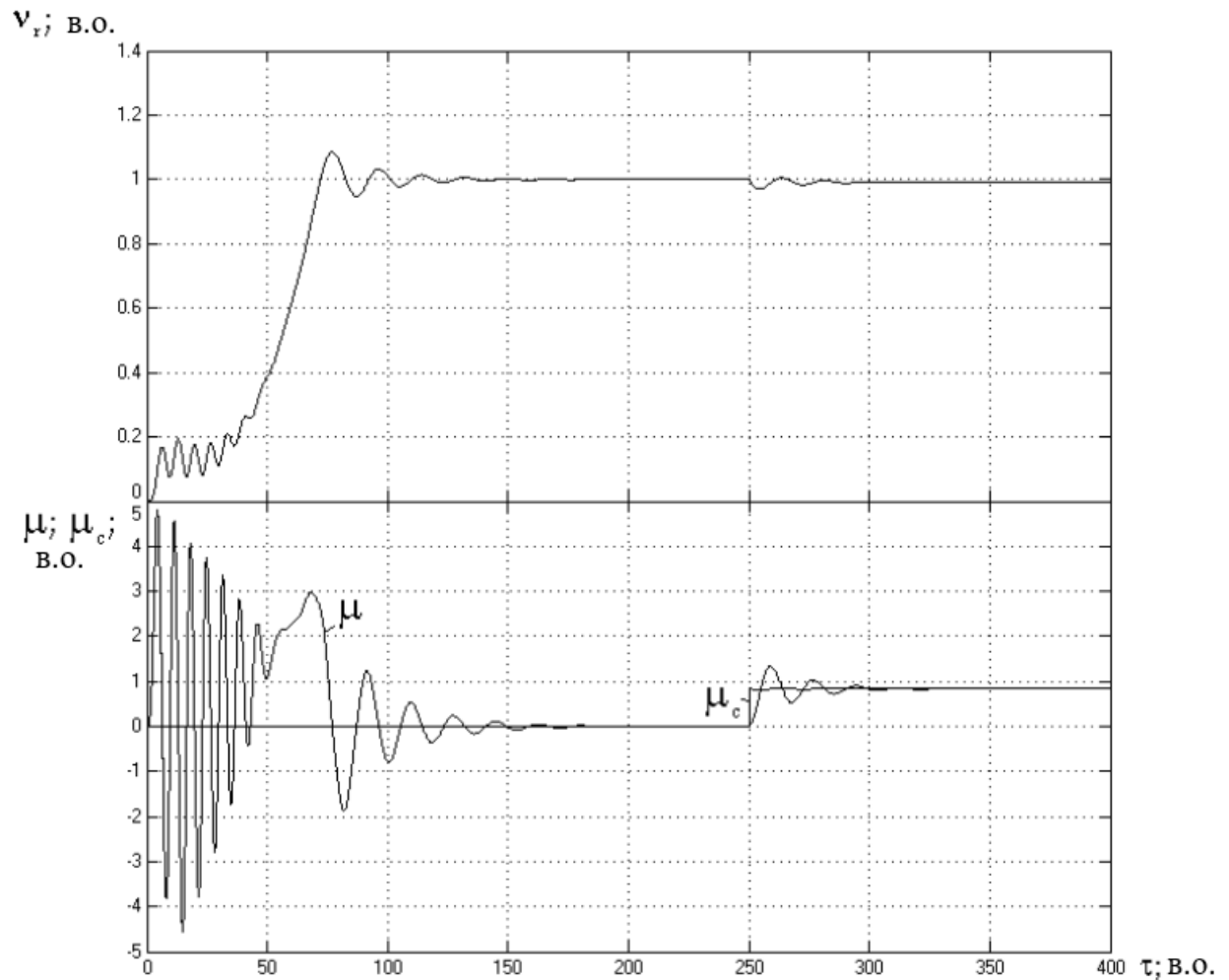


Рисунок 3.2. Часові характеристики $v_r = f(t), \mu = f(t)$ під час пуску АД на холостому ході з подальшим навантаженням

Основні показники для характеристики швидкості $v_r = f(t)$:

Перерегулювання: $\sigma = 8\%$,

Коливальність: $n = 1$,

Час регулювання: $t_p = 87 \cdot t_B = 87 / 314.159 = 0.277$ с,

Усталене значення;

без навантаження: $\omega_{уст} = 1 \cdot \omega_B = 1 \cdot 314.159 = 314.159$ рад/с,

з навантаженням: $\omega_{уст1} = 0.983 \cdot \omega_B = 0.983 \cdot 314.159 = 308.92$ рад/с,

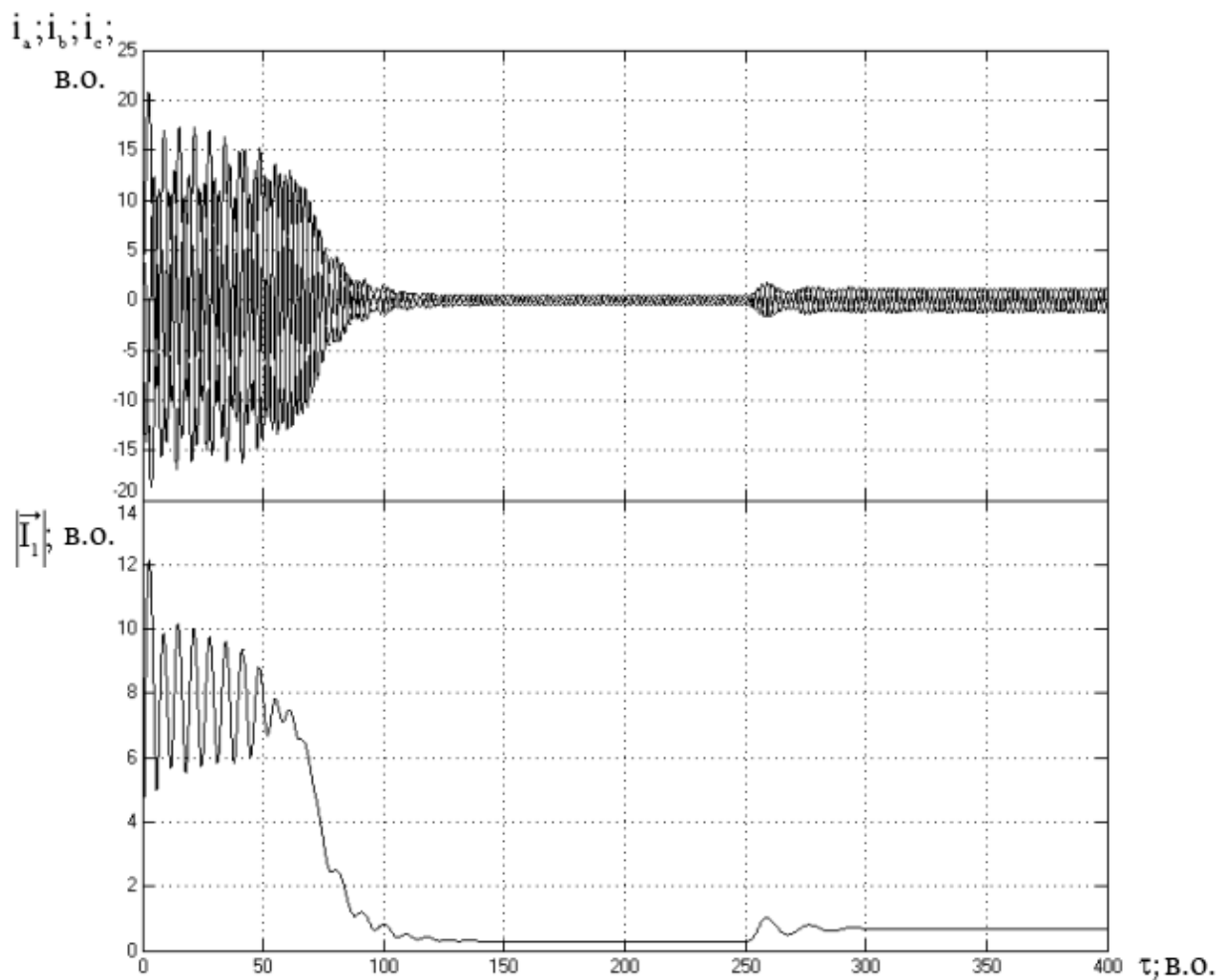


Рисунок 3.3 Часові характеристики

$i_a = f(t); i_b = f(t); i_c = f(t); |\vec{I}_1| = f(t)$ під час пуску АД на холостому ході з подальшим навантаженням

Усталені значення діючого струму обмотки статора:

На холостому ході: $I_1 = 0.3 \cdot I_B = 0.3 \cdot 119.1 = 35.73 \text{ A}$;

Під навантаженням: $I_1 = 0.7 \cdot I_B = 0.7 \cdot 119.1 = 83.37 \text{ A}$;

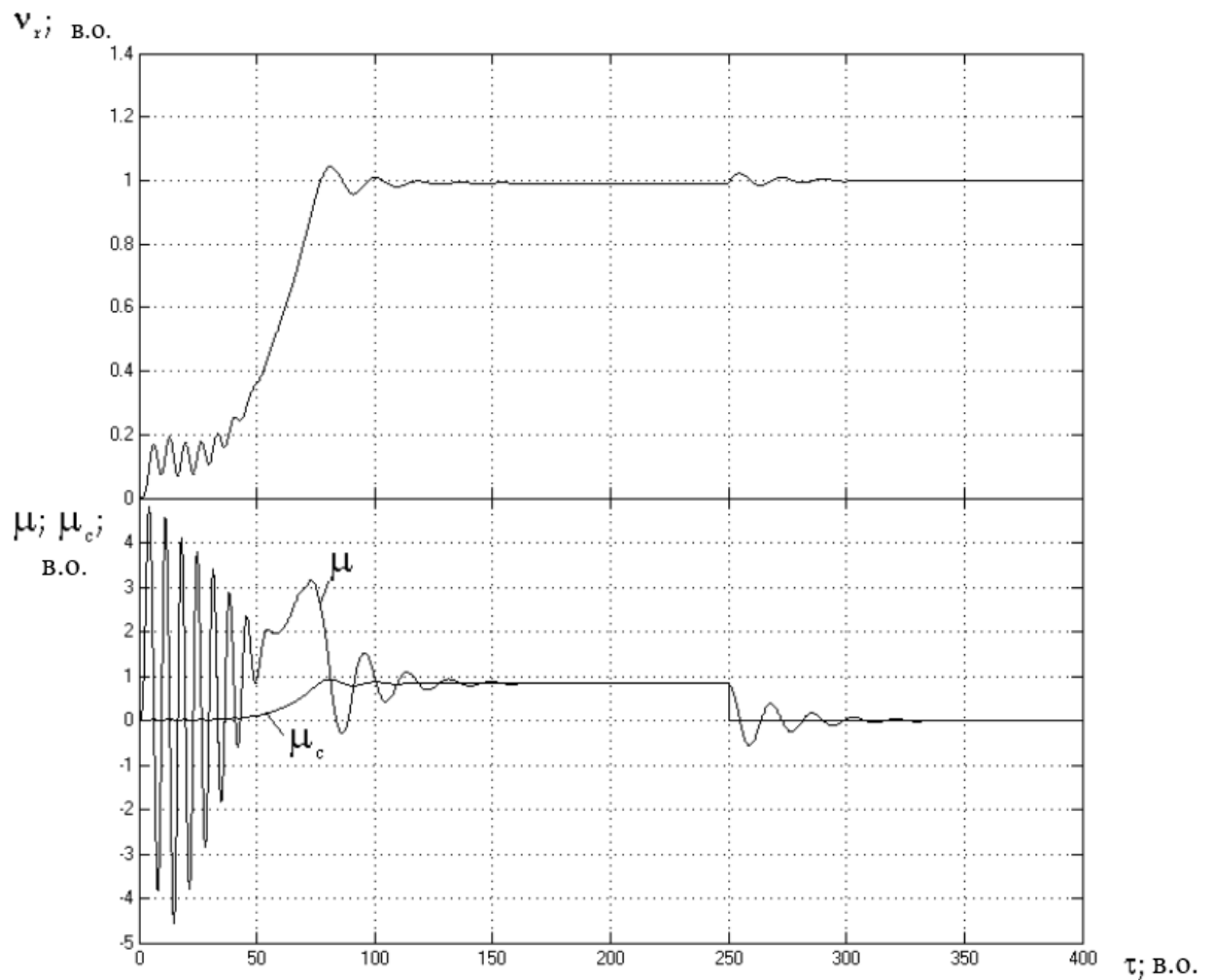


Рисунок 3.4 Часові характеристики $v_r = f(t), \mu = f(t)$ під час пуску АД під навантаженням з подальшим його скиданням

Основні показники для характеристики швидкості $v_r = f(t)$:

Перерегулювання: $\sigma = 4.6\%$,

Коливальність: $n = 0$,

Час регулювання: $t_p = 75 \cdot t_B = 75 / 314.159 = 0.239 \text{ с}$,

Усталене значення;

з навантаженням: $\omega_{уст} = 0.983 \cdot \omega_B = 0.983 \cdot 314.159 = 308.92 \text{ рад/с}$,

без навантаження: $\omega_{уст1} = 1 \cdot \omega_B = 1 \cdot 314.159 = 314.159$ рад/с,

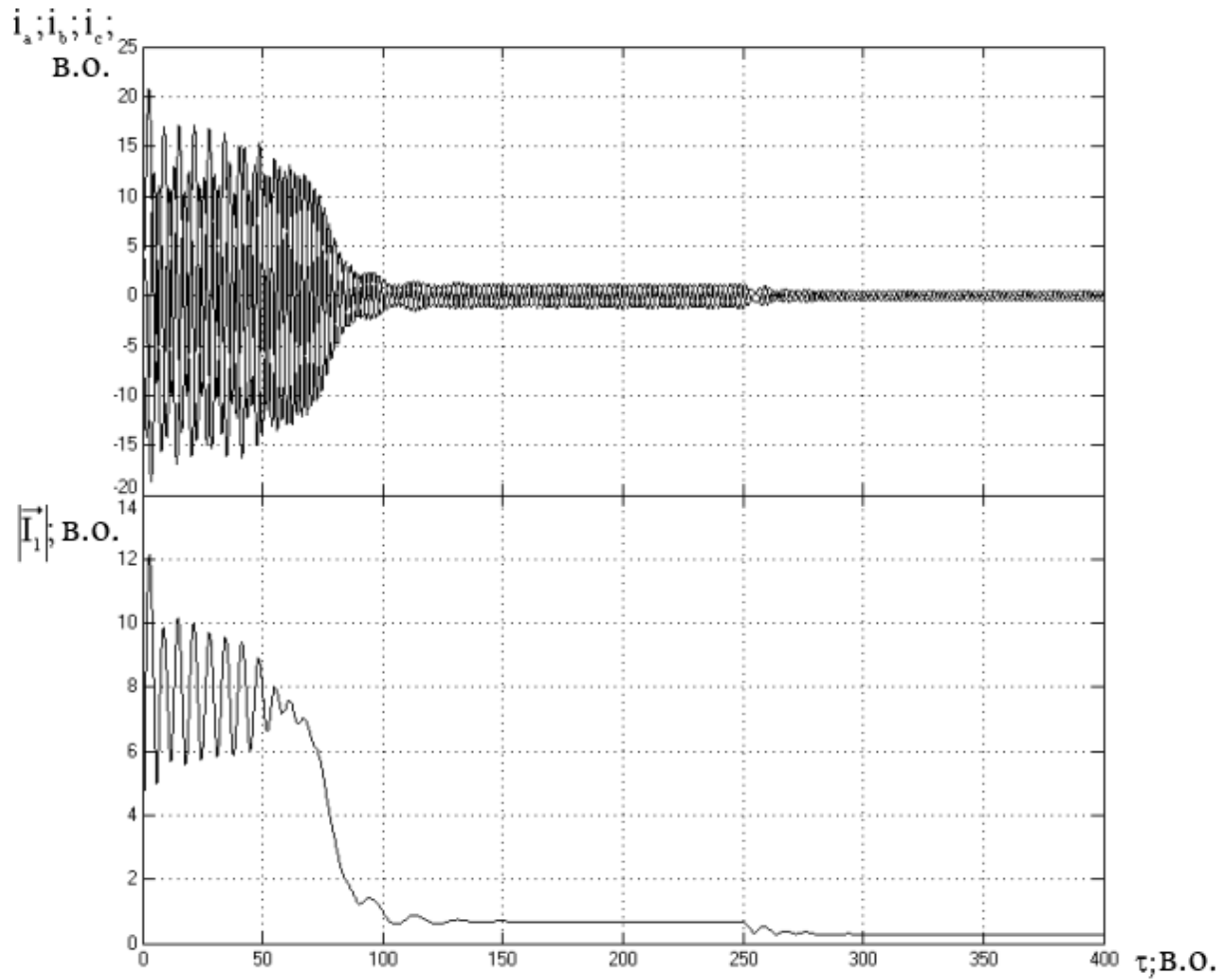


Рисунок 3.5 Часові характеристики

$i_a = f(t); i_b = f(t); i_c = f(t); |\vec{I}_1| = f(t)$ під час пуску АД під навантаженням з подальшим його скиданням

Усталені значення діючого струму обмотки статора:

На холостому ході: $I_1 = 0.7 \cdot I_B = 0.7 \cdot 119.1 = 83.37$ А;

Під навантаженням: $I_1 = 0.3 \cdot I_B = 0.3 \cdot 119.1 = 35.73$ А;

Форма перехідних процесів під час прямого пуску асинхронного електродвигуна свідчить про наявність коливальної складової в кривій електромагнітного моменту, яка змінюється в межах $\pm 5 - M_B$ із частотою 43

Гц і згасає в міру розгону двигуна. При досягненні динамічною характеристикою критичного значення двигун має максимальне прискорення. Пуск під навантаженням супроводжується меншим значенням перерегулювання швидкості. Після досягнення швидкості заданого значення, момент електродвигуна прагнуть врівноважити величину навантаження. Рисунок навантаження призводить до відповідного просідання швидкості. Миттєві значення струмів обмоток статора під час розгону двигуна досягають значення $\pm 20I_B$, після закінчення часу розгону також зменшуються до номінальних. У результаті прямий пуск асинхронного двигуна не дозволяє отримати задовільні перехідні характеристик за умови можливої зміни навантаження що призводить до зниження швидкості та наявності коливальних складових у характеристиці моменту. При цьому характеристики струмів обмоток статора в момент розгону знаходяться на граничному допустимому значенні.

3.3 Вибір перетворювача частоти

Шведська фірма Emotron AB розробила спеціалізовану насосно - вентиляторну серію перетворювачів частоти. Така стратегія призвела до запровадження спеціалізованих можливостей перетворювача, наприклад, програмного монітора навантаження, що дозволяє відстежувати режими «сухого ходу», кавітації чи роботи на закриту заслонку. Наявність додаткової плати дозволяє керувати додатково насосами, включаючи та вимикаючи їх по мірі необхідності. Така робота перетворює перетворювач практично на контролер насосної станції. У результаті відповідно до мережі живлення, потужності двигуна і характеру навантаження обраний перетворювач FDU 40-090 СЕВ шведської фірми Emotron , представлений рисунку 3.6 [9].

Пристрій вирізняється широким набором спеціалізованих функцій, які забезпечують його універсальність та ефективність у використанні. Серед основних функцій можна виділити плавний пуск двигуна, що дозволяє

уникати перевантажень під час запуску. Завдяки вбудованому ПД-регулятору, пристрій підтримує автоматичне регулювання параметрів, забезпечуючи стабільну роботу. Функція подолання провалів напруги дозволяє пристрою стабільно працювати навіть за умов короткочасних збоїв у електроживленні.



Рисунок 3.6. Перетворювач частоти Emotron FDU 40-090 СЕВ

Для моніторингу робочого процесу використовується вбудований монітор навантаження, який дає змогу відслідковувати стан системи в реальному часі. Завдяки автоматичному потенціометру параметри роботи пристрою можуть автоматично адаптуватися до умов експлуатації. Подвійний час розгону та уповільнення дозволяє налаштовувати параметри запуску та зупинки для різних сценаріїв використання.

Крім цього, пристрій підтримує використання макросів, що спрощує автоматизацію процесів, а також може одночасно керувати 7 насосами, що розширює його можливості у багатозадачних середовищах.

Перетворювач частоти працює від джерела живлення з напругою 3×380-415 В із допусками +10%/-15%. Номінальний вихідний струм становить 90 А, а обмеження струму на 120 секунд досягає 108 А. Вхідний струм становить 85 А, а діапазон робочих частот включає 50/60 Гц для входу та 0-400 Гц для виходу.

Високий рівень ефективності забезпечує ККД на рівні 98% при номінальній потужності, а втрати при частоті 1,5 кГц не перевищують 900 Вт. Пристрій має ступінь захисту IP54, що забезпечує його надійність і довговічність навіть у складних умовах експлуатації.

3.4 Статистичні характеристики скалярного керування електроприводом насоса

Для регулювання або стабілізації швидкості в електроприводах зі скалярним керуванням використовують різні підходи до формування залежності між частотою та напругою, що подається на двигун. Вибір конкретного співвідношення впливає на характер навантаження. Для двигуна типу MMG225M який керується перетворювачем частоти FDU 40-090 СЕВ, за паспортними даними та параметрами схеми заміщення, розрахуємо і побудуємо електромеханічні та механічні характеристики при живленні його від статичного перетворювача частоти за наступними законами управління; $U_{1\phi} / f_1 = const$, $U_{1\phi} / f_1^2 = const$, для наступних частот $f_1 = 50, 40, 25, 10$ Гц.

Таблиця 3.1 Необхідні до розрахунку параметри схеми заміщення

Задані величини	Умовне позначення	Одиниці вимірювання	Чисельне значення
Активний опір обмотки статора	R_1	Ом	0,0397
Активний опір обмотки ротора	R'_2	Ом	0,04903
Індуктивний опір обмотки статора	X_1	Ом	0,2021
Індуктивний опір обмотки ротора	X'_2	Ом	0,2757
Індуктивний опір намагнічування	$X_{\mu H}$	Ом	14,024

Для закону керування $U_{1\phi} / f_1 = const$, асинхронним двигуном проведемо

розрахунок електромеханічних і механічних характеристик при частотах 50, 40, 25, 10. Визначимо значення відносних частот, напруг та синхронних швидкостей:

$$f_1 = \frac{f_{1j}}{f_{1H}} = \frac{\{50; 40; 25; 10\}}{50} = \{1; 0.8; 0.5; 0.2\} \text{ в.о.}$$

$$U_{1j} = U_{1\phi} \cdot f_1 = 220 \cdot \{1; 0.8; 0.5; 0.2\} = \{220; 176; 110; 44\} \text{ В.}$$

$$\omega_{0j} = \omega_{0H} \cdot f_1 = 78.54 \cdot \{1; 0.8; 0.5; 0.2\} = \{78.54; 62.83; 39.27; 15.708\} \text{ рад/с}$$

$$S_j(\omega) = \frac{\omega_{0j} - \omega}{\omega_{0j}}$$

$$\Gamma_{2j}(\omega) = \frac{U_{1j}}{\sqrt{X_{kH}^2 \cdot f_1^2 + \left(R_1 + \frac{R'_2}{S_j(\omega)}\right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R'_2}{S_j(\omega) \cdot X_{\mu H} \cdot f_1}\right)}} =$$

$$= \frac{U_{1j}}{\sqrt{0.48116^2 \cdot f_1^2 + \left(0.0397 + \frac{0.04903}{S_j(\omega)}\right)^2 + \left(\frac{0.0397 \cdot 0.04903}{S_j(\omega) \cdot 14.024 \cdot f_1}\right)}}$$

$$I_{1j}(\omega) = \frac{\sqrt{I_0^2 + I_{2j}'^2(\omega) + 2I_0 I_{2j}'(\omega)} \cdot \frac{X_{kH}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{S_1(\omega)}\right)^2 + X_{kH}^2}}}{\sqrt{14.024^2 + I_{2j}'^2(\omega) + 2 \cdot 14.024 \cdot I_{2j}'(\omega)} \cdot \frac{0.48116}{\sqrt{\left(0.0397 + \frac{0.04903}{S_1(\omega)}\right)^2 + 0.48116^2}}} =$$

Побудовані характеристики для даного закону управління двигуном зображені на рисунку 3.7.

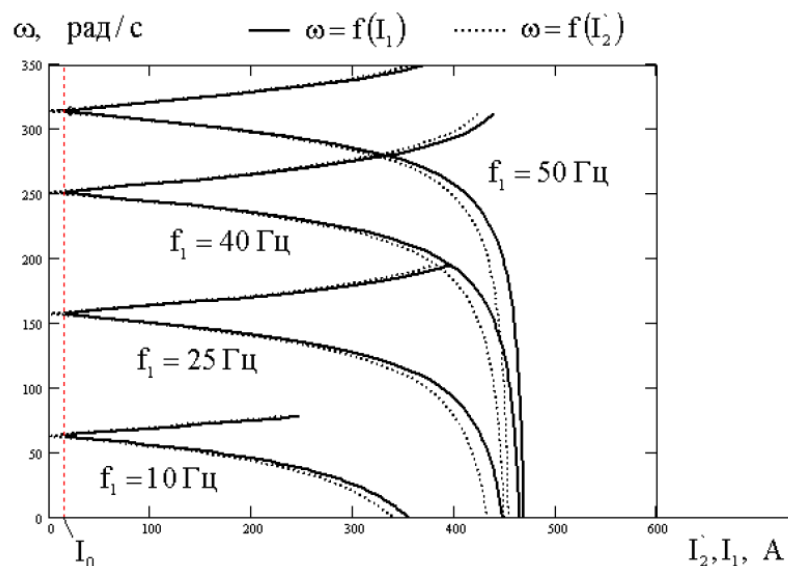


Рисунок 3.7. Залежності електромеханічних характеристик двигуна при законі регулювання швидкості $U_{1\phi} / f_1 = \text{const}$

Для закону керування $U_{1\phi} / f_1^2 = \text{const}$, розрахунок електромеханічних характеристик такий самий, міняється лише відносна напруга:

$$U_{1j} = U_{1\phi} \cdot f_1^2 = 220 \cdot \{1; 0.8; 0.5; 0.2\}^2 = \{220; 140.8; 55; 8.8\} \text{ В}$$

Електромеханічні характеристики для цього закону керування наведено на рисунку 3.8.

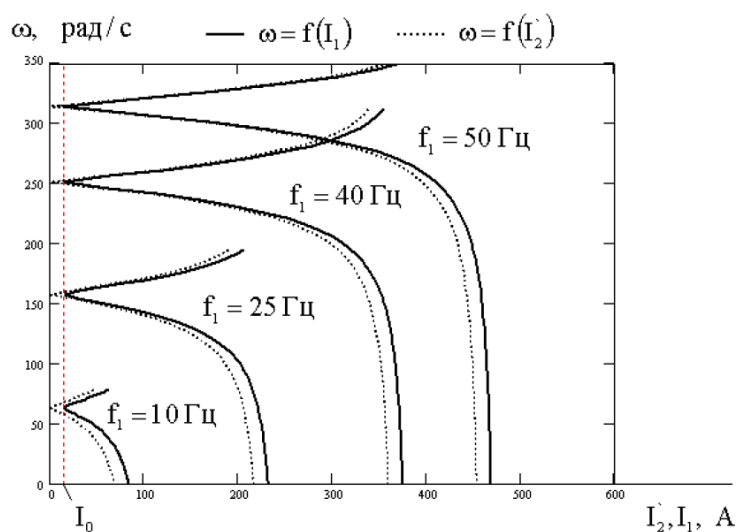


Рисунок 3.7. Залежності електромеханічних характеристик двигуна при законі регулювання швидкості $U_{1\phi} / f_1^2 = \text{const}$

Для побудови механічних характеристик асинхронної машини для законів керування $U_{1\phi} / f_1 = \text{const}$, $U_{1\phi} / f_1^2 = \text{const}$, скористаємося наступним виразом:

$$M_j(\omega) = \frac{3 \cdot (\Gamma(\omega))^2 \cdot R'_2}{\omega_{0j} \cdot S_j(\omega)} = \frac{3 \cdot (\Gamma(\omega))^2 \cdot 0.04903}{\omega_{0j} \cdot S_j(\omega)}$$

Розрахунок механічних характеристик двигуна є продовженням розрахунку електромеханічних характеристик. Тепер відповідні для кожної характеристики значення $\Gamma(\omega)$, $S_j(\omega)$, ω_{0j} підставляються у вираз для характеристики моменту.

Проведемо аналітичний розрахунок величин критичних моментів режимів управління асинхронною машиною законів, що розглядаються за наступним виразом:

$$\begin{aligned} M_{Kpj} &= \frac{3 \cdot U_{1j}^2}{2 \cdot \omega_{0j} [R_1 + \sqrt{(R_1^2 + X_{KH}^2 \cdot f_1^2) \left(1 + \left(\frac{R_1}{X_{\mu H} \cdot f_1}\right)^2}\right)]} = \\ &= \frac{3 \cdot U_{1j}^2}{2 \cdot \omega_{0j} [0.0397 + \sqrt{(0.0397^2 + 0.48116^2 \cdot f_1^2) \left(1 + \left(\frac{0.0397}{14.024 \cdot f_1}\right)^2}\right)]} \end{aligned}$$

Для розрахунку критичного ковзання скористаємося наступним виразом:

$$S_{Kpj} = \frac{R'_2}{\sqrt{\frac{R_1^2 + X_{KH}^2 \cdot f_1^2}{1 + \left(\frac{R_1}{X_{\mu H} \cdot f_1}\right)^2}}} = \frac{0.04903}{\sqrt{\frac{0.0397^2 + 0.48116^2 \cdot f_1^2}{1 + \left(\frac{0.0397}{14.024 \cdot f_1}\right)^2}}}$$

Механічні характеристики двигуна при законах керування $U_{1\phi} / f_1 = \text{const}$, $U_{1\phi} / f_1^2 = \text{const}$, наведено на рисунках 3.8 та 3.9.

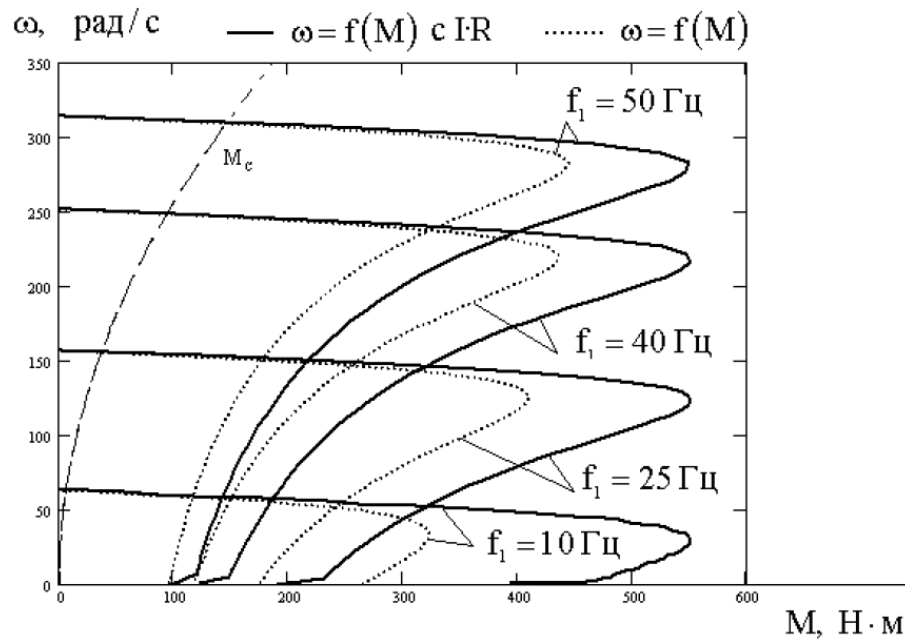


Рисунок 3.8. Залежності механічних характеристик двигуна при законі регулювання швидкості $U_{1\phi} / f_1 = \text{const}$

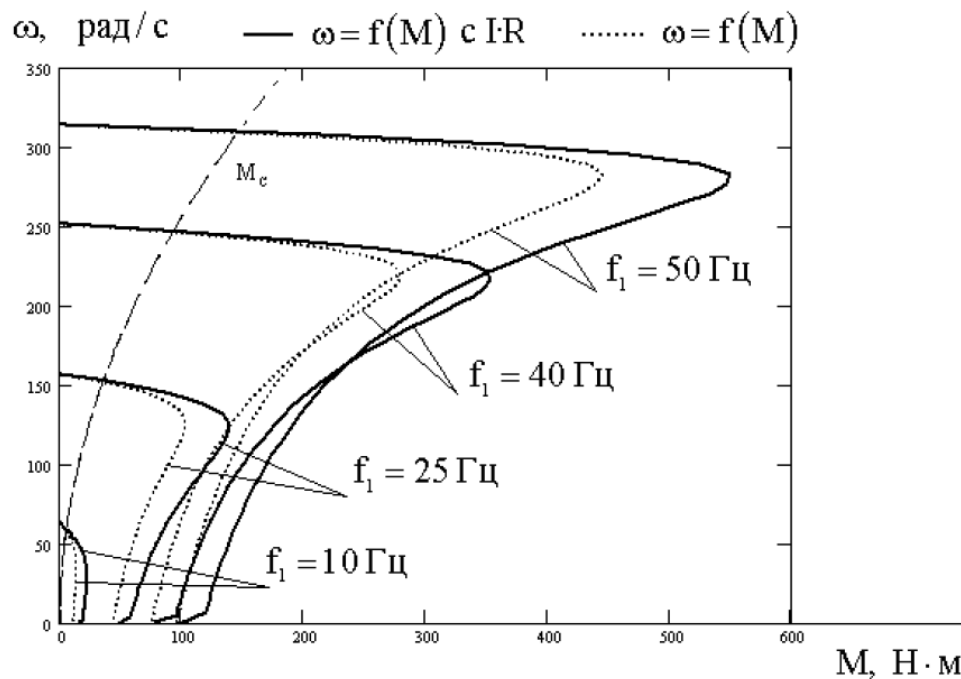


Рисунок 3.9. Механічні характеристики двигуна при законі регулювання швидкості $U_{1\phi} / f_1^2 = \text{const}$

Результат розрахунку критичних моментів і ковзань для різних частот та законів керування зведений до таблиці 3.2

Таблиця 3.2. Результати розрахунку критичного моменту та ковзання

f_{1j} , Гц	S_{KPj} , в.о.	M_{KPj} , Н·м		M_{KPj} , Н·м з IR компенсацією	
		$U_{1\phi} / f_1 = const$	$U_{1\phi} / f_1^2 = const$	$U_{1\phi} / f_1 = const$	$U_{1\phi} / f_1^2 = const$
50	0,102	445,119	445,119	549,222	549,222
40	0,128	436,008	279,045	549,619	352,169
25	0,202	409,899	102,475	549,694	138,15
10	0,474	322,775	12,911	545,889	22,336

Аналіз отриманих характеристик показує, що для цього конкретного двигуна при керуванні за законом $U_{1\phi} / f_1 = const$ зі зниженням частоти живлення стає суттєвим вплив активного опору обмотки статора. Це призводить до зменшення критичного моменту (максимального моменту, який може розвинути двигун) на низьких частотах. Для забезпечення стабільного критичного моменту при регулюванні швидкості необхідно змінювати напругу за законом $U_{1j} = U_{1\phi} \cdot f_1 \cdot I_{l1} \cdot R_1$, що відповідає пропорційному регулюванню з компенсацією падіння напруги на опорі статора. Для реалізації цієї залежності потрібний позитивний зворотний зв'язок за струмом з коефіцієнтом передачі $R1 \cdot K_m$. Величина K_m визначає ступінь компенсації падіння напруги на активному опорі обмотки статора. При значенні $K_m = 1$ досягається повна компенсація $R1$.

3.5 Регулювання швидкості електроприводу за допомогою з I·R - компенсацією

Загальний підхід до розрахунку електромеханічних та механічних характеристик залишається аналогічним попередньому. Проте, ключовою відмінністю є врахування позитивного зворотного зв'язку за струмом, що передбачає постійну корекцію величини прикладеної напруги (U) для

компенсації падіння напруги на активному опорі статора (R) пропорційно струму статора (I). Характеристики з урахуванням $I \cdot R$ -компенсації були змодельовані та побудовані з використанням програмного забезпечення Mathcad 2000.

Електромеханічні характеристики АД при закона регулювання швидкості $U_{1\phi} / f_1 = \text{const}$ та $U_{1\phi} / f_1^2 = \text{const}$ з $I \cdot R$ - компенсацією наведено на рисунках 3.10, та 3.11.

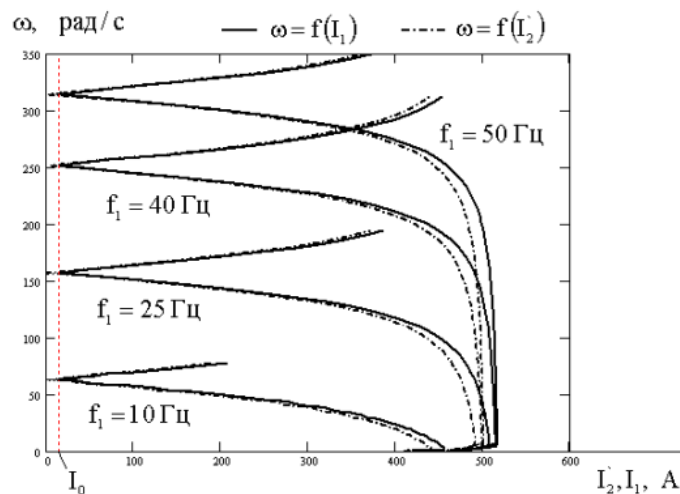


Рисунок 3.10. Електромеханічні характеристики двигуна при законі - регулювання швидкості $U_{1\phi} / f_1 = \text{const}$ з $I \cdot R$ – компенсацією.

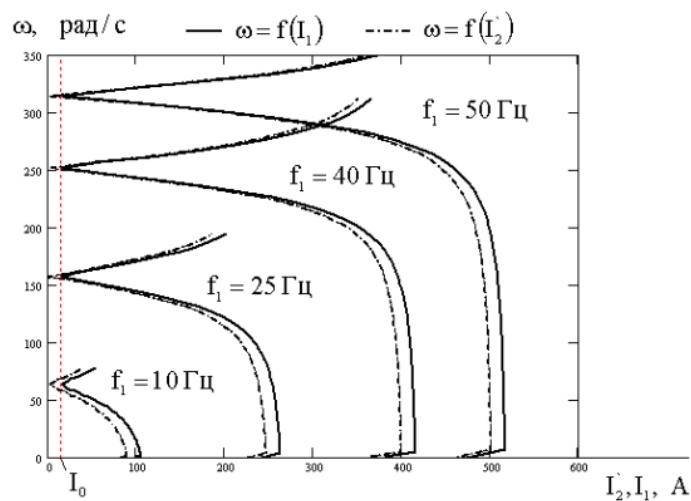


Рисунок 3.11. Електромеханічні характеристики двигуна при законі - регулювання швидкості $U_{1\phi} / f_1^2 = \text{const}$ з $I \cdot R$ – компенсацією.

Аналіз побудованих механічних та електромеханічних характеристик електроприводу показує, що застосування позитивного зворотного зв'язку за струмом призводить до розширення області максимального моменту на механічних характеристиках. Іншими словами, двигун здатний розвивати більший момент у ширшому діапазоні швидкостей. Однак, слід враховувати, що додаткове підмагнічування системи, особливо на низьких швидкостях, може призвести до перевищення допустимого теплового режиму роботи двигуна через збільшення струму статора та, відповідно, збільшення теплових втрат в обмотках. Це пов'язано з тим, що компенсація падіння напруги на активному опорі статора ($I \cdot R$) призводить до збільшення напруги на обмотках, що може спричинити перегрів. Але при заданому малому діапазоні регулювання швидкості дане значення не є суттєвим.

3.6 Висновки до розділу

1. За допомогою розробленої імітаційна модель асинхронного електродвигуна в системі візуального моделювання SIMULINK проведено моделювання динамічних характеристик асинхронного електродвигуна при прямому пуску.

2. Отримано часові характеристики залежність моменту навантаження від швидкості обертання валу двигуна, при навантаженні та без нього. Показано, що миттєві значення струмів обмоток статора під час розгону двигуна досягають значення $\pm 20I_B$, після закінчення часу розгону також зменшуються до номінальних. У результаті прямий пуск асинхронного двигуна не дозволяє отримати задовільні перехідні характеристик за умови можливої зміни навантаження.

3. Для забезпечення необхідних робочих значень струмів запропоновано використати перетворювач частоти Emotron FDU 40-090 СЕВ.

4. Проведено розрахунок і побудовано електромеханічні та

механічні характеристики при живленні електродвигуна від статичного перетворювача частоти за наступними законами управління; $U_{1\phi} / f_1 = \text{const}$, $U_{1\phi} / f_1^2 = \text{const}$, для наступних частот $f_1 = 50, 40, 25, 10$ Гц. Показано, що для регулювання швидкості двигуна з постійним критичним моментом необхідно пропорційне регулювання з $I \cdot R$ – компенсацією.

5. Результати моделювання електромеханічних характеристик двигуна при законі -регулювання швидкості $U_{1\phi} / f_1^2 = \text{const}$ з $I \cdot R$ – компенсацією показали, що введення в систему керування позитивного зворотного зв'язку по струму збільшує значення області максимального моменту механічних характеристик.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Причини електротравм та умови ураження людини електричним струмом

Чинна класифікація причин електротравматизму не відрізняється від загальноприйнятої класифікації причин нещасних випадків. Найбільш поширеними серед груп причин електротравматизму є організаційні та технічні.

Серед технічних причин слід виділити такі, як недосконалість конструкції електроустановки і засобів захисту, допущені недоліки при виготовленні, монтажу і ремонті електроустановки, невідповідність будови електроустановок і захисних засобів умовам їх застосування тощо.

Організаційні причини електротравматизму в першу чергу пов'язані з недостатньою кваліфікацією працівників, порушеннями правил безпеки, відсутністю нагляду та контролю за виконанням робіт в електроустановках, несвоєчасним опосвідчення технічного стану електроустановок, відсутністю чи невідповідністю вимогам безпеки засобів захисту, експлуатацією несправних електроустановок тощо.

Серед безпосередніх причин попадання людей під напругу слід виділити

такі:

- поява напруги на корпусі електроустановки або на електрично зв'язаних з ним металоконструкціях (далі – корпусі) у результаті пошкодження ізоляції;
- поява напруги на ізольованих струмопровідних частинах електроустановок у результаті пошкодження ізоляції;
- доступність неізольованих струмопровідних частин електроустановок, які знаходяться під напругою, що призводить до випадкового дотику до них;
- потрапляння в зону розтікання струму в землі;

- виникнення електричної дуги між струмопровідними частинами і тілом людини.

Струм через тіло людини проходить, якщо вона торкається одночасно двох точок, між якими існує напруга, і при цьому виникає замкнене коло. Величина цього струму залежить від схеми включення, тобто від того, яких частин електроустановки торкається людина, а також від параметрів електричної мережі. Серед різноманітних схем включення людини в електричне коло слід виділити такі:

- одночасний дотик до двох полюсів мережі постійного струму або до фази та нуля однофазної мережі чи двох фаз трифазної мережі змінного струму;
- дотик до одного з полюсів чи однієї з фаз мережі змінного струму, при якому коло струму замикається через людину та землю;
- дотик до корпусу електроустановки, який у результаті пошкодження ізоляції знаходиться під напругою, за умови, що коло струму замикається через людину та землю;
- одночасний дотик до двох точок на поверхні землі, які в результаті замикань на землю знаходяться під напругою.

Практично при всіх схемах (крім першої) складовим елементом кола струму через тіло людини є земля. Тому при аналізі небезпеки враження струмом у різних електричних мережах необхідно зрозуміти сутність явищ, які виникають при замиканні мережі на землю та розтіканні струму в землі.

4.2 Система засобів та заходів з безпечної експлуатації електроустановок

При розробці системи засобів та заходів з безпечної експлуатації електроустановок у першу чергу враховується:

- особливості виробничого середовища;
- доступність електрообладнання;

- величина напруги мережі живлення, V ;
- величина струму замкнення на землю, A ;
- конструктивні особливості мережі живлення – кількість фаз і режим нейтралі;

- величина опору і стан ізоляції провідників відносно землі;
- протяжність і розгалуженість мережі живлення.

Усі засоби і заходи електробезпеки прийнято поділяти на три групи: технічні, організаційні та електрозахисні. Технічних засоби і заходи з електробезпеки реалізуються в конструкції електроустановок при їх розробці, виготовленні і монтажі відповідно до чинних нормативів. За своїми функціями технічні засоби і заходи електробезпеки поділяються на дві групи:

- технічні заходи та засоби електробезпеки, що використовуються за нормального режиму роботи електроустановок;
- технічні заходи та засоби електробезпеки, що використовуються за аварійних режимів роботи електроустановок.

До основних технічних засобів і заходів першої групи відносяться:

- захист від випадкового доторкання до струмопровідних частин;
- блокувальні пристрої;
- засоби орієнтації та сигналізації;
- захисне розділення електричних мереж;
- застосування малої напруги;
- компенсація ємнісних струмів замикання на землю;
- вирівнювання потенціалів.

Залежно від призначення, умов експлуатації та конструкції в електроустановках можуть застосовуватись одночасно декілька з перелічених технічних засобів і заходів.

Технічні заходи електробезпеки, що використовуються за аварійних режимів роботи електроустановок включають:

- захисне заземлення;

- занулення;
- захисне відключення.

Електрозахисні засоби – це технічні вироби, що не є конструктивними елементами електроустановок і застосовуються під час виконання робіт в електроустановках з метою запобігання електротравм.

Організаційні заходи і засоби щодо попередження електротравм регламентуються НПАОП 40.1-1.21-98 «Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів». Вони включають професійний відбір, професійну підготовку, навчання і перевірку знань працівників з питань електробезпеки, організацію безпечного виконання та нагляду за роботами в електроустановках, обмеження доступу в електроустановки, огляд, профілактичні, протиаварійні, приймально-здавальні випробування електроустановок, опосвідчення діючих електроустановок тощо.

4.3 Інженерні норми проектування об'єктів енергетики.

Заходи щодо підвищення стійкості об'єктів енергетики здійснюють відповідно до вимог Норм проектування інженерно-технічних заходів, які починають діяти після прийняття постанови урядом. Вимоги норм призначені для того, щоб в умовах НС:

- забезпечити захист населення та знизити масштаби руйнувань (пожеж, затоплень, заражень);
- підвищити стійкість роботи об'єктів господарювання і галузей економіки;
- створити умови для успішного проведення робіт з ліквідації наслідків НС.

Вимоги норм проектування реалізують під час проектування та забудови міст, будування нових промислових підприємств, об'єктів енергетики, транспортних систем, систем водо- та газопостачання, а також під час їх реконструкції.

Головним документом, відповідно до якого слід планувати та здійснювати інженерно-технічні заходи цивільного захисту (ІТЗ ЦЗ) є «Будівельні норми і правила» (БН і П 2.00.05-90), а також «Загальні вимоги до розвитку і розміщення потенційно небезпечних виробництв з урахуванням ризику надзвичайних ситуацій техногенного походження» (Київ, НАН України, 1995). Запровадження норм проектування ІТЗ ЦЗ здійснюється диференційовано з урахуванням ролі і важливості міст і об'єктів економіки. Для цього міста поділяють на групи, а об'єкти – на категорії за такою класифікацією: міста: «Особливої групи», I, II та III груп; об'єкти господарювання: «Особливої важливості», I та II категорій. Об'єкти атомної енергетики виділяють в окрему групу.

Для «категорійних» міст і об'єктів з метою реалізації ІТЗ встановлено дві зони: можливих слабких руйнувань, де очікується (за прогнозом) надмірний тиск у фронті повітряної УХ $P_f = 10\text{--}30$ кПа; можливих сильних руйнувань, у межах якої очікується $P_f \geq 30$ кПа.

Межа зони сильних руйнувань для міст «особливої», I, II, III груп пролягає в межах проектної забудови міста (ПЗМ), а зони слабких руйнувань – на відстані 7 км від межі проектної забудови міста (ПЗМ приймають відповідно до затвердженого генерального плану забудови на розрахунковий період). Для об'єктів «особливої важливості» межа зони сильних руйнувань пролягає на відстані 3 км від межі проектної забудови об'єкта; слабких – 10 км

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. На основі технологічної схеми системи теплопостачання визначено, що продуктивність насоса повинна становити 275 м³/год. Для забезпечення даної продуктивності вибрано насос марки насос НК 100 - 200/198. В якості електродвигуна вибрано асинхронний двигун з короткозамкненим ротором ММГ225М.

2. Проведено розрахунок механічних та електромеханічних характеристик електродвигуна. Отримано систему рівнянь для побудови математичної моделі асинхронного електроприводу в рухомій системі координат, та побудовано структурну схему моделі асинхронного електродвигуна в рухомій системі координат.

3. За допомогою розробленої імітаційна модель асинхронного електродвигуна в системи візуального моделювання SIMULINK проведено моделювання динамічних характеристик асинхронного електродвигуна при прямому пуску.

4. Отримано часові характеристики залежність моменту навантаження від швидкості обертання валу двигуна, при навантаженні та без нього. Показано, що миттєві значення струмів обмоток статора під час розгону двигуна досягають значення $\pm 20I_B$, після закінчення часу розгону також зменшуються до номінальних. У результаті прямий пуск асинхронного двигуна не дозволяє отримати задовільні перехідні характеристик за умови можливої зміни навантаження. Для забезпечення необхідних робочих значень струмів запропоновано використати перетворювач частоти Emotron FDU 40-090 СЕВ.

5. Проведено розрахунок і побудовано електромеханічні та механічні характеристики при живленні електродвигуна від статичного перетворювача частоти за наступними законами управління; $U_{1\phi} / f_1 = const$, $U_{1\phi} / f_1^2 = const$, для наступних частот $f_1 = 50, 40, 25, 10$ Гц. Показано, що

для регулювання швидкості двигуна з постійним критичним моментом необхідно пропорційне регулювання з $I \cdot R$ – компенсацією.

6. Результати моделювання електромеханічних характеристик двигуна при законі регулювання швидкості $U_{1\phi} / f_1^2 = \text{const}$ з $I \cdot R$ – компенсацією показали, що введення в систему керування позитивного зворотного зв'язку по струму збільшує значення області максимального моменту механічних характеристик. Перехідні процеси в електроприводі протікають відносно плавно з обмеженням динамічного моменту струму електродвигуна

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Пирков В.В. Особливості проектування сучасних систем водяного опалення / В.В. Пирков. – К. : П ДП «Такі справи», 2003. – 176 с.
2. Боженко М.Ф. Джерела теплопостачання та споживачі теплоти: Навч. посіб. / М.Ф.Боженко, В.П.Сало. – Київ: ІВЦ „Видавництво „Політехніка”, 2004. – 192 с.
3. Системи опалення, вентиляції і кондиціювання повітря будівель [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студентів спеціальності 144 «Теплоенергетика» / М.Ф.Боженко ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 36,087 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 380 с.
4. Самойленко І. О. Енергетичний менеджмент та енергоефективність / І. О. Самойленко, О. Г. Гриб, А. О. Запорожець. – Харків : ФОП Бровін О. В., 2020. – 348 с.
5. Електричні машини і апарати: навчальний посібник / Ю.М.Куценко, В.Ф.Яковлев та ін.–К.: Аграрна освіта, 2013. –449 с
6. Буняк О. А. Електричні машини : Навчальний посібник /. — Тернопіль : ФОП Паляниця В.А. , 2023 — 324 с.
7. Шевченко І.С. , Морозов Д.І. Електромеханічні системи в асинхронному електроприводі: Навч. посібник / Алчевськ: ДонДТУ, 2009. – 349 с
8. Математичні методи та особливості чисельних розрахунків динаміки електроприводів з асинхронними двигунами: монографія / О.П.Чорний, О.І. Толочко, В.К. Титюк. – Кременчук: ПП Щербатих О.В., 2016. – 300 с.
9. Стручок В.С. Безпека в надзвичайних ситуаціях. Методичний посібник для здобувачів освітнього ступеня «магістр» всіх спеціальностей денної та заочної (дистанційної) форм навчання / В.С.Стручок. — Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2022. — 156 с.

10. БОЖЕНКО, М. Ф.; СЕРЕДА, Д. С.; НОВІЦЬКИЙ, М. І. Уточнення температурних графіків теплових мереж при централізованому теплопостачанні споживачів. 2012.
11. Плахтина О.Г. та ін. Частотно-керовані асинхронні та синхронні електроприводи: Навч. посібник. – Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2002. – 228 с.
12. Інженерне обладнання будинків і споруд. Зовнішні мережі та споруди. Теплові мережі : ДБН В.2.5-39:2008. – К.: Мінрегіонбуд України, 2009. – 56 с.
13. Толочко О.І. Моделювання електромеханічних систем. Математичне моделювання систем асинхронного електроприводу: Навчальний посібник. – Київ: НТУ «КПІ», 2016. – 150 с.
14. Коваль В.П. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи магістра для здобувачів другого рівня вищої освіти за ОПП Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка/ В.П. Коваль, М.Г. Тарасенко, О.А. Буняк, Л.Т. Мовчан – Тернопіль: ТНТУ, 2024. – 51 с.
15. Методичні вказівки для написання розділу «Безпека життєдіяльності, основи охорони праці» в кваліфікаційних роботах здобувачів освітнього рівня „бакалавр”. Для студентів всіх форм навчання рівень вищої освіти перший (бакалаврський) / укл. : О. Я. Гурик , І. Б. Окіпний. – Тернопіль : ТНТУ імені Івана Пулюя, 2021. - 20 с.