

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

бакалавр

(назва освітнього ступеня)

на тему: **Розрахунок енергоефективного електроприводу насоса системи
теплопостачання**

Виконав(ла): студент(ка) 4 курсу, групи ЕТЗс-42
спеціальності 141 – Електроенергетика,

електротехніка та електромеханіка

(шифр і назва спеціальності)

	(підпис)	<u>Фіцай Д. М.</u> (прізвище та ініціали)
Керівник	(підпис)	<u>Оробчук Б. Я.</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>Микулик П. М.</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.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

на здобуття освітнього ступеня бакалавр
(назва освітнього ступеня)
за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(шифр і назва спеціальності)
студенту Фіцаю Денису Миколайовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розрахунок енергоефективного електроприводу насоса системи
теплопостачання.

Керівник роботи Оробчук Богдан Ярославович, к.т.н., доц.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від «25» квітня 2024_ року № 4/7-444

2. Термін подання студентом завершеної роботи червень 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 Безпека життєдіяльності та основи охорони праці

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
Безпека життєдіяльності та основи охорони праці	Гурик Я. О., доцент кафедри МТ		
Нормоконтроль	Коваль В. П., зав. кафедри ЕІ		

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ		
2	Аналітичний розділ		
3	Розрахунково-дослідницький розділ		
4	Проектно-конструкторський розділ		
5	Проектно-конструкторський розділ		
6	Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях		
7	Оформлення пояснювальної записки		
8	Оформлення графічного матеріалу		

Студент

_____ (підпис)

Фіцай Д. М.

_____ (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

_____ (підпис)

Оробчук Б. Я.

_____ (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота бакалавра. Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії. Кафедра електричної інженерії, група ЕТрс–42. - Т. : ТНТУ, 2024.

Стор. 53; рис. 26; табл. 4;; джерел 15; додатків 0.

Кваліфікаційна робота бакалавра виконана на підставі завдання на тему: «Розрахунок енергоефективного електроприводу насоса системи теплопостачання».

Метою даної роботи є вирішення задачі енергозбереження електроприводу насоса котла шляхом його модернізації.

У випускній кваліфікаційній роботі було проаналізовано напрями розвитку електроприводів із частотним регулюванням. Виявлено, що останнім часом значно зріс попит на асинхронні двигуни для систем частотного регулювання, які забезпечують енергозбереження та електромагнітну сумісність під час роботи в різних середовищах і установках.

Виконано математичне моделювання системи електроприводу. Розроблено модель асинхронного двигуна та віртуальну модель електроприводу з частотним керуванням, яка дозволяє аналізувати та досліджувати змодельовані режими частотного пуску асинхронного приводу на персональному комп'ютері у програмі MATLAB Показано, що при використанні скалярного методу керування на частоті 50 Гц час перехідних процесів зменшується до 0,19 с.

Ключові слова:

ЛОГІЧНИЙ КОНТРОЛЕР, РЕГУЛЯТОР ЕЛЕКТРОПРИВОДУ, АСИНХРОННИЙ ДВИГУН, СИСТЕМА КЕРУВАННЯ .

ЗМІСТ

ВСТУП	5
1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ.....	7
1.1. Опис технологічного процесу насосної установки	7
1.2. Аналіз методів підвищення енергоефективності електроприводу насоса системи теплопостачання.....	9
1.3 Способи регулювання координат асинхронних електроприводів та їх енергетична ефективність	11
2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ.....	17
2.1 Вибір насоса системи теплопостачання	17
2.2 Вибір приводного електродвигуна.....	18
2.3 Розрахунок параметрів електродвигуна	20
2.4 Розрахунок параметрів схеми заміщення асинхронного електродвигуна	21
2.5 Побудова природних електромеханічних та механічних характеристик	24
2.6 Вибір системи управління та перетворювача частоти	26
2.7 Розрахунок сімейства механічних та електромеханічних характеристик при зміні частоти.....	28
3 РОЗРАХУНКОВИЙ РОЗДІЛ	32
3.1 Дослідження прямого пуск двигуна.....	32
3.2. Функціональна схема регульованого електроприводу	33
3.3. Імітаційна модель задачника інтенсивності з S-подібною характеристикою.	39
4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ ТА ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ.....	45
4.1 Організаційні та технічні заходи щодо створення безпечних умов праці при монтажі двигуна та перетворювача частоти	45
4.2 Заходи щодо попередження надзвичайних ситуацій, що виникають у результаті можливих аварій на об'єкті.....	47
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	51
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	52

ВСТУП

Енергозбереження є одним із важливих, пріоритетних завдань технічної політики нашої держави. В даний час понад 60% всієї електроенергії електростанцій споживають електроприводи, що дозволяє зробити висновок про високу актуальність завдань енергозбереження при їх експлуатації. На межі двадцять першого століття досягнуто значних успіхів у силовій електроніці: освоєно промислове виробництво потужних транзисторів IGBT та силових модулів на їх основі та безпосереднім мікропроцесорним керуванням. Досягнуто колосального прогресу в галузі інформаційно-обчислювальної техніки, мікропроцесорних систем управління та контролю, а також у поглибленні теорії електроприводу змінного струму. Це зумовлює стійку тенденцію розвитку та застосування систем частотного керування, особливо систем електроприводу змінного струму зі скалярним та векторним керуванням. Такі електроприводи не мають обмежень щодо максимальної швидкості обертання та граничної потужності, безконтактні та мають мінімальні експлуатаційні витрати. Цілеспрямоване застосування таких електроприводів дозволяє вирішити актуальні найскладніші завдання виробництва, включаючи завдання енергозбереження.

Сучасні перетворювачі частоти, використовуючи принцип широтно – імпульсної модуляції, забезпечують формування регульованої трифазної синусоїдальної напруги високої якості, що дозволяє суттєво знизити втрати електроенергії у статорних обмотках двигуна при живленні від перетворювача частоти. У порівнянні з іншими двигунами асинхронний двигун має ряд переваг: простота конструкції, мала інерційність ротора, більш висока надійність роботи (особливо з короткозамкненим ротором), низька вартість та простота монтажу та експлуатації. Все це, у поєднанні з високими регульовальними та динамічними показниками перетворюють частотний електропривід на домінуючий тип регульованого електроприводу масового застосування.

З безлічі областей, у яких потрібно вирішувати технологічні питання, пов'язані з регулюванням частоти обертання різних виробничих механізмів та пристроїв, можна виділити найбільш важливі та ефективні напрямки: ширше впровадження електроприводів із частотним регулюванням насосів асинхронних двигунів для систем водопостачання, водовідведення; впровадження частотного електроприводу для регулювання швидкості обертання вентиляторів, нагнітачів, повітродувок та компресорів різних механізмів.

У названих областях за даними статистики приблизно 25% електроенергії, що виробляється, споживають приводи відцентрових насосів і вентиляторів різних об'єктах. Застосування електроприводу з частотним перетворювачем відкриває нову технологію енергозбереження, в якій економиться не лише електроенергія, але й зберігається теплова енергія і скорочується витрата води за рахунок виключення її витоків, оскільки відсутнє перевищення тиску в магістралі в процесі регулювання витрат. Частотний асинхронний електропривід насосів дозволяє значною мірою уникнути аварійних ситуацій за рахунок запобігання гідравлічних ударів, що виникають при зміні режимів роботи та пуску насосної системи порівняно з нерегульованим електроприводом. Тому в порівнянні з іншими електроприводами, перевагу слід віддати електроприводу на основі асинхронного двигуна з короткозамкнутим ротором при живленні обмоток статорів від перетворювача частоти з проміжною ланкою постійного струму.

Метою даної роботи є вирішення задачі енергозбереження електроприводу насоса котла шляхом його модернізації.

1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1. Опис технологічного процесу насосної установки

З метою опису технологічної установки в даному розділі наведено терміни та визначення, які характерні для установок даного типу:

Насос – гідравлічна машина, призначена для напірного переміщення різних рідин, механічних сумішей рідини з твердими та колоїдними речовинами, а також зріджених газів шляхом перетворення механічної енергії приводного двигуна в енергію потоку рідини.

Насосний агрегат - це сукупність пристроїв, що включає насос, передавальний механізм і електропривід.

Насосна установка – це комплекс обладнання для забезпечення необхідного режиму роботи одного або групи насосних агрегатів.[1]

Для приведення насоса в дію необхідний електродвигун та пристрій регулювання тиску/розрідження. Найбільш широко застосовуваним способом регулювання насосних установках є дроселювання, коли двигун працює на максимальних оборотах, а регулювання в системі здійснюється за допомогою засувки, гвинтів, відводів і т.д., тобто. шляхом зміни поперечного перерізу трубопроводу. Характеристики насоса (пунктирна лінія) та трубопроводу (суцільна лінія) представлені на рисунку 1.1.

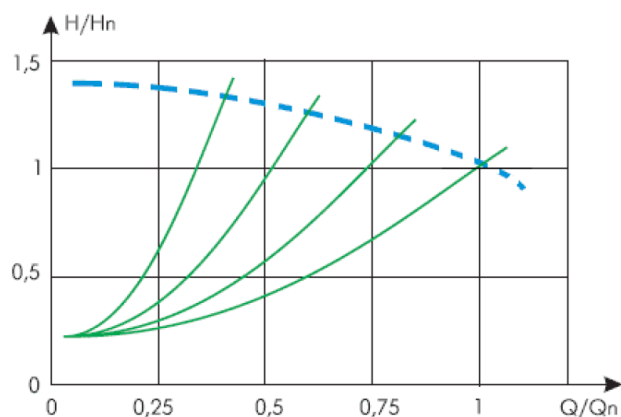


Рисунок 1.1 – Характеристики насоса (пунктирна лінія) та трубопроводу (суцільні лінії) при регулюванні дроселюванням.

Цей спосіб регулювання сприяє необґрунтованим витратам електроенергії, оскільки потужність, що споживається насосною установкою, також залишається постійною. Надлишок потужності витрачається на підвищення тиску в трубопроводі вище за розрахункове значення, що призводить до передчасного зносу трубопровідних систем і запірних пристроїв. Ще один несприятливий момент при даному способі регулювання - гідроудар, ударний механічний вплив на межі розділу вода-повітря, що викликає пориви старих ділянок труб, а також у місцях їх з'єднань. Втрати електроенергії при регулюванні дроселювання можуть становити близько 5-30% від споживаної електроенергії, а в окремих випадках даний показник може досягати 50%.[2,3]

Для боротьби з описаними недоліками все більший інтерес останнім часом отримали автоматизовані регульовані приводи із перетворювачами частоти. Застосування цього приводу забезпечує:

- плавний пуск електродвигуна, відсутність кидків струму в мережі живлення;
- відсутність гідроударів;
- ефективне використання споживаної потужності насосним агрегатом по всьому діапазоні регулювання;
- значення коефіцієнта потужності двигуна насоса близьким до одиниці;
- зниження рівня шуму під час пуску та при роботі;
- автономну та безпечну роботу;
- інтеграцію до систем автоматичних систем управління технологічних процесів;

Характеристики насоса та трубопроводу при використанні приводу з частотного перетворювача наведено на малюнку 1.2.

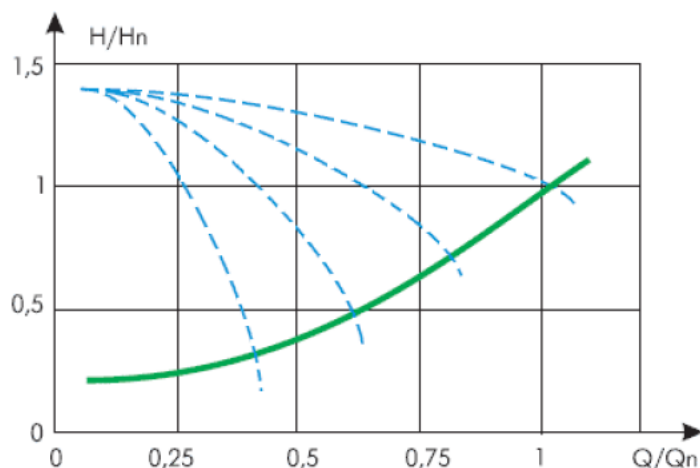


Рисунок 1.2 – Характеристики насоса (пунктирні лінії) та трубопроводу (суцільна лінія) під час використання приводу з частотним перетворювачем.

1.2. Аналіз методів підвищення енергоефективності електроприводу насоса системи тепlopостачання

У системах із змінним завантаженням, якими є, у тому числі і насоси, відцентрові насоси при проектуванні розраховуються на максимальну продуктивність (в тому числі з врахуванням виникнення аварійних ситуацій таких як пожежа, аварія на мережі). Електрична установка загалом повинна володіти максимальним коефіцієнтом корисної дії при номінальному режимі.

При проектуванні систем з електроприводами протягом останніх десятиліть у проекти закладалися можливості регулювання подачі води (повітря) за допомогою доступних на той час способів, що є непрямими по відношенню до електроприводу, оскільки регулювання сили потоку здійснюється не самим електродвигуном, а спеціальними пристроями.[4]

Електропривод забезпечує рух різних робочих механізмів та визначає перспективу розвитку більшості галузей, господарську діяльність людства. Застосування частотних перетворювачів на базі силових IGBT транзисторів підвищує енергозбереження, яке значною мірою визначається ефективністю електроприводу. Розробка високопродуктивних, компактних та економічних систем приводу на базі ПЛ є пріоритетним напрямком розвитку сучасної техніки. Напрямок розвитку автоматизованого електроприводу змістився у бік

частотних електроприводів змінного струму. В умовах підвищених температур, вологості, запиленості, вибухо- та пожежонебезпечності, відсутності можливості для обслуговування, необхідності підвищених та високих частот застосування асинхронного короткозамкнутого двигуна не має альтернатив. Частотні електроприводи з асинхронним двигуном не мають обмежень щодо максимальної швидкості обертання та граничної потужності, безконтактні та мають мінімальні експлуатаційні витрати. Як складова частина автоматизованого електроприводу, асинхронний двигун із короткозамкненим ротором виграє за всіма критеріями зіставлення. У більшості практичних додатків перетворювач частоти є компонентом автоматизованої системи та виконує керуючу, інформаційну та допоміжну функції. Сучасні перетворювачі частоти мають вбудовані регулятори (ПД-регулятори), обробляють десятки вхідних та вихідних сигналів, мають розвинені засоби діагностики та захисту, інтерфейси, формують попереджувальні та аварійні повідомлення. Крім системного програмного забезпечення та стандартного набору прикладних програм, багато перетворювачів частоти надають можливість користувачам розробляти власні прикладні програми та використовувати їх поряд зі стандартними макросами.[5]

В останні десятиліття гостро постала проблема енергозбереження у промисловості. Наслідком цього стало запровадження регульованого електроприводу з короткозамкненим ротором у традиційні галузі промисловості, де застосовувався нерегульований електропривод. Досвід різних країн підтверджує високу ефективність регульованого електроприводу в системах водопостачання, теплопостачання, вентиляції та опалення будівель, а також приводу металорізальних верстатів, механізми металургійного виробництва тощо. Наприклад, у водопостачанні економія електроенергії сягає до 50%, а економія води та тепла до 15% і більше. Виключаються гідравлічні удари у системах водопостачання, забезпечується зручна диспетчеризація та облік енергоносіїв. Термін окупності впровадження

регульованого асинхронного електроприводу у систему водопостачання не перевищує року. У зв'язку з цим навіть з'явився термін «енергозберігаючий електропривод, що регулюється». За рахунок переходу від неекономічного дросельного регулювання подачі води в системах тепlopостачання, до регулювання за допомогою електроприводів із змінною частотою обертання, вдається досягти зниження втрат води та електроенергії та підвищити енергоефективність виробництва. Були проведені дослідження навантаження електроприводів насосних та тягодутьєвих агрегатів у реальних умовах експлуатації. Виділимо фактори, що відповідають за оптимальні енергетичні показники приводу та правильний його вибір за потужністю: - при роботі асинхронних машин від перетворювачів частоти їх ККД знижується на 2-3 відсотки, а коефіцієнт потужності $\cos\varphi$ до 5%. Для того, щоб поліпшити електромагнітну сумісність перетворювача частоти (ПЧ) з мережею, застосовують ряд перспективних рішень. Наприклад, застосування фільтра на вході некерованого випрямляча. Це дозволяє поліпшити склад напруги живлення, коефіцієнт потужності системи і гармонійний склад струму, що споживається з мережі.

1.3 Способи регулювання координат асинхронних електроприводів та їх енергетична ефективність

Для регулювання основної координати (кутової швидкості) асинхронного двигуна (АД) необхідно змінювати його механічну характеристику, тобто. залежність його моменту M від кутової швидкості або, що одне і те саме, від ковзання s . [6-7] Відповідно до формули, отриманої із схеми заміщення АД, цього можна досягти, змінюючи такі основні величини: фазна напруга U_ϕ , активні та індуктивні опори обмоток ротора r'_2 , x'_2 а статора r_1 , x_1 , кутову швидкість обертання ω_0 магнітного поля статора та ковзання ротора s :

$$M = \frac{3U_{\phi}^2}{\omega_0} \cdot \frac{\frac{r_2''}{s}}{\left(r_1 + \frac{r_2'}{s}\right)^2 + (x_1 + x_2')^2}$$

де, x_1 - індуктивний опір розсіювання фази статора обмотки;

x_2' – індуктивний опір розсіювання фази обмотки ротора, наведений до ланцюга статора;

r_2' – активний опір обмотки ротора, наведений до статора.

Для аналізу енергоефективності способів регулювання кутової швидкості АД необхідно розглянути втрати, що виникають у ньому. В асинхронній машині розрізняють електричні втрати у статорі та роторі, магнітні втрати в сталі, механічні втрати через тертя у підшипниках та втрати на вентиляцію. Інші втрати роблять роботу машини значно менший вплив.

Електричні втрати визначаються квадратом струму, що проходить через обмотками, який, у свою чергу, визначається навантаженням двигуна. Решта видів втрат, крім електричних, змінюються менш істотно. Необхідно розглянути, як змінюються електричні втрати АД при регулюванні кутової швидкості обертання ротора. Електричні втрати в статорі АД приблизно пропорційні електричним втратам у роторі, тому достатньо розглянути втрати в роторі і зробити висновок про енергоефективність регулювання. Для цього запишемо електричні втрати в роторі та прирівняємо їх до різниці електромагнітної та механічної потужності на валу:

$$3I_2'^2 r_2' = M \omega_0 - M \omega = M (\omega_0 - \omega)$$

де, I_2' – струм обмотки ротора, наведений до статора.

Враховуючи, що

$$\omega = \omega_0(1 - s)$$

то отримаємо

$$3(I_2')^2 r_2' = Ms\omega_0$$

Наведений вираз визначає зв'язок між моментом асинхронної машини, електричними втратами в роторі та його ковзанням. З виразу видно, що електричні втрати в роторі, а відповідно, і в статорі будуть визначатися ковзанням ротора, тобто зі зростанням ковзання вони збільшуватимуться. [8]

З викладеного випливає, що способи регулювання кутової швидкості асинхронними двигунами поділяються на дві групи.

Перша група (параметричні способи) включає способи регулювання, при яких швидкість ідеального холостого ходу АД залишається постійною, а зміна кутової швидкості ротора відбувається за рахунок зміни його ковзання. У цієї групи методів постійні втрати у АД залишаються практично незмінними, тому що зростання втрат у сталі при збільшенні ковзання ротора компенсується зменшенням механічних втрат через зменшення швидкості, а змінні втрати зростають пропорційно до ковзання ротора. До таких способів регулювання відноситься введення додаткових активних і реактивних опорів у ланцюзі ротора і статора, регулювання напруги статора - як плавно і східчасто, так і імпульсними методами.

Друга група (частотні способи) охоплює способи, де зміна кутової швидкості ротора відбувається за рахунок зміни швидкості ідеального холостого ходу при незмінному ковзанні ротора. При незмінному ковзанні і постійному навантаженні змінні втрати в статорі і роторі АД для різних швидкостей також незмінні, постійні втрати зменшуються при частоті напруги статора нижче номінального значення і зростають при частоті вище номінального. До таких способів відносяться частотне регулювання та регулювання зміною числа пар полюсів статора обмотки. [9]

Частотні способи регулювання швидкості АД є найбільш енергоефективними, тому що змінні втрати в обмотках статора та ротора при зміні кутової швидкості ротора АД залишаються незмінними, не збільшуючись, як у параметричних способах. Використання регульованого електроприводу у багатьох технологічних процесах розглядається як основний напрямок розвитку, оскільки при цьому суттєво підвищується якість та

знижується енергоємність технологічних процесів та економиться до 30 % електроенергії. Крім того, у взаємопов'язаних частотнорегульованих асинхронних електроприводах (ЧРАЕП) можливе використання рекуперації електричної енергії від АД, що працює в генераторному режимі, до АД, що працює в руховому режимі. Таким чином, висока енергоефективність частотного способу регулювання швидкості АД, підвищення якості та зниження енергоємності технологічних процесів та можливість використання рекуперації електричної енергії у взаємозалежному ЧРАЕП визначають у сукупності перспективи його розвитку.

Взаємопов'язані частотно-регульовані асинхронні електроприводи (ЧРАЕП) можуть використовуватися в складних виробничих механізмах, де двигуни кінематично пов'язані з робочими валами виробничого механізму, що працює на загальне навантаження при різних потужностях і (або) частотах обертання на робочих валах, наприклад у вальцьових, шнекових та лопатевих змішувачах сипучих матеріалів, стендах обкатки та випробуваннях механічних передач, ліфтах та ін.

Частотний спосіб керування асинхронними електродвигунами ґрунтується за допомогою двох методів:[10]

- скалярний (вольт-частотний) відповідно до функціональної характеристики, що зв'язує напругу та частоту статора електродвигуна ($U/f = \text{const}$ – лінійний закон управління, $U/f^2 = \text{const}$ – квадратичний закон управління);

- Векторний

Сучасні частотно-регульовані асинхронні електроприводи використовують блочно-модульні принципи комплектування та реалізуються за структурами скалярного та векторного частотного керування. Вибір структури реалізації та закону скалярного управління частотнорегульованого асинхронного електроприводу для конкретного виробничого механізму визначається вимогами до статичних (в першу чергу до діапазону регулювання швидкості) та динамічних характеристик електроприводу [3].

Щоб освоїти спосіб частотного керування асинхронним двигуном, а саме його кутовою швидкістю, за допомогою регулювання частоти напруги, що підводиться, необхідно розглянути формулу залежності синхронної частоти обертання двигуна від частоти підводиться напруги і числа пар полюсів двигуна

$$\omega_0 = \frac{2\pi f l 1}{p_n}$$

З формули можна бачити, що швидкість обертання електромагнітного поля статора прямо пропорційна частоті напруги живлення.

За цим принципом можлива побудова широко регульованих електроприводів із жорсткими механічними характеристиками. Важливою перевагою частотного керування асинхронним двигуном є непогані енергетичні показники. Це тим, що двигун із частотним керуванням працює при малих ковзаннях, що зумовлює високий ККД і малі втрати у всьому діапазоні регулювання швидкості. Однак при зміні частоти виникає необхідність одночасного регулювання напруги, що підводиться до статора. Зі зміною частоти напруги живлення змінюється і величина магнітного потоку двигуна Φ_1 , тому одночасно з зміною частоти напруги живлення треба регулювати і його амплітуду.

$$\Phi_1 = \frac{E_1}{k f_1} \approx \frac{U_1}{k f_1}$$

Необхідність зменшення напруги при зменшенні частоти напруги живлення виникає через те, що зі зменшенням опору обмоток двигуна, струм намагнічування зростає. Це призводить до того, що магнітопровід двигуна насичується, що веде до перегріву двигуна. При частотному керуванні двигуном необхідно слідкувати, щоб ковзання двигуна було мінімальним [11].

Даний метод добре підходить тоді, коли за однакового значення частоти (і нижня межа регулювання частоти не нижче 5...10 Гц при незалежному від

частоти моменті), а залежність моменту навантаження двигуна відома, то навантаження практично не змінюється (рисунок 1.4).

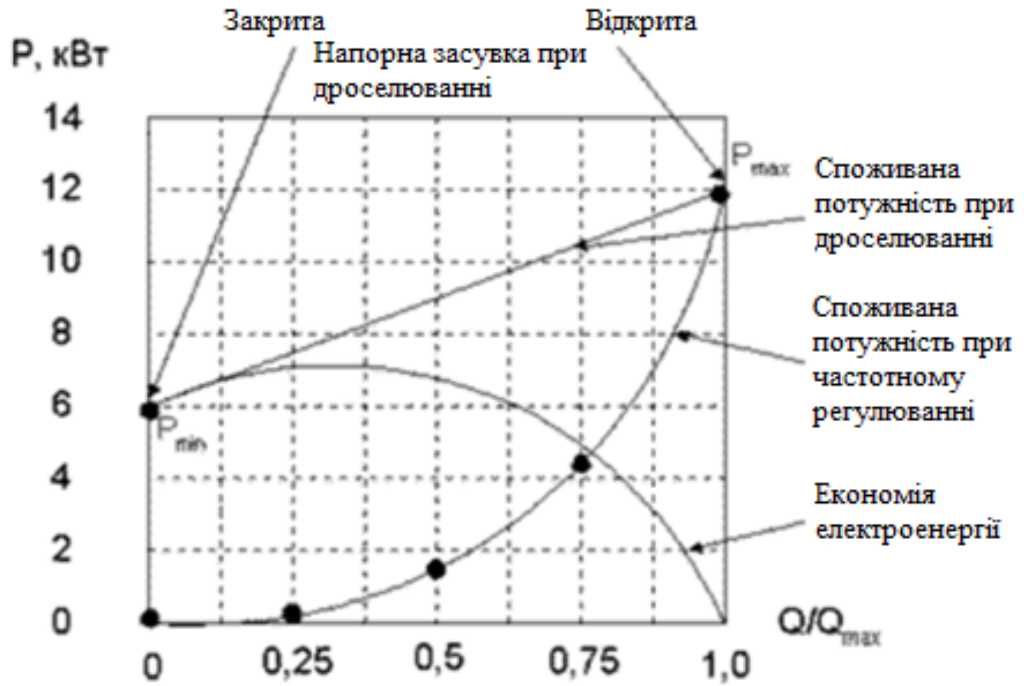


Рисунок 1.3 - Перспективність частотного регулювання

2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

2.1 Вибір насоса системи тепlopостачання

Відцентрові насоси – найпоширеніші гідравлічні машини, що застосовуються для водопостачання, водовідведення та перекачування різних рідин не тільки в побуті, а й у промисловості, будівництві, теплоенергетиці, автомобільній та авіаційній техніці тощо. Пристрій відцентрового насоса наведено малюнку 2.1.

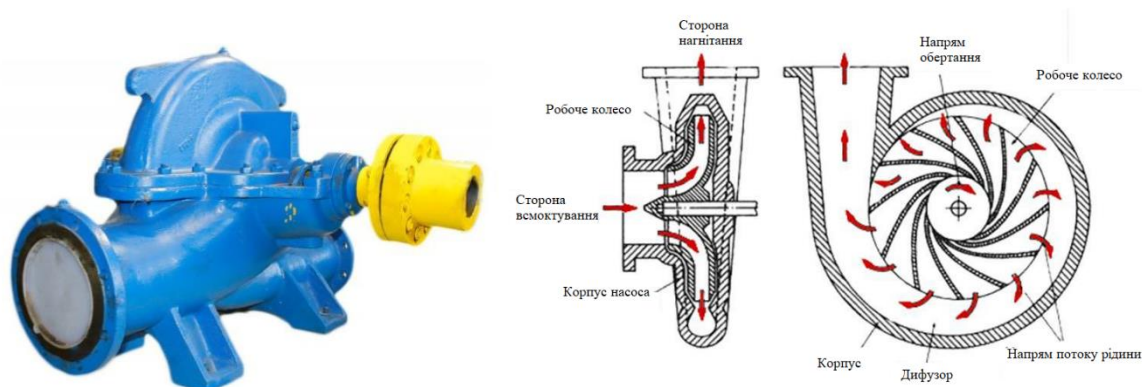


Рисунок 2.1. – Насос Д200-3 та схема його будови

Відцентрові насоси двостороннього типу Д мають призначення перекачувати воду, або інші рідини, які мають подібні до води значення в'язкості до $36 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ та хімічну активність, з діапазоном температур від 1 до $85 \text{ }^\circ\text{C}$, з вмістом твердих включень по масі не більше 0,05%, розміром не більше 0,2 мм та мікротвердістю не більше 6,5 ГПа. (650 кгс/мм²).[12]

Умовне позначення відцентрового насоса Д 200-36, де:

- Д – відцентровий насос двостороннього типу
- 200 – подача Q, м³/год;
- 36 – напір H, м.

Характеристики насоса Д200-36 при частоті обертання валу 1450 об/хв представлені рисунку 2.2.

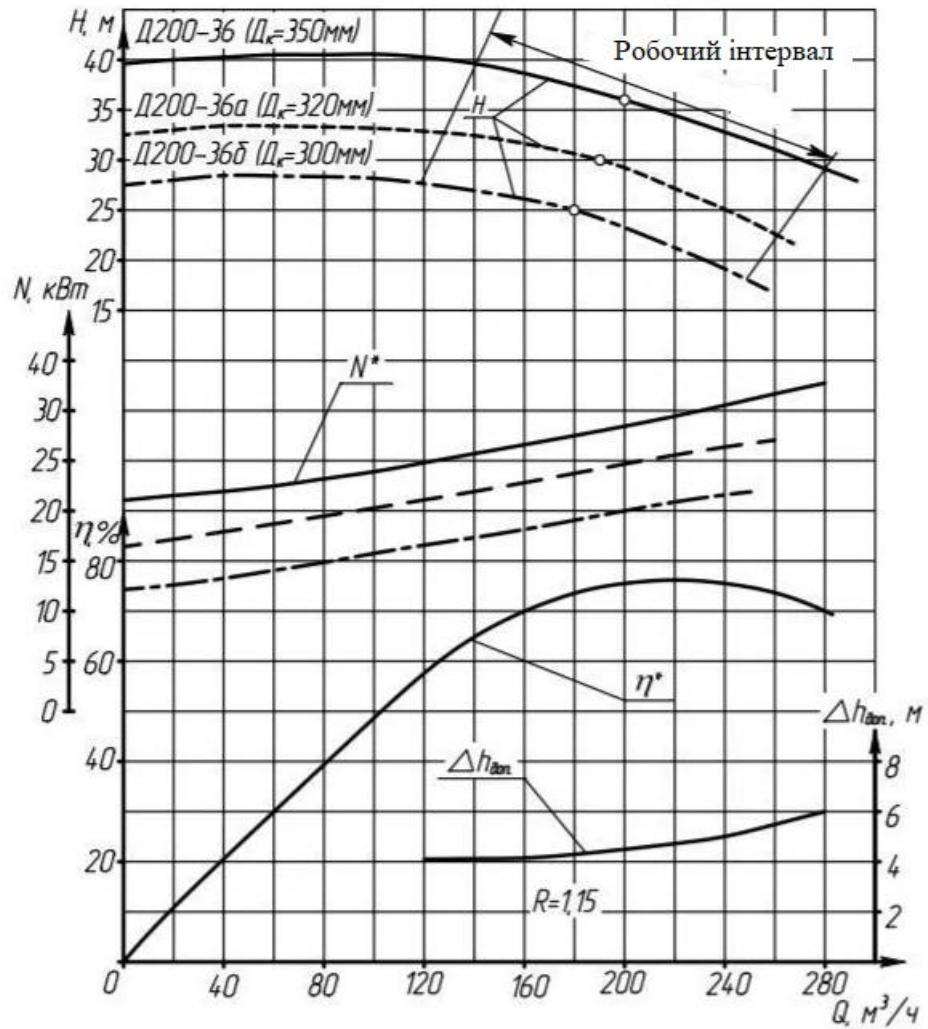


Рисунок 2.2 – Характеристики насоса Д200-36.

2.2 Вибір приводного електродвигуна

Вибір приводного двигуна здійснюється відповідно до формули:

$$P_0 = K_3 \frac{g \cdot Q \cdot H}{\eta_n \cdot 3600};$$

де, $K_3 = 1,1$ – коефіцієнт запасу;

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

$Q = 200 \text{ м}^3/\text{год}$ - розхід системи

$H = 36 \text{ м}$ – необхідний напір

$\eta_n = 0,76$ – коефіцієнт корисної дії.

Відповідно до даних значень проводимо розрахунок:

$$P_{\partial} = 1.1 \frac{9.81 \cdot 200 \cdot 36}{0.76 \cdot 3600} = 28.4 \text{ кВт};$$

Виходячи з отриманого результату, вибираємо асинхронний двигун серії ВА 180 М4 потужністю 30 кВт. Розшифровка позначення ВА 180 М4:

ВА – асинхронний вибухозахищений двигун;

180 - габарит двигуна (відстань від осі обертання до площини кріплення дорівнює 180 мм);

М - настановний розмір по довжині станини;

4 – кількість полюсів двигунів із синхронною частотою 1500 об/хв.

Зображення двигуна серії ВА 180 М4 представлено на рисунку 2.3.



Рисунок 2.3 – Асинхронний двигун серії ВА 180 М4.

Параметри цього двигуна представлені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1. Параметри двигуна ВА 180 М4.

Параметр	Значення
Номінальна швидкість обертання ротора, об/хв	1460
Номінальна потужність P_H , кВт	30
Вхідна напруга U , В	380
Коефіцієнт потужності $\cos \varphi$	0,85
Номінальний струм I_{1H}	59,3
ККД, %	90,5
Кратність пускового моменту $M_{п}/M_H$	1,7
Кратність максимального моменту M_{\max}/M_H	2,7
Кратність пускового струму $I_{п}/I_H$	7
Динамічний момент інерції ротора, кг·м ²	0,2
Маса, кг	234
Кліматичне виконання	У3

2.3 Розрахунок параметрів електродвигуна

Розрахунок синхронної кутової частоти обертання:

$$\omega_0 = \frac{\pi \cdot n_0}{30} = \frac{\pi \cdot 1500}{30} = 157.1 \text{ рад/с}$$

Розрахунок номінальної кутової частоти обертання:

$$\omega_{\text{дв.ном}} = \frac{\pi \cdot n_{\text{дв.ном.}}}{30} = \frac{\pi \cdot 1460}{30} = 152,9 \text{ рад/с.}$$

Розрахунок номінального ковзання:

$$s_H = \frac{\omega_0 - \omega_{\text{дв.ном.}}}{\omega_0} \cdot 100\% = \frac{157 - 153}{157} \cdot 100\% = 2,7\%.$$

Розрахунок номінального моменту:

$$M_{\text{дв.ном}} = \frac{P_{\text{дв.ном}}}{\omega_{\text{дв.ном}}} = \frac{30000}{152,9} = 196,22 \text{ Н·м.}$$

Номінальна фазна напруга:

$$U_{1\phi n} = \frac{U_{1лн}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220 \text{ В.}$$

Номінальний струм статора при з'єднанні обмоток за схемою «зірка»:

$$I_{1\phi n} = I_{1лн} = I_{1н} = \frac{P_{\text{дв.ном}}}{3 \cdot U_{1\phi n} \cdot \cos \varphi_n \cdot \eta_n} = \frac{30000}{3 \cdot 220 \cdot 0,85 \cdot 0,92} = 59,09 \text{ А.}$$

2.4 Розрахунок параметрів схеми заміщення асинхронного електродвигуна

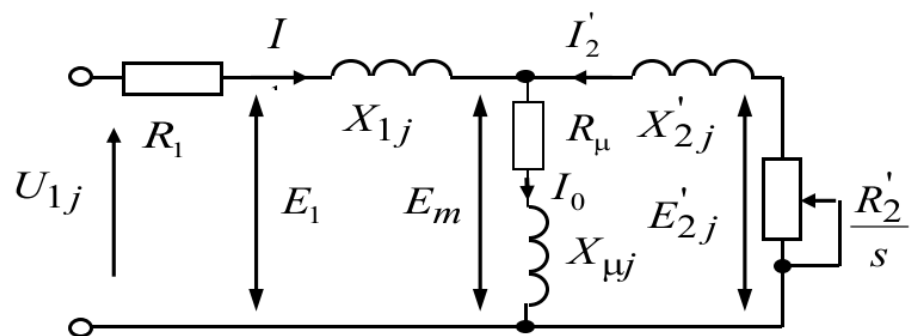


Рисунок 2.4 – Т-подібна схема заміщення АТ.

Проводимо розрахунок струму холостого ходу:

$$I_0 = \sqrt{\frac{L_{11}^2 - \left(p_{\text{жс}} \cdot I_{1н} \cdot \frac{(1-s_n)}{1-p_{\text{жс}} \cdot s_n} \right)^2}{1 - \left(p_{\text{жс}} \cdot \frac{(1-s_n)}{1-p_{\text{жс}} \cdot s_n} \right)^2}} =$$

$$= \sqrt{\frac{50,69^2 - \left(0,86 \cdot 59,09 \cdot \frac{(1-0,027)}{1-0,86 \cdot 0,027} \right)^2}{1 - \left(0,86 \cdot \frac{(1-0,027)}{1-0,86 \cdot 0,027} \right)^2}} = 16,93 \text{ А.}$$

де. $I_{11} = \frac{p_{\text{жс}} \cdot P_n}{3 \cdot U_{1\phi} \cdot \cos \varphi_{p_{\text{жс}}} \cdot \eta_{p_{\text{жс}}}} = \frac{0,86 \cdot 30000}{3 \cdot 220 \cdot 0,841 \cdot 0,92} = 51,37 \text{ А,}$ – струм фази

статора при неповному завантаженні;

$$p_{\text{жс}} = \frac{P}{P_n} = \frac{25,81}{30} = 0,86 \text{ – коефіцієнт завантаженості двигуна;}$$

$\eta_{рж} = \eta_n = 0,905$ – прийнятий ККД при неповному завантаженні;

Коефіцієнт потужності при неповному завантаженні:

$$\cos \varphi_{рж} = 0,989 \cdot 0,85 = 0,841.$$

Для подальшого розрахунку необхідно розрахувати коефіцієнти:

$$C_1 = 1 + \frac{I_0}{2 \cdot k_i \cdot I_{1н}} = 1 + \frac{16,93}{2 \cdot 7 \cdot 59,09} = 1,02;$$

$$A_1 = \frac{m \cdot U_{1\phi}^2 \cdot (1 - s_H)}{2 \cdot C_1 \cdot k_{макс} \cdot P_n} = \frac{3 \cdot 220^2 \cdot (1 - 0,027)}{2 \cdot 1,02 \cdot 2,7 \cdot 30000} = 0,855.$$

Визначаємо критичне ковзання:

$$s_k = s_n \cdot \frac{k_{макс} \cdot \sqrt{k_{макс}^2 - (1 - 2 \cdot s_n \cdot \beta \cdot (k_{макс} - 1))}}{1 - 2 \cdot s_n \cdot \beta \cdot (k_{макс} - 1)} =$$
$$= 0,027 \cdot \frac{2,7 \cdot \sqrt{2,7^2 - (1 - 2 \cdot 0,027 \cdot 2 \cdot (2,7 - 1))}}{1 - 2 \cdot 0,027 \cdot 2 \cdot (2,7 - 1)} = 0,171,$$

де β - коефіцієнт, значення якого лежить в діапазоні 0,6 - 2,5.

Приймаємо $\beta = 2$.

Визначаємо активний опір обмотки ротора, приведений до статора обмотування:

$$R'_2 = \frac{A_1}{\left(\beta + \frac{1}{s_k}\right) \cdot C_1} = \frac{0,855}{\left(2 + \frac{1}{0,171}\right) \cdot 1,02} = 0,107 \text{ Ом.}$$

Розраховуємо активний опір обмотки статора:

$$R_1 = C_1 \cdot R'_2 \cdot \beta = 1,02 \cdot 0,107 \cdot 2 = 0,218 \text{ Ом.}$$

Знаходимо індуктивний опір короткого замикання

$$X_{кн} = \gamma \cdot C_1 \cdot R'_2 = 5,502 \cdot 1,02 \cdot 0,107 = 0,599 \text{ Ом.}$$

де параметр γ має таке значення:

$$\gamma = \sqrt{\frac{1}{s_k^2} - \beta^2} = \sqrt{\frac{1}{0,171^2} - 2^2} = 5,502.$$

Для виділення значень індуктивного опору розсіювання обмотки ротора приведеної до статорної та індуктивного опору розсіювання обмотки статора з індуктивного опору розсіювання застосовуємо наступні вирази:

Розрахунок індуктивного опору розсіювання роторної обмотки, наведений до статорної:

$$X'_{\sigma 2} = \frac{0,58 \cdot X_{\text{кн}}}{C_1} = \frac{0,58 \cdot 0,599}{1,02} = 0,34 \text{ Ом.}$$

Розрахунок індуктивного опір розсіювання статорної обмотки:

$$X_{\sigma 1} = 0,42 \cdot X_{\text{кн}} = 0,42 \cdot 0,599 = 0,252 \text{ Ом.}$$

Знаходимо, наведену потоком повітряного зазору в обмотці статора в номінальному режимі ЕРС гілки намагнічування:

$$\begin{aligned} E_m &= \sqrt{\left(U_{1\phi} \cdot \cos \varphi_n - R_1 \cdot I_{1n} \right)^2 + \left(U_{1\phi} \cdot \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_n} - X_{\sigma 1} \cdot I_{1n} \right)^2} = \\ &= \sqrt{\left(220 \cdot 0,85 - 0,218 \cdot 58,09 \right)^2 + \left(220 \cdot \sqrt{1 - 0,85^2} - 0,252 \cdot 59,09 \right)^2} = \\ &= 201,32 \text{ В.} \end{aligned}$$

Отже, індуктивний опір намагнічування має значення:

$$X_{\text{мн}} = \frac{E_m}{I_0} = \frac{201,32}{16,93} = 11,892 \text{ Ом.}$$

За наявними значеннями C_1 , R'_2 та $X_{\text{кн}}$ визначаємо критичне ковзання:

$$s_{k1} = \frac{C_1 \cdot R'_2}{\sqrt{R_1^2 + X_{\text{кн}}^2}} = \frac{1,02 \cdot 0,107}{\sqrt{0,218^2 + 0,599^2}} = 0,171.$$

Індуктивність розсіювання статорної обмотки:

$$L_{\sigma 1} = \frac{X_{\sigma 1}}{2\pi \cdot f_{1n}} = \frac{0,252}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 8,01 \cdot 10^{-4} \text{ Гн.}$$

Індуктивність розсіювання роторної обмотки, наведеної до статорної:

$$L'_{\sigma 2} = \frac{X'_{\sigma 2}}{2\pi \cdot f_{1n}} = \frac{0,34}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 1,08 \cdot 10^{-3} \text{ Гн.}$$

Індуктивність гілки намагнічування:

$$L_{\mu n} = \frac{X_{\mu n}}{2\pi \cdot f_{1n}} = \frac{11,892}{2 \cdot 3,01 \cdot 50} = 0,038 \text{ Гн.}$$

Розраховані параметри схеми заміщення зведені таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 - Параметри схеми заміщення електродвигуна.

$R_1,$	$X_{\sigma 1},$	$L_{\sigma 1},$	$R'_2,$	$X'_{\sigma 2},$	$L'_{\sigma 2},$	$X_{\mu n},$	$L_{\mu n},$	$X_{кн},$
Ом	Ом	Гн	Ом	Ом	Гн	Ом	Гн	Ом
0,218	0,252	$8 \cdot 10^{-4}$	0,107	0,34	$1,1 \cdot 10^{-3}$	11,892	0,038	0,599

2.5 Побудова природних електромеханічних та механічних характеристик

Вираз природної електромеханічної характеристики $I_1(s)$ при частоті $f_{1n} = 50$ Гц матиме такий вигляд:

$$I_1(s) = \sqrt{I_0^2 + I_2'^2(s) + 2 \cdot I_0 \cdot I_2'(s) \cdot \sin \varphi_2(s)} \quad (2.1)$$

де,

$$I_2'(s) = \frac{U_{1\phi n}}{\sqrt{X_{кн}^2 + \left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R'_2}{s \cdot X_{\mu n}}\right)^2}} \quad (2.2)$$

$$\sin \varphi_2(s) = \frac{X_{кн}}{\sqrt{X_{кн}^2 + \left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2}} \quad (2.3)$$

Побудована електромеханічна характеристика $\omega(I_1)$ наведена на рисунку 2.5.

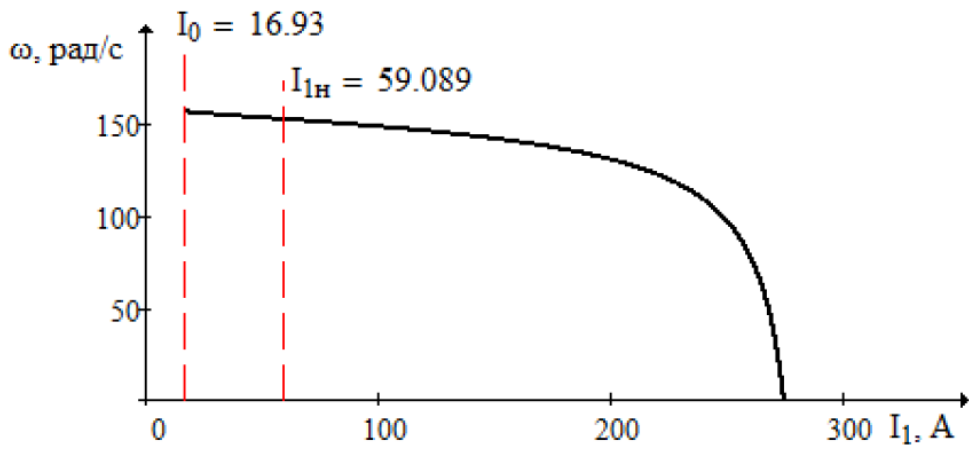


Рисунок 2.5 – Природна електромеханічна характеристика $\omega(I_1)$

Вираз природної механічної характеристики $M(s)$ при частоті $f_{1н} = 50$ Гц буде мати вигляд:

$$M(s) = \frac{3 \cdot U_{1н\phi}^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot s \cdot \left(X_{кн}^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_{мн}} \right)^2 \right)} \quad (2.4)$$

За результатами розрахунку будувється природна механічна характеристика $\omega(M)$ (рисунок 2.6), де $\omega = \omega_0 \cdot (1 - s)$.

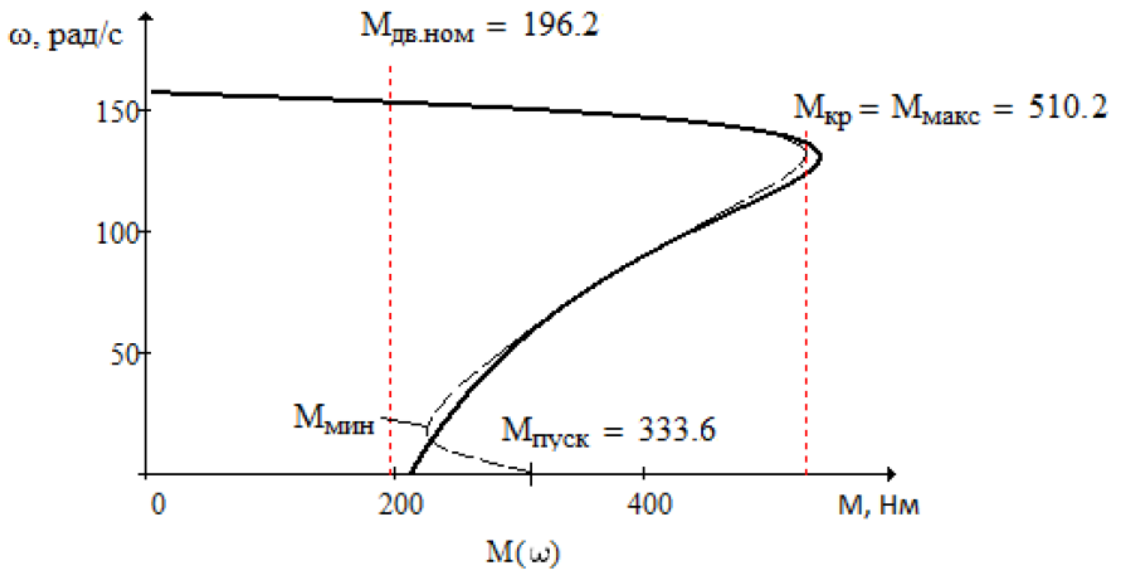


Рисунок 2.6 – Природна механічна характеристика електродвигуна $\omega(M)$.

Дані методи дозволяють побудувати електромеханічну характеристику, тоді як механічна характеристика виходить неточною. Це пов'язано з тим, що приймається ряд припущень і не враховуються багато факторів: магнітні та механічні втрати в двигуні становлять 2 % від його номінальної потужності, активні опори обмоток статорної і роторної приймаються незалежними від режиму роботи двигуна, ефекти витіснення, які впливають на характеристику асинхронного двигуна не враховуються.

Також, необхідно зазначити, що розбіжність отриманих в ході розрахунків даних з паспортними, і побудованих за ними графіків (суцільний і пунктирний графік відповідно) викликано тим, що паспортні дані наведені для двигуна з насиченою магнітною системою, у той час як при даних розрахунках насичення не враховувалося.

2.6 Вибір системи управління та перетворювача частоти

Вибір системи управління здійснюється на основі аналізу та порівнянні технічних даних, а саме: діапазону регулювання, способи управління, стратегія (рівня зносостійкості), діапазону можливих потужностей електродвигуна, показників енергетики і динаміки, а також додаткові дані, що визначають умови експлуатації електроприводів. Економічна оцінка системою управління повинна базуватися на принципі мінімальних затрат, пов'язаних з початковими витратами, експлуатацією на поточні видатками на ремонт, а також втратами на електроенергію. Вибирається система, що має найкращі економічні показники. Якщо економічні показники порівнювальних системами близькі, то враховується додаткова оцінка за макрогабаритними показниками і умовами експлуатації. В даний час найбільше розповсюдження отримали системи електроприводів змінного струму, оскільки вони дешевші і надійніші електроприводів постійного струму [6].

Вибираємо скалярне керування насосом, так як воно має наступні переваги:

- Економічний ефект від застосування перетворювача частоти: економія електричної енергії завдяки оптимізації роботи на 30% -60%, зниження витрат води до 5%.
- Зменшення напору при стабільній подачі.
- Зменшення механічної, а, відтак, і електричної потужності, що потрібна з мережі, внаслідок зменшення швидкості обертання
- Виключення при регулюванні гідравлічних оскільки відсутні дросельні елементи.
- Зменшення реактивної потужності.

Застосування регульованого електроприводу забезпечує енергозбереження та дозволяє отримати нові якості систем та об'єктів. Особливий економічний ефект від використання перетворювачів частоти дає застосування частотного регулювання на об'єктах, що забезпечують транспортування рідин. До цих пір найпоширенішим способом регулювання продуктивності таких об'єктів було використання засувки або регулюючих клапанів, але сьогодні доступним стає частотне регулювання асинхронного двигуна, що приводить в рух, наприклад, робоче колесо насосного агрегату або вентилятора.

Для реалізації проекту вибираємо перетворювач частоти марки Delta Electronics VFD-CP2000 з наступними параметрами, які наведені в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Параметри перетворювача частоти

Тип	Параметри мережі		Вихідна напруга U_n , В	Вихідна частота f_n Гц	Вихідний струм		Рекомендована потужність двигуна P_2 . кВт
	$U_{1л}$, В	f_c , Гц			I_n , А	$I_{макс}$, А	
VFD-CP2000	3x380	50	380	0-400	60	67.2	30



Рисунок 2.7 – Перетворювач частоти марки Delta Electronics VFD-CP2000

При цьому мають виконувати такі умови:

$$I_n \geq I_{1n}$$

$60\text{A} \geq 59\text{A}$ – умова виконується.

$$U_n \geq U_{н.дв.}$$

$380\text{В} \geq 380\text{В}$ – умова виконується.

2.7 Розрахунок сімейства механічних та електромеханічних характеристик при зміні частоти

Так як у приводу відцентрового насоса навантаження має нелінійний характер, то приймаємо закон регулювання $U/f^3 = const$.

Розрахунки будуть проводитись для наступних частот:

$$f_{1n} = 50\text{ Гц}; f_{11} = 40\text{ Гц}; f_{12} = 30\text{ Гц}; f_{13} = 25\text{ Гц};$$

Проводимо розрахунок коефіцієнта пропорційності для вищезазначеного закону регулювання:

$$K = \frac{U_{1n}}{f_{1n}^3} = \frac{220}{50^3} = 0,00176$$

Розрахунок відповідних напруг, для заданих частот регулювання:

$$U_{11} = K \cdot f_{11}^3 = 0,00176 \cdot 40^3 = 112,64\text{ В};$$

$$U_{12} = K \cdot f_{12}^3 = 0,00176 \cdot 30^3 = 47,52\text{ В};$$

$$U_{13} = K \cdot f_{13}^3 = 0,00176 \cdot 25^3 = 27,5\text{ В}.$$

Визначаємо відносні частоти напруги живлення:

$$f_{11}^* = \frac{f_{11}}{f_{1H}} = \frac{40}{50} = 0,8;$$

$$f_{12}^* = \frac{f_{12}}{f_{1H}} = \frac{30}{50} = 0,6;$$

$$f_{13}^* = \frac{f_{13}}{f_{1H}} = \frac{25}{50} = 0,5.$$

Синхронні швидкості обертання двигуна відповідні заданим частотам регулювання:

$$\omega_{011} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_{11}}{p} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 40}{2} = 125,7 \text{ рад/с};$$

$$\omega_{012} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_{12}}{p} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 30}{2} = 94,2 \text{ рад/с};$$

$$\omega_{013} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_{11}}{p} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 25}{2} = 78,5 \text{ рад/с}.$$

Побудова механічних характеристик асинхронного двигуна при змінних значеннях величини напруги та частоти будуються згідно з виразом:

$$M(s) = \frac{3 \cdot U_{1j}^2 \cdot R'_2}{\omega_{0j} \cdot s \cdot \left(X_{KH}^2 \cdot f_{1*}^2 + \left(R_1 + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R'_2}{s \cdot X_{MH} \cdot f_{1*}} \right)^2 \right)} \quad (2.5)$$

Електромеханічна характеристика асинхронного двигуна при змінних значеннях величини та частоти напруги живлення визначається за формулою:

$$I_1(s) = \sqrt{I_{0j}^2 + (I'_2(s))^2 + 2 \cdot I_{0j} \cdot I'_2(s) \cdot \sin \varphi_2(s)} \quad (2.6)$$

де,

$$I'_2(s) = \frac{U_{1\phi}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + X_{KH}^2 \cdot f_{1*}^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R'_2}{s \cdot X_{MH} \cdot f_{1*}} \right)^2}} \quad (2.7)$$

$$\sin \varphi_2(s) = \frac{X_{KH} \cdot f_{1*}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + X_{KH}^2 \cdot f_{1*}^2}} \quad (2.8)$$

Оскільки зі зміною частоти і напруги статора струму холостого ходу змінюється, його значення кожної із частот визначається згідно виразу:

$$I_{0j} = \frac{U_{ij}}{\sqrt{R_1^2 + (X_{\sigma 1} + X_{\mu n})^2 \cdot f_{1*}^2}} \quad (2.9)$$

Перерахунок ковзання s на кутову швидкість проводиться в відповідно до виразу:

$$\omega(s) = \omega_{0j} \cdot (1 - s) \quad (2.10)$$

Механічна характеристика відцентрового насоса визначається за виразом:

$$M_{прив}(\omega) = \Delta M_{мех} + \left(\frac{0,08 \cdot M_{дв.ном}}{\omega_{мех.прив}^3} \right) \cdot \omega^3 = 15,7 + \left(\frac{0,08 \cdot 196,22}{125,9^3} \right) \cdot \omega^3 = 20,92 \cdot \omega^3.$$

Механічні характеристики представлені рисунках 2.8 і 2.9, а електромеханічні – рисунку 2.10.

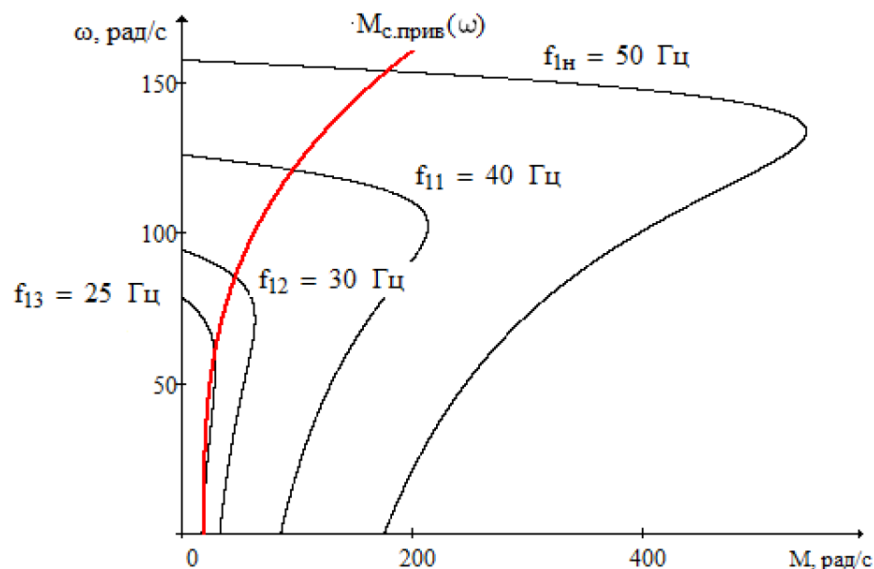


Рисунок 2.8 – Механічні характеристики двигуна ВА180М4 при вибраному законі регулювання $U/f^3 = const$ та механічна характеристика насоса.

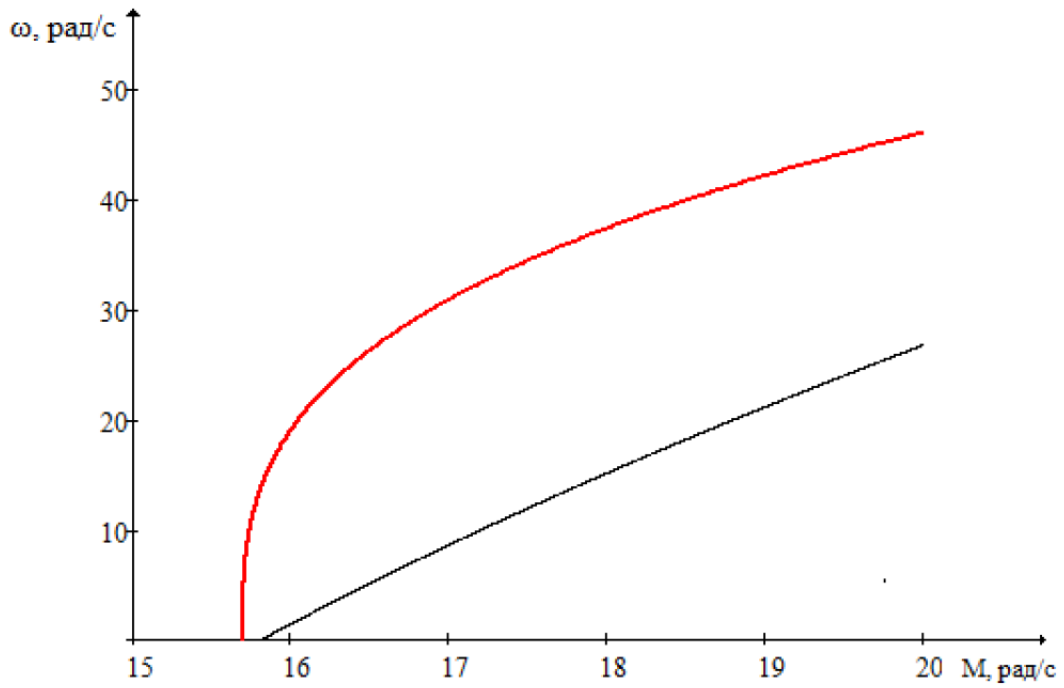


Рисунок 2.9 – Збільшене зображення механічної характеристики двигуна ВА180М4 при частоті = 25 Гц та механічної характеристики насоса.

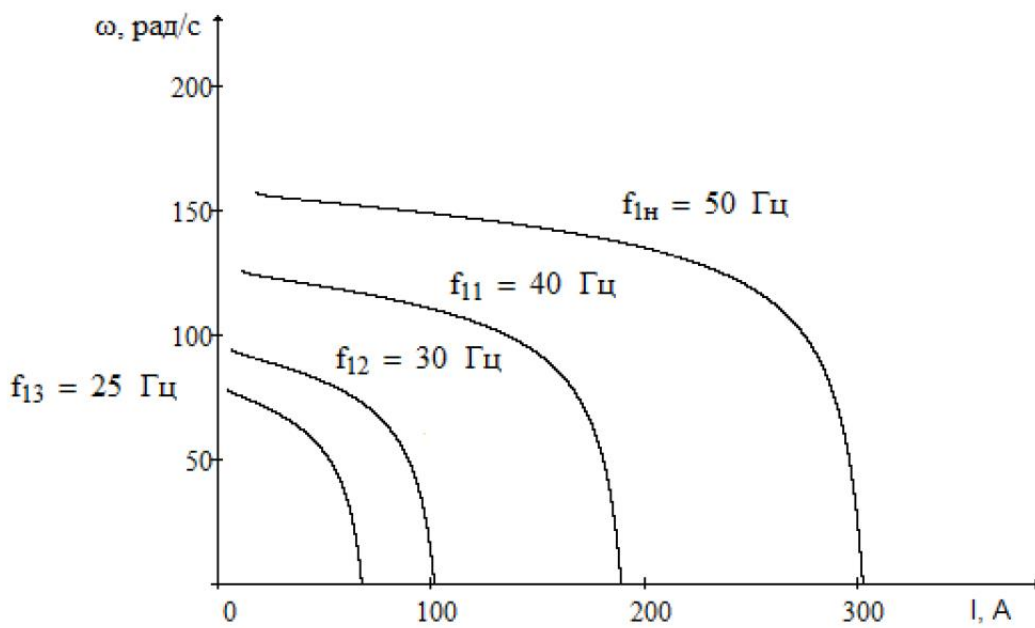


Рисунок 2.10 – Електромеханічні характеристики двигуна ВА180М4 при обраному законі регулювання $U/f^3 = const$.

3 РОЗРАХУНКОВИЙ РОЗДІЛ

3.1 Дослідження прямого пуск двигуна

Отримані значення підставляємо в імітаційну модель і, досліджуючи її у програмі Matlab, отримуємо графіки перехідних процесів моменту та швидкості електродвигуна при прямому пуску двигуна з навантаженням.

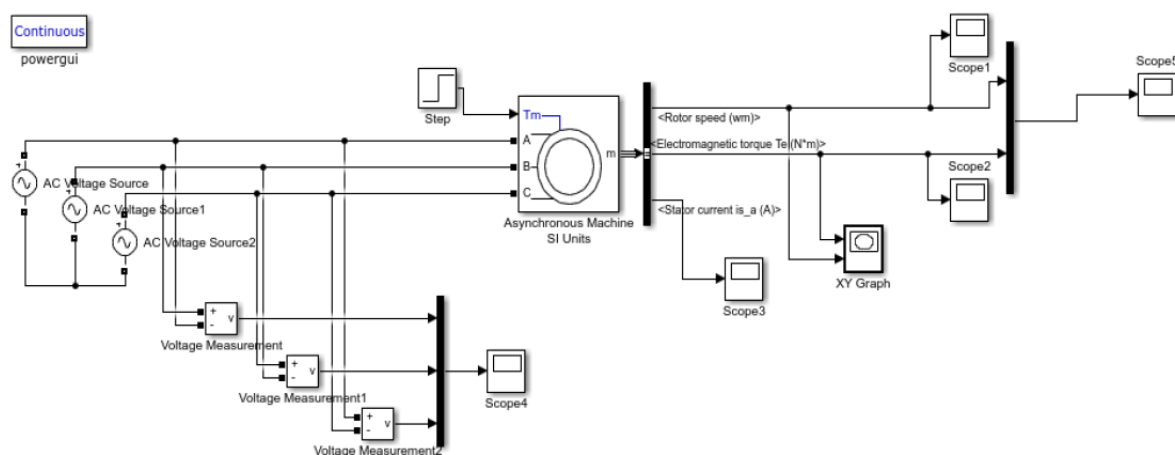


Рисунок 3.1 – Імітаційна модель прямого запуску двигуна.

Отримані результати відображені на рисунку 3.2 та 3.3.

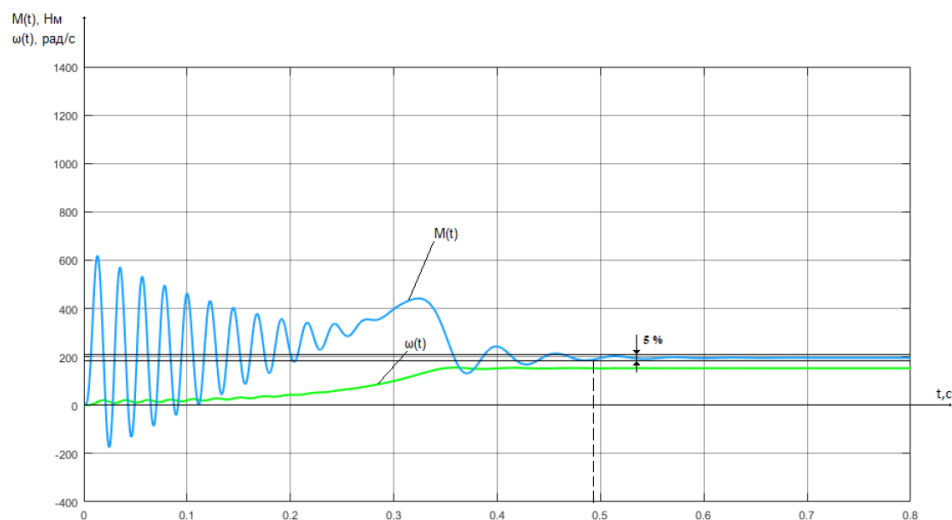


Рисунок 3.2 – Графік перехідного процесу моменту АД під час прямого пуску з навантаженням.

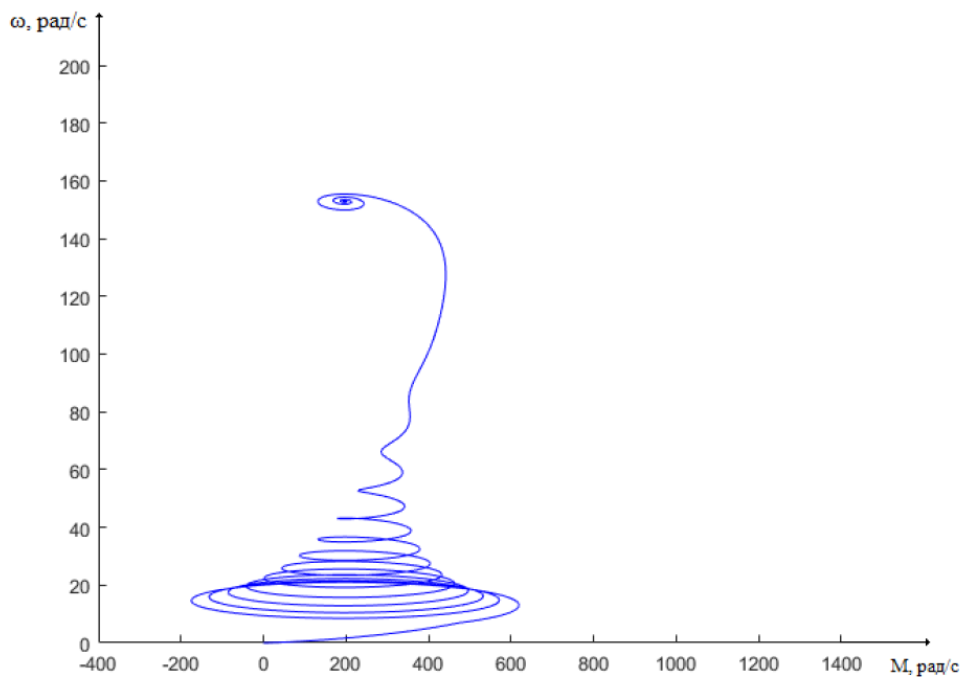


Рисунок 3.3 – Динамічна механічна характеристика при прямому пуску з навантаженням.

З отриманих характеристик, отриманих під час моделювання перехідних процесів при прямому пуску двигуна з номінальним навантаженням, спостерігаються значні коливання моменту (максимальне значення досягає понад 600 Нм, мінімальне – трохи менше 200 Нм), що свідчить про погану якість перехідних процесів. Час перехідного процесу становить 0,49 с.

З усього описаного приходимо висновку, що необхідно організувати плавний пуск з обмеженням коливань моменту із застосуванням лінійного задачника з s-подібною характеристикою.

3.2. Функціональна схема регульованого електроприводу

Під частотним управлінням розуміється управління електродвигуном змінного струму шляхом зміни амплітуди і частоти напруги живлення, що подається на електродвигун.

Для здійснення технологічного процесу не вимагається забезпечення високої кратності пускового та максимального моментів, але плавний пуск

необхідний. Як режим гальмування може використовуватися вибіг, у цьому випадку електродвигун відключається від мережі живлення і зупиняється за інерцією. Але тоді і гальмування в робочій зоні при переході електроприводу з більшої швидкості на меншу швидкість також повинно здійснюватися без перетворення механічної енергії мас, що обертаються, в електричну енергію. Даний спосіб гальмування обумовлює появу ударних струмів, яких на вимогу до електроприводу потрібно позбутися, тому виберемо спосіб гальмування - кероване електричне гальмування.

А як спосіб керування виберемо, більш дешевий, розімкнений скалярний з корекцією вольт-частотної характеристики спосіб регулювання швидкості привідного електродвигуна.

Даний спосіб керування дозволить плавно змінювати швидкість обертання робочого колеса насосного агрегату відповідно до технічних вимог, що пред'являються до електроприводу і підвищити пусковий момент привідного електродвигуна на малих швидкостях до необхідних значень.

Тоді може бути прийнятий один із двох законів частотного управління $U/f=const$, $U/f^2=const$. Квадратичний закон є більш складним, порівняно з лінійним, у реалізації, але за рахунок додаткового зниження напруги дозволяє зменшити електроенергію, що споживається з мережі.

Функціональна схема силової частини перетворювача частоти з проміжною ланкою постійного струму зображено на рисунку 3.4.

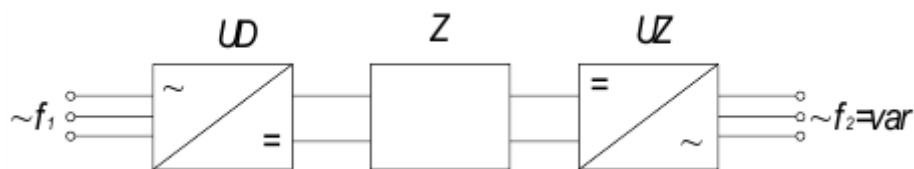


Рисунок 3.4. Функціональна схема силової частини перетворювача (ПЧ) частоти з проміжною ланкою постійного струму

У ПЧ з проміжною ланкою постійного струму відбувається дворазове перетворення напруги (енергії) мережі живлення: змінна напруга живлення випрямляється за допомогою керуючого випрямляча UD, згладжується фільтром Z і подається на інвертор UZ. Функції регулювання частоти вихідної напруги здійснює інвертор, а напруги випрямляч.

На виході ПЧ формується напруга змінного струму постійної або регульованої частоти, причому $U_{вих}$ і $f_{вих}$ можуть змінюватися за будь-яким законом, також, його відносна дешевизна порівняно з багатьма іншими ПЧ. Основний недолік – дворазове перетворення енергії та пов'язані з цим підвищені втрати та зменшення ККД.

На рисунку 3.5 зображено функціональну схему реалізації асинхронного частотно-регульованого електроприводу зі скалярним керуванням без датчика швидкості. Функціональна схема будується за модульним принципом. Модулі (плати) розширення містять у своєму складі аналогові та дискретні входи та виходи, а також інтерфейси зв'язку.[13]

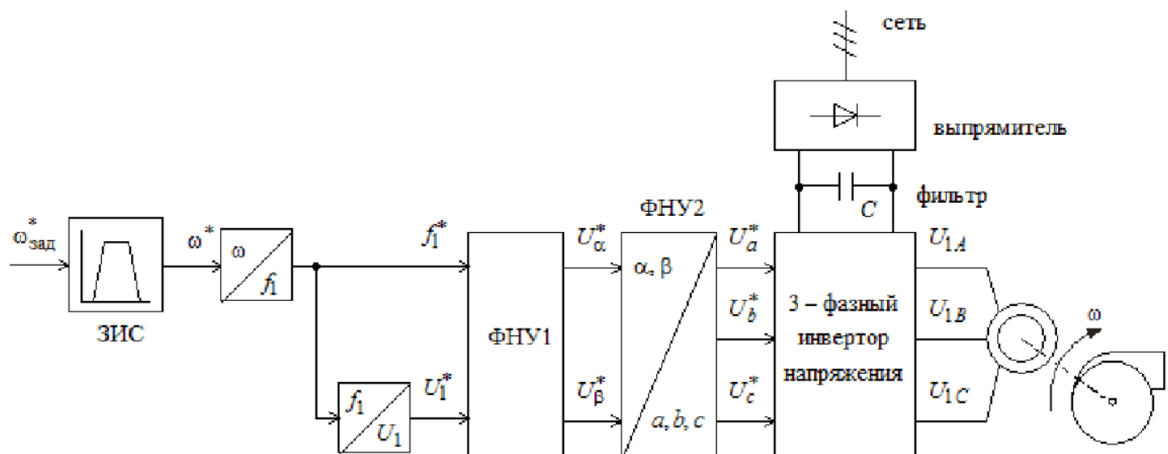


Рисунок 3.5 - Функціональна схема частотно-регульованого асинхронного електроприводу зі скалярним керуванням.

До основних функціональних елементів регульованого асинхронного електроприводу з частотним скалярним керуванням відносяться:

- перетворювач частоти;
- блок управління перетворювачем, що включає формувач 3-фазної системи керуючих напруг u_{1a} , u_{1b} і u_{1c} ,
- формувач ШІМ-сигналу та блок драйверів;
- формувач U_f -характеристики;
- датчики лінійного струму двигуна;
- блок розрахунку фактичного значення фазного струму двигуна;
- елемент порівняння допустимого максимального та фактичного значення діючого струму двигуна та регулятор обмеження струму;
- блок компенсації ковзання;
- блок корекції управління напруги інвертора до функцій значення напруги постійного струму U_d .

Надійна робота перетворювача частоти багато в чому визначається як надійністю ключів, що застосовуються, так і організацією правильного управління і захисту силових модулів. Ці функції забезпечуються драйверами. Драйвер є проміжним пристроєм, що узгоджує сигнал, в нашому випадку, між блоком управління перетворювачем і силовими ключами. Драйвери призначені для формування сигналу управління відповідно до команд блоку управління перетворювачем.

Для підвищення моменту приводного двигуна на малих швидкостях обертання насосного агрегату у перетворювачі передбачено функцію підвищення початкового значення вихідної напруги (початкової напруги вольт-частотної характеристики) для цього застосовуються модулі U_d корекції. В результаті відбувається збільшення пускового моменту двигуна.

Обмеження струму двигуна за допомогою датчика та регулятора струму необхідно при короткочасних перевантаженнях приводного двигуна насосу. Це унеможливить аварійне відключення приводу засобами захисної апаратури. Для захисту перетворювача частоти і приводного електродвигуна від навантаження по струму, а насоса від навантаження на момент

використовується негативний зворотний зв'язок по струму, так звана струмове відсікання. Регулятор обмеження струму працює тільки тоді, коли струм статора перевищує максимально допустиме значення. На зменшення частоти та зменшення вихідної напруги ПЧ впливає вихідний сигнал регулятора. Якщо зменшувати напругу і частоту перетворювача одноразово, можна забезпечити сталість моменту двигуна і магнітного потоку, що є більш доцільно.

У пуско-гальмівних режимах роботи електроприводу насоса застосовують задачник інтенсивності для обмеження моменту двигуна, встановлюють його в каналі задання швидкості на вході електропривода.

Для електромеханічної системи настрювальними параметрами є: тип та параметри задачника, максимальний струм регулятора обмеження струму, значення мінімальної частоти ПЧ, закон регулювання U/f^2 та корекція вольт-частотної характеристики.

Імітаційна модель електричної частини силового каналу системи «перетворювач частоти – асинхронний двигун», змодельована в системі Matlab Simulink,[14] наведена на малюнку 3.6.

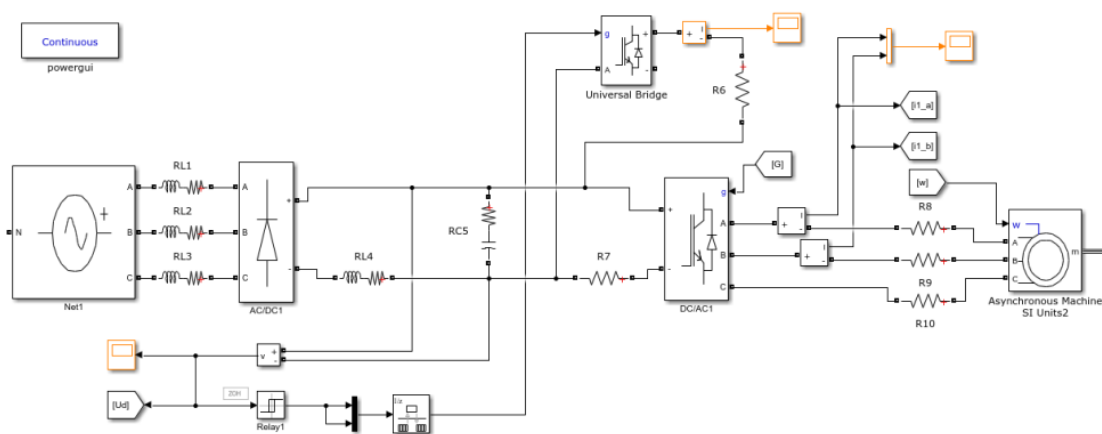


Рисунок 3.6 – Імітаційна модель електричної частини силового каналу системи «перетворювач частоти – асинхронний електродвигун»

Імітаційна модель блоку одномасової механічної системи з моментом навантаження реактивного характеру, яка застосовується для моделювання систем електроприводу, зображена на рисунку 3.5.

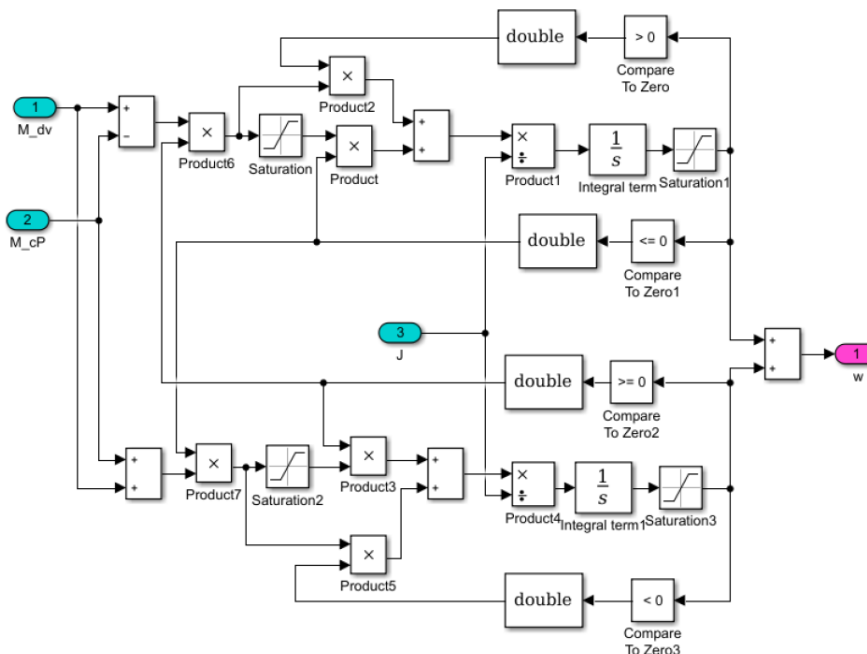


Рисунок 3.5 – Імітаційна модель блоку одномасової механічної системи з реактивним навантаженням.

На зображенні даної схеми прийнято позначення:

M_{dv} - електромагнітний момент двигуна, Н·м;

M_{cP} - приведений до валу двигуна статичний момент реактивного характеру, Н·м;

J – приведений до валу двигуна еквівалентний момент інерції мас, що рухаються, кг·м².

Параметри налаштування імітаційної моделі задачника інтенсивності з S-подібною характеристикою визначаються за виразами:

3.3. Імітаційна модель задачника інтенсивності з S-подібною характеристикою.

Параметри налаштування імітаційної моделі задачника інтенсивності з S-подібною характеристикою визначаються за виразами:

$$T_{i1} = t_1, c;$$

$$T_{i2} = t_1 + t_2, c;$$

$$k = 0,5 \cdot \frac{t_1}{t_1 + t_2}.$$

Тимчасова характеристика задатчика інтенсивності з S-подібною характеристикою представлена рисунку 3.6.

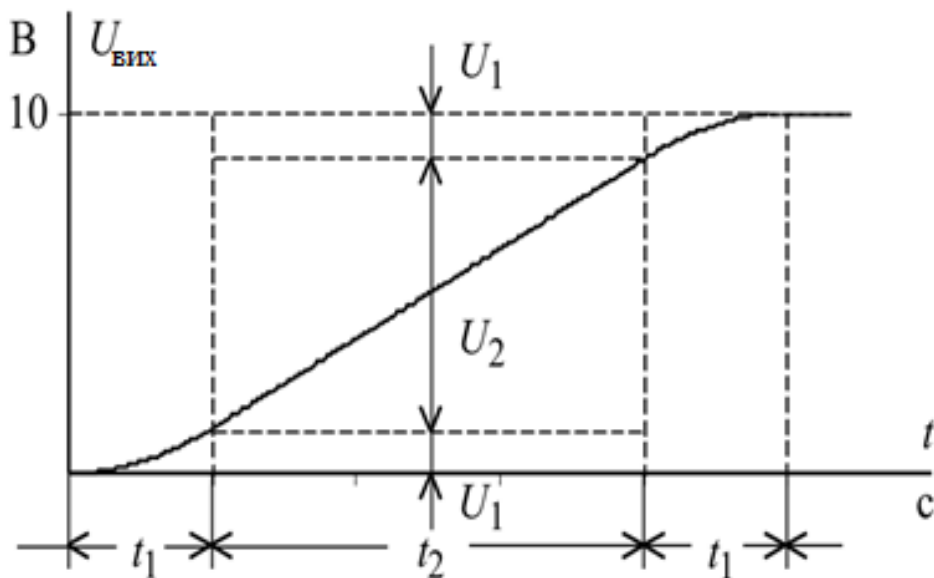


Рисунок 3.6 – Схема набору імітаційної моделі задачника інтенсивності з S-подібною вихідною характеристикою

Схема набору імітаційної моделі у системі Matlab Simulink задачника інтенсивності з S-подібною вихідною характеристикою відображена рисунку 3.7.

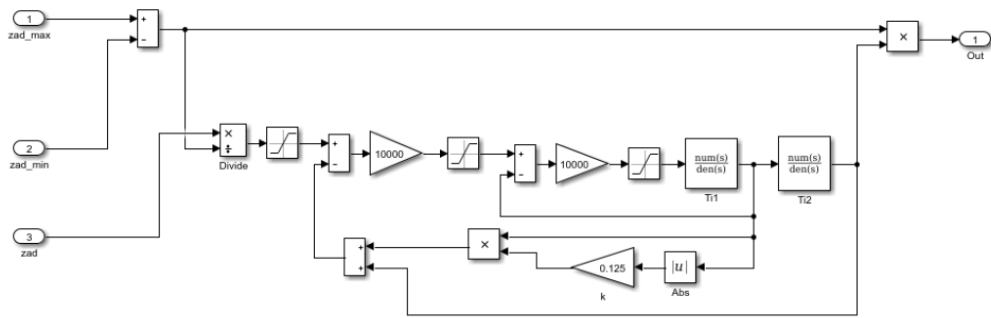


Рисунок 3.7 – Схема набору імітаційної моделі у системі Matlab Simulink задачника інтенсивності з S-подібною вихідною характеристикою.

Імітаційна модель системи управління із заданою програмою роботи представлена рисунку 3.8.

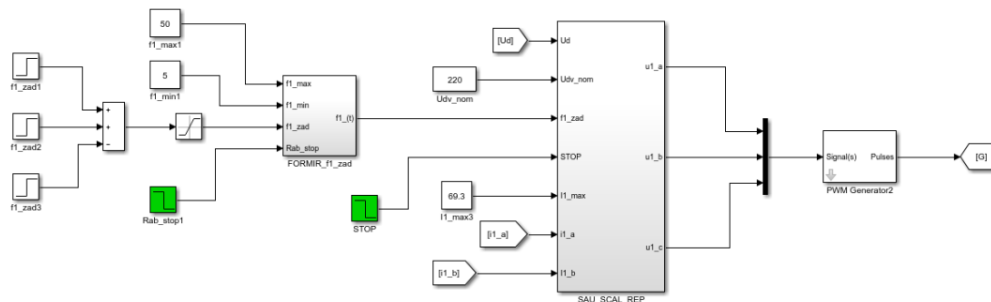


Рисунок 3.8 – Імітаційна модель системи управління із заданою програмою роботи.

3.4. Модель частотно-регульованого асинхронного електроприводу насоса зі скалярним керуванням.

В роботі розглянуто модель частотно-регульованого асинхронного приводу насоса із скалярним керуванням. REP_AD_Nasos_scal_01.mdl – модель асинхронного електроприводу насоса зі скалярним керуванням на базі моделі електричної частини силового каналу системи перетворювач частоти – асинхронний двигун виконана за допомогою пакету Simulink програми Matlab з датчиками струму i_a та i_b , а також корекцією вольт-частотної характеристики $U/f=const$.

Програма дослідження електроприводу передбачає такі етапи:

- Пуск на частоті 25 Гц;
- Пуск на частоті 50 Гц.
- Моделювання відпрацювання насосом циклу плавний пуск – ступінчастий розгін до номінальної швидкості – робота на номінальній швидкості – гальмування – зупинка
- Побудова графіків характеристик $\omega(t)$, $M(t)$ та $I(t)$ для кожного з описаних випадків.

Характеристики $\omega(t)$, $M(t)$ та $I(t)$ при пуску на частоті 25 Гц представлені рисунку 3.9.

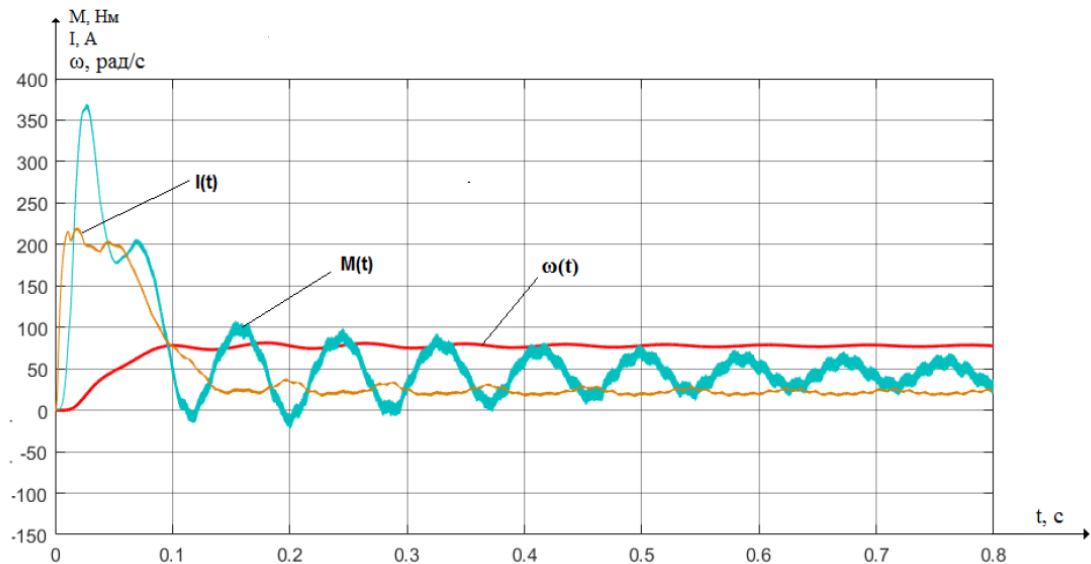


Рисунок 3.9 – Характеристики $\omega(t)$, $M(t)$ та $I(t)$ при пуску на частоті 25 Гц.

Характеристики $\omega(t)$, а також час перехідного процесу при пуску на частоті 25 Гц показано рисунку 3.10.

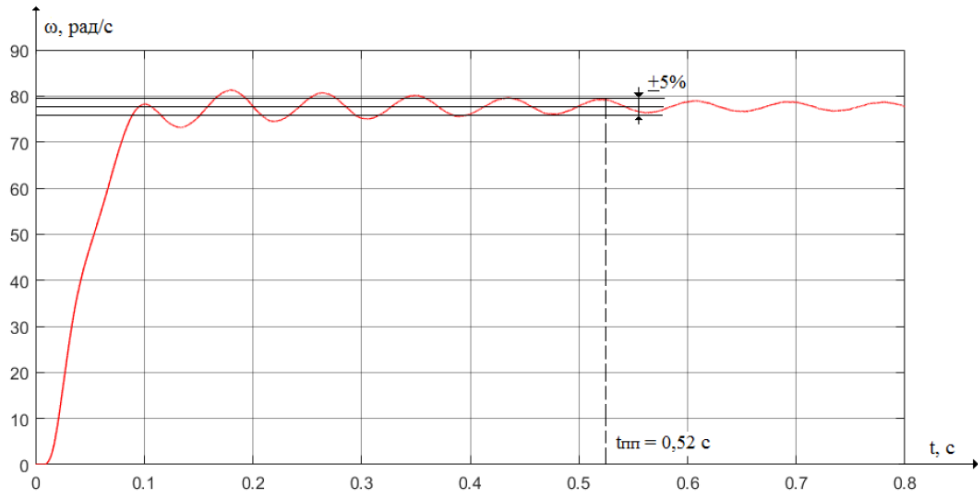


Рисунок 3.10 – Характеристика $\omega(t)$ під час пуску на частоті 25 Гц.

Характеристики $\omega(t)$, $M(t)$ та $I(t)$ при пуску на частоті 50 Гц представлені малюнку 3.11.

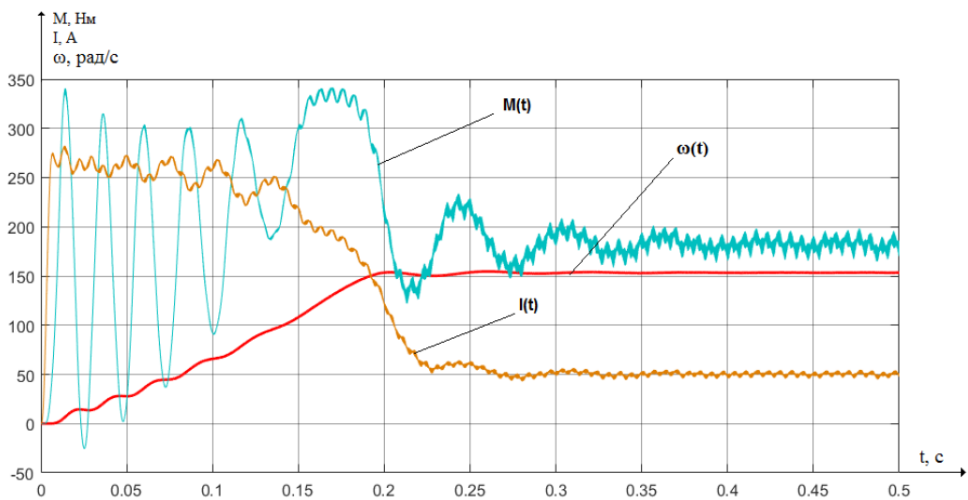


Рисунок 3.11 – Характеристики $\omega(t)$, $M(t)$ та $I(t)$ при пуску на частоті 50 Гц.

Характеристики $\omega(t)$, а також час перехідного процесу при пуску на частоті 50 Гц показано малюнку 3.12.

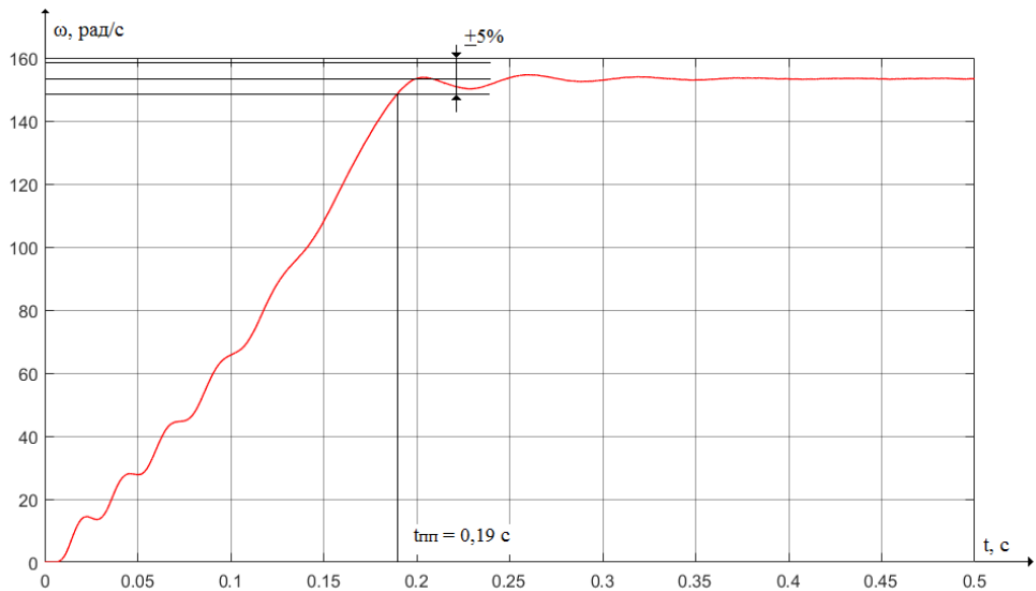


Рисунок 3.12 – Характеристика $\omega(t)$ під час пуску на частоті 50 Гц.

Характеристики $\omega(t)$, $M(t)$ та $I(t)$, при моделюванні циклу «плавний пуск – ступінчастий розгін до номінальної швидкості – робота на номінальній швидкості – гальмування – зупинка» представлені на малюнку 3.13. Ступінчастий розгін передбачає пуск на частоті 25 Гц, перехід на частоту 40 Гц, після цього вихід на номінальний режим роботи з частотою 50 Гц.

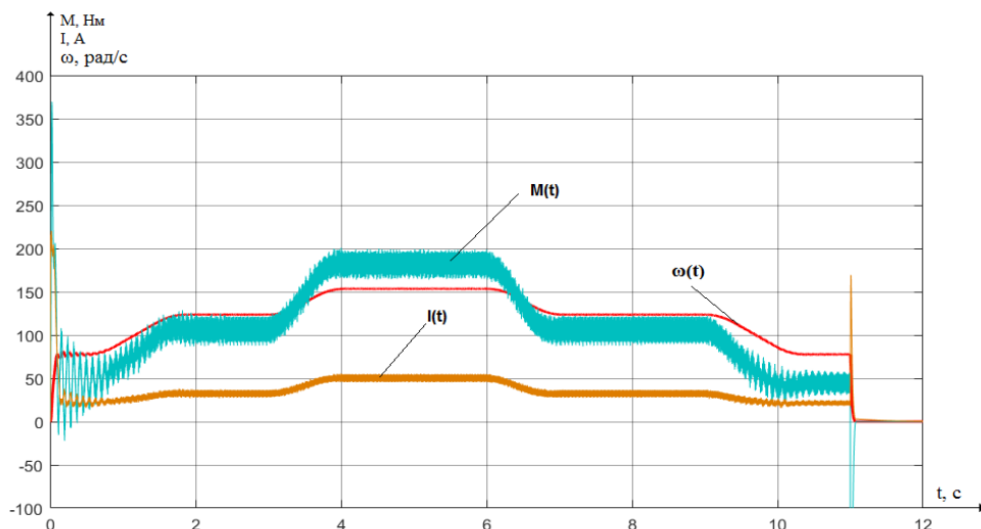


Рисунок 3.13 – Діаграма відпрацювання циклу плавний пуск – ступінчастий розгін до номінальної швидкості - робота на номінальній швидкості - гальмування - зупинка.

Як видно з рисунків при пуску на частоті 25 Гц час перехідного процесу становив 0,52 с, а швидкість обертання досягла значення 76,4 рад/с, а при пуску на частоті 50 Гц – 0,19с та 152,9 рад/с відповідно.

Так як при роботі даного приводу виникають короточасні перевантаження, при протіканні яких відбувається провал швидкості, виникає необхідність не тільки в обмеженні значень моменту і струму, але і необхідність у підтримці моменту на валу двигуна протягом часу виникнення перевантаження.

Скалярний метод керування асинхронного приводу з частотним регулюванням є найпростішим методом регулювання, але при цьому він має невисокі якісні показники: мале значення діапазону регулювання швидкості, значна похибка швидкості, що викликає потребу у використанні задачника інтенсивності швидкості.

4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ ТА ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ

4.1 Організаційні та технічні заходи щодо створення безпечних умов праці при монтажі двигуна та перетворювача частоти

Особливості організації охорони праці на підприємстві відіграють важливу роль. Простоти та зниження ефективності праці, викликані аваріями, нещасними випадками на виробництві, професійними захворюваннями, не тільки уповільнюють виробничі процеси, а й стають причиною високих додаткових витрат для підприємства. Крім того, ці явища значною мірою негативно впливають на безпеку виробництва, якість продукції та ставлення до роботи працюючих.

Монтаж перетворювача являє собою потенційну небезпеку, оскільки при проведенні монтажних і профілактичних робіт людина може торкнутися струмопровідних частин, що знаходяться під напругою. Фактором, що визначає тяжкість ураження, є величина електричного струму, що протікає через тіло людини.

Живлення електроприводу здійснюється від трифазної мережі з нульовим проводом частотою 50 Гц, напругою 380 В.

З аналізу випадків електротравматизму випливає, що проведення лише організаційних заходів недостатньо, і потрібні технічні заходи, такі як захисне заземлення та захисне відключення несправного обладнання.[15]

Оскільки використовується трифазна мережа змінного струму напругою до 1000 В, захист персоналу здійснюється захисним заземленням - навмисним з'єднанням металевих частин обладнання, доступних для дотику людини із зовнішнім горизонтальним заземлюючим електродом, що унеможливило ураження людини при виникненні замикання на корпус.

Як горизонтальний заземлюючий електрод використовують смугову сталь перерізом не менше 4-12 мм, або сталь круглого перерізу діаметром не менше 6 мм.

Відповідно до «Правил улаштування електроустановок» (ПУЕ) опір заземлювального пристрою в електроустановках напругою до 1000 В із ізолюваною нейтраллю має бути не більше 4 Ом.

На робочій ділянці на видному місці повинна бути вивішена табличка із зазначенням номера телефону пожежної частини та диспетчерів пожежної охорони. визначено порядок знеструмлення обладнання під час пожежі та після закінчення робочого дня, встановлено порядок проведення протипожежних робіт, дії персоналу під час виявлення пожежі; встановлено порядок та строки проходження інструктажу з пожежної безпеки та занять з пожежно-технічного мінімуму, призначено відповідальних за їх своєчасне проведення; має бути розроблений та вивішений на видному місці план-схема евакуації людей у разі виникнення пожежі, а також передбачено встановлення системи оповіщення людей про пожежу.

Виробничі працівники зобов'язані: дотримуватись вимог пожежної безпеки стандартів, норм і правил, затверджених в установленому порядку в установленому порядку, а також дотримуватись та підтримувати протипожежний режим; дотримуватись запобіжних заходів при користуванні легкозаймистими рідинами (ЛЗР); у разі виявлення пожежі повідомити пожежну охорону та вжити заходів щодо ліквідації пожежі та порятунку людей.

Порядок дії під час пожежі: негайно повідомити телефоном пожежну охорону; вжити по можливості заходи щодо евакуації людей, гасіння пожежі та збереження матеріальних цінностей.

Посадова особа, яка прибула до місця пожежі, зобов'язана: продублювати повідомлення про виникнення пожежі в пожежну охорону та повідомити керівництво, диспетчера, відповідального чергового по об'єкту; у разі загрози життю людей негайно організувати їх порятунок, використовуючи при цьому всі сили та засоби; перевірити включення у роботу автоматичних засобів пожежогасіння; відключити електроенергію; припинити всі роботи у будівлі, крім робіт, пов'язаних із заходами щодо ліквідації пожежі; видалити

за межі небезпечної зони всіх працівників, які не беруть участь у гасінні пожежі; здійснити загальний посібник з гасіння пожежі; організувати евакуацію та захист матеріальних цінностей; організувати зустріч підрозділів пожежної охорони та надати допомогу у виборі найкоротшого шляху для під'їзду до вогнища пожежі. та рідинні вогнегасники – 1 шт;

4.2 Заходи щодо попередження надзвичайних ситуацій, що виникають у результаті можливих аварій на об'єкті

На об'єкті, що проектується, вибухопожежонебезпечні та аварійно-хімічно небезпечні речовини не використовуються.

Небезпечними подіями, які можуть вплинути на безпеку працюючого персоналу, будуть:

пожежа у будівлі;

відключення від електропостачання.

Зони дії основних вражаючих факторів, при можливих аваріях (пожежі, аварії на інженерних мережах) на проєктованому об'єкті визначені межами самого об'єкта.

Небезпечних виробництв немає.

Розрахунки з визначення зон дії основних факторів, що вражають, виконані відповідно до діючих методик.

Як розрахунковий варіант обраний найбільш несприятливий варіант пожежі - пожежа на об'єкті. Як вражаючий фактор розглянуто теплове випромінювання будматеріалів, які горять.

При цьому вплив теплового випромінювання на різні будівельні матеріали та характер впливу теплового випромінювання на людину наведено у таблиці 4.1 та таблиці 4.2.

Таблиця 4.1 – Вплив теплового випромінювання різні будівельні матеріали

Випромінювання, кВт/м ²	Метал	Деревина	Гума
<7	Немає	Немає	Немає
8,5-9	Розкладання, Спучування фарби	Початок розкладання	Початок обвуглювання
10,5-13,5	Обгоряння фарби через 2 хв.	Інтенсивне обвуглювання через 5 хв.	Інтенсивне обвуглювання через 4 хв.
14-16	Обгоряння фарби через 1 хв.	Загоряння через 5 хв.	Загоряння через 1 хв.
85	Обгоряння фарби через 3-5 сек.	Загоряння через 3-5 сек.	Загоряння через 3-5 сек.

Таблиця 4.2 – Характер впливу теплового випромінювання на людину

Показники впливу на людей	Випромінювання, кВт/м ²
Летальний результат	
10 сек	45
30 сек.	35
1 хв.	20
10 хв	10
Опік 2 ступеня	
10 сек	20
30 сек.	10
1 хв.	8

Припинення діяльності об'єкта в мінімально можливі терміни, а також виключення або зменшення масштабів появи вторинних факторів, що вражають, здійснюється обслуговуючим персоналом:

- негайно припиняються всі види робіт;
- евакуація робочого персоналу;
- закриваються усі вікна приміщень.

В машинному залі передбачається протипожежний водопровід витратою 2.5л/сек, для чого встановлюються два пожежні крани діаметром 50мм.

Для управління насосними установками розроблено станцію групового управління на базі частотнорегульованого електроприводу, що здійснює електропостачання та автоматичне оперативне управління групою насосних установок з асинхронними трифазними короткозамкненими електродвигунами на номінальну напругу 380В частотою 50Гц потужністю 3 кВт.

Станція забезпечує підтримку на заданому рівні тиску за допомогою автоматичного регулювання частоти обертання одного з електродвигунів, а також шляхом автоматичної зміни числа працюючих електродвигунів. При цьому здійснюється плавний частотний пуск кожного з двигунів та плавне зниження частоти обертання перед зупинкою.

Система управління виконує «м'які» включення, відключення та перемикання електродвигунів, забезпечуючи оптимальні перехідні режими без гідравлічних ударів та шкідливих електродинамічних процесів.

Станція керування забезпечує наступні режими насосних установок:

- постійну роботу одного електродвигуна (будь-якого з чотирьох або шести за заданою програмою) від частотнорегульованого приводу в автоматичному режимі регулювання технологічного параметра;
- автоматичне включення додаткового електродвигуна (будь-якого з трьох або п'яти за заданою програмою);
- автоматичне відключення електродвигуна додаткового насоса;

- автоматичне включення електродвигуна резервного насоса при виході з ладу основного, що працює від перетворювача частоти;

- автоматичне включення резервного насоса при виході з ладу основного додаткового насоса, що працює від мережі;

- автоматичне включення електродвигуна робочого насоса, що працює від перетворювача частоти, на роботу від мережі при порушеннях режиму роботи частотнорегульованого приводу та перетворювача частоти або при відключенні перетворювача частоти від мережі та підключення резервного перетворювача частоти;

У режимі ручного керування здійснюється:

- пуск та зупинка будь-якого насоса від частотнорегульованого приводу від одного імпульсу з подальшою реалізацією процесу за алгоритмом автоматичного керування;

- прямиий пуск і зупинка будь-якого електродвигуна від мережі;

- заміна режимів роботи насосних установок за часом для забезпечення рівномірної амортизації обладнання;

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі розглянуто питання модернізації асинхронного частотного електроприводу насоса Д200-3 системи теплопостачання.

Проаналізовано напряму розвитку електроприводів із частотним регулюванням. Виявлено, що в даний час різко зріс попит на асинхронні двигуни для систем частотного регулювання, що забезпечують енергозбереження та електромагнітну сумісність під час роботи в різних середовищах та установках.

Для відцентровим насосом Д200-3 було зроблено вибір асинхронного електродвигуна ВА 180 М4, що дозволяє отримати ефективне регулювання водопостачання. Для виявлення параметрів, що визначають рівень енергозбереження та економію електроенергії, здійснено розрахунок потужності та вибрано перетворювач частоти марки Delta Electronics модель VFD-CP2000.

Виконано математичне моделювання системи електроприводу. Розроблено модель асинхронного двигуна та віртуальну модель електроприводу з частотним керуванням, яка дозволяє аналізувати та досліджувати змодельовані режими частотного пуску асинхронного приводу на персональному комп'ютері у програмі MATLAB. Під час моделювання перехідних процесів при прямому пуску двигуна з номінальним навантаженням спостерігаються значні коливання моменту (600 Нм, - 200 Нм), що свідчить про низьку якість перехідних процесів. Тривалість перехідного процесу становить 0,49 с. Продемонстровано, що при використанні скалярного методу керування з частотою 50 Гц перехідні процеси тривають 0,19 с.

Проведено організаційні заходи щодо, безпечних налагоджувальних робіт з налаштування та обслуговування асинхронного двигуна з частотним регулюванням та попередження надзвичайних ситуацій, що виникають у результаті можливих аварій на об'єкті.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Goodfellow, Howard D.; Kosonen, Risto (ed.). Industrial Ventilation Design Guidebook: Volume 1: Fundamentals. Academic Press, 2020.
2. Буняк О. А. Електричні машини : Навчальний посібник /. — Тернопіль : ФОП Паляниця В.А. , 2023 — 324 с.
3. Удут Л. О, Мальцева О. П. Системи управління електроприводів: Навчальний посібник. – Видавництво ТПУ, 2007р. – 152 с
4. Півняк, Г. Г.; Довгань, В. П.; Шкрабець, Ф. П. Електричні машини. Д.: НГУ, 2003.
5. Косенко, Р. А. Моделювання системи векторного керування асинхронним двигуном. Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки, 2014, 1: 215-223.
6. Демішонкова, С. А.; Терещенко, О. В. Векторне керування трьохфазним асинхронним двигуном. In: Мехатронні системи: інновації та інжиніринг. Київський національний університет технологій та дизайну, 2018.
7. Попович М. Г., Лозинський О. Ю., Мацько Б. М. та ін. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи: навч. посіб./ Під ред. М. Г. Поповича – К.: Либідь, 2013. – 680 с..
8. Толочко О.І. Векторні моделі асинхронного двигуна у середовищі пакета MATLAB / О.І. Толочко, Г.С. Чекавський, Д.М. Мірошник // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: Наукові праці КДПУ. – Кременчук, 2003. – Т.1. – № 2 (19). – С. 199-202.
9. Загірняк М.В. Електричні машини: підручник / М.В. Загірняк, Б.І. Невзлін. – К.: Знання, 2009. – 399 с.
10. Бобух, А. О. Автоматизовані системи керування технологічними процесами: Навч. посібник. 2006.
11. Сьомін, Андрій Олександрович. Метод ідентифікації параметрів асинхронного електропривода з низькою чутливістю до похибок вимірювання параметрів його режиму при нерухомому роторі. 2019.

12. Електричні апарати. Електромеханічна апаратура комутації, керування та захисту. Загальний курс : навчальний посібник. – Харків: Вид-во «Точка», 2012. – 340 с.

13. Програмований логічний контролер.
<https://owen.ua/ua/programovani-logichni-kontrolery/plk110-m02-programovanyj-logichnyj-kontroler>

14. SimPowerSystems User's Guide. / Hydro-Quebec and The MathWorks, Inc., 2009. – 402 p.

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.