

Кафедра Е та М



**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА  
ДО КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ БАКАЛАВРА**

**на тему «МОДЕРНІЗАЦІЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ДЛЯ НЕЙТРАЛІЗАЦІЇ  
ЖИРНИХ КИСЛОТ СОНЯШНИКОВОЇ ОЛІЇ»**

(назва кваліфікаційної роботи згідно наказу ОНТУ)

Здобувача (ки) Колісніченко Д. О.  
(прізвище, ініціали)

4 курсу АЕМ-40 групи

Керівник д.т.н., доцент Осадчук П. І.  
(посада, прізвище та ініціали)

**Кваліфікаційна робота допускається до захисту**

Рішення кафедри від 17.06.2024 р., протокол № 12.

Завідувач(ка) кафедри Е та М  
(назва кафедри) \_\_\_\_\_  
(підпис)

**Петро Осадчук**  
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Одеса – 2024 рік

# ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інститут: *Комп'ютерної інженерії, автоматизації, робототехніки та програмування ім. П.М.Платонова*

Факультет: *Автоматизації таробототехніки*

Кафедра: *Електромеханіки та мехатроніки* Рівень ВО: *перший*

Ступень ВО: *бакалавр*

Галузь знань: *14 – Електрична інженерія*

Спеціальність: *141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка*

Освітня програма: *Електромеханічні системи з інтелектуальним керуванням*

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Зав. кафедри ЕтаМ

Осадчук П.І.

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2024 р.

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА здобувач СВО «Бакалавр» гр. АЕМ-40 Колісниченко Дмитру Олександровичу

1. Тема роботи: **«Модернізація електроприводу для нейтралізації жирних кислот соняшникової олії»**

Керівник роботи: Осадчук Петро Ігорович, д.т.н., доцент.

Затверджено наказом ОНТУ № 797-03 від 19.12.2023 р.

2. Строк подання студентом роботи: 15.06.2024 р.

3. Вхідні дані до проекту: Технічні характеристики електроприводу устаткування для нейтралізації соняшникової олії: місткість нейтралізатора 6,5 м<sup>3</sup>, місткість баку для води 75 л., маса 1650 кг., потужність електроприводу мішалки 4 кВт.; обґрунтувати інформативні параметри управління електропривода устаткування для нейтралізації соняшникової олії.

4. Зміст розрахунково-конструкторської частини пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

**Вступ. 1 Загальна характеристика роботи:** Вибір об'єкта управління для модернізації системи електроприводу, опис і аналіз реалізованого ним технологічного процесу і відповідного обладнання. Актуальність теми. Об'єкт і мета модернізації.

**2 Розрахунково-конструкторська частина:** Вимоги до автоматизованого електропривода устаткування для нейтралізації соняшникової олії. Розрахунок потужності і вибір двигуна нейтралізатора. Розрахунок і побудування механічної характеристики двигуна. Схема управління електропривода.

**3 Моделювання динамічних режимів роботи електропривода:** Розрахунок параметрів схеми заміщення АД електропривода для MATLAB та розробка імітаційної моделі електроприводу устаткування для нейтралізації соняшникової олії і дослідження її роботи у середовищі Simulink.

**4 Організаційна та технологічна частина:** Організація технології монтажу, ремонту і обслуговування та техніки безпеки праці при обслуговуванні електропривода.

**5 Економічна частина:** Розрахунок економічної ефективності від модернізації електропривода устаткування для нейтралізації соняшникової олії.

**6 Результативна частина:** Висновки і рекомендації за прийнятими в проекті рішеннями.

Список використаних джерел, на які є посилання.

Додатки.

5. Перелік демонстраційного матеріалу. Слайди презентації (обов'язкові):

1. Титульний слайд.
2. Актуальність теми, об'єкт проектування, мета і завдання роботи.
3. Конструкція і технічні характеристики нейтралізатора.
4. Розрахунок кінематичної схеми електропривода нейтралізатора.
5. Розрахунок потужності і вибір двигуна електропривода нейтралізатора.
6. Модель та результати моделювання електропривода устаткування для нейтралізації соняшникової олії до його модернізації (прямий пуск двигуна).
7. Модель та результати моделювання електропривода після його модернізації (з частотним регулюванням).
8. Висновки (технічні, технологічні, т/б і охорона праці, економічні).

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Економічна частина			

7. Дата видачі завдання: 19.12.2023 р.

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи бакалавра	Строк виконання етапів	Прим
1	Загальна характеристика роботи: вибір об'єкта управління для модернізації системи електроприводу, опис і аналіз реалізованого ним технологічного процесу і відповідного обладнання. Актуальність теми. Об'єкт і мета модернізації.	10.03.2024	
2	Розрахунково-конструкторська частина: вимоги до автоматизованого електропривода устаткування для нейтралізації соняшникової олії. Розрахунок потужності і вибір двигуна, перевірка за перевантаженням. Розрахунок і побудування механічної характеристики двигуна.	10.04.2024	
3	Дослідження АСР електропривода нейтралізатора на ЕОМ. Постановка задачі моделювання роботи електропривода на ЕОМ. Розрахунок параметрів схеми заміщення АД електропривода нейтралізатора К-6,0. Моделювання прямого пуску двигуна електропривода нейтралізатора.	25.04.2024	
4	Організаційна та технологічна частина: організація технології монтажу, ремонту і обслуговування та техніки безпеки праці при обслуговуванні електропривода.	20.05.2024	
5	Економічна частина: Розрахунок економічної ефективності від модернізації електропривода устаткування для нейтралізації соняшникової олії.	10.06.2024	
6	Захист кваліфікаційної роботи бакалавра.	26-28.06.2024	

Здобувач: Колісніченко В.О. \_\_\_\_\_

Керівник: Осадчук П.І. \_\_\_\_\_

*Несу відповідальність за ідентичність електронного та друкованого варіантів кваліфікаційної роботи, даю згоду на обробку персональних даних та не заперечую проти розміщення кваліфікаційної роботи на офіційних веб-ресурсах ОНТУ. Підтверджую, що в кваліфікаційній роботі відсутні порушення норм академічної доброчесності.*

Здобувач-дипломник \_\_\_\_\_ Колісніченко Д. О.

## РЕФЕРАТ

Колісниченко Дмитро Олександрович «Модернізація електроприводу для нейтралізації жирних кислот соняшникової олії». Кваліфікаційна робота бакалавра. – Одеса: ОНТУ, 2024. – 79 с. Бібліогр: 12. Іл: 18. Табл: 15.

В роботі розрахована потужність приводного двигуна. Здійснена перевірка за перевантажувальною здатністю. За результатами розрахунку вибрана система «перетворювач частоти – асинхронний двигун». Розраховані та побудовані механічні характеристики для режимів роботи, розроблена функціональна схема електропривода. Для перевірки модернізованої СУЕП проведено моделювання в середовищі Matlab, а також перевірка на стійкість та якість. Проведений техніко- економічний розрахунок системи електропривода. Розроблені заходи з електробезпеки та охорони праці.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** нейтралізація, соняшникова олія, електропривод, імітаційна модель, ефективність.

## ABSTRACT

Kolisnychenko Dmytro Oleksandrovich "Modernization of the electric drive for neutralization of fatty acids of sunflower oil". Bachelor's qualifying work. – Odesa: ONTU, 2024. – 79 p. Bibliography: 12. Illustration: 18. Table: 15.

The drive motor power is calculated. Verification for overload capability has been made. The calculations selecting the system «frequency reversal – asynchronous motor». The mechanical characteristics of the different modes of operation are calculated and made, the functional diagram of the drive is developed. Simulation in the Matlab and check the stability and quality to test the modernized EDCS are performed. Technical and economic calculations drive system are performed. The event on electrical safety and labor protection are covered.

**KEYWORDS:** neutralizer, sunflower oil, electric drive, simulation model, efficiency.

## ЗМІСТ

	Вступ	8
1.	Загальна характеристика технологічного процесу	10
1.1	Загальна характеристика технологічного процесу нейтралізації соняшникової олії	10
1.2	Конструкція і технічні характеристики устаткування для нейтралізації	15
1.3	Характеристика електропривода устаткування нейтралізації соняшникової олії	17
2	Формулювання вимог до електроприводу, обґрунтування типу двигуна, розрахунок його потужності	18
2.1	Вимоги до автоматизованого електропривода устаткування для нейтралізації соняшникової олії	18
2.2	Розрахунок потужності і вибір двигуна нейтралізаційного обладнання	19
2.3	Визначення параметрів схеми заміщення в абсолютних одиницях за довідковими технічними даними вибраного електродвигуна.	23
2.4	Перевірка адекватності розрахункових параметрів двигуна.	25
2.5	Вибір перетворювача частоти	26
2.6	Розрахунок природної механічної характеристики електродвигуна.	28
2.7	Розрахунок природних електромеханічних характеристик електродвигуна	30
2.8	Розрахунок механічних і електромеханічних характеристик електроприводу при скалярному частотному управлінні.	32
2.9	Розрахунок параметрів перетворювача	36
2.10	Розрахунок параметрів електродвигуна.	36
2.11	Розрахунок параметрів ланцюга для замкнутої по струму системи скалярного частотного управління асинхронного електроприводу.	37
2.12	Розрахунок параметрів структурної схеми контура обмеження струму з ПІ-регулятором і аналоговим датчиком струму.	42

					КРБ. ЕтаМ.1.797-03.1.1			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розробив		Колісніченко В.			Модернізація електроприводу для нейтралізації жирних кислот соняшникової олії	Літ	Аркуш	Аркушів
Керівник		Осадчук П. І.					6	79
Консульт.					ОНТУ, АЕМ 40			
Зав.кафедри		Осадчук П. І.						

2.13	Висновки та пропозиції	45
3	Дослідження АСР електропривода нейтралізатора на ЕОМ	47
3.1	Постановка задачі моделювання роботи електропривода на ЕОМ	47
3.2	Розрахунок параметрів схеми заміщення АД електропривода нейтралізатора К-6,0	50
3.3	Моделювання прямого пуску двигуна електропривода нейтралізаційного устаткування	56
3.4	Моделювання пуску двигуна електропривода нейтралізатора з ПЧ	59
3.5	Висновки і пропозиції	66
4	Техніко-економічна ефективність впровадження системи електропривода	67
4.1	Розрахунок інвестиційних витрат на модернізацію і впровадження системи електроприводу	67
4.2	Розрахунок змін основних показників діяльності підприємства	68
4.3	Розрахунок економічного ефекту	74
5	Безпека праці при монтажі та експлуатації системи електроприводу	75
5.1	Забезпечення безпеки при виконанні монтажних-налагоджувальних робіт	75
5.2	Забезпечення безпеки при експлуатації системи електроприводу	76
	ВИСНОВКИ	78
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	79

## ВСТУП

Енергоефективність є однією з проблем, яких неможливо уникнути при роботі з електричними приладами, машинами, приводами та системами. Виробництво, яке не досягає мінімального рівня ефективності не є прибутковим, і кожне підвищення енергоефективності зменшує споживання енергії та таким чином витрати на енергопостачання. Покращення енергоефективності електроприводів в глобальному масштабі зменшує енергію на попит і збільшує постачання енергії, що опосередковано зменшує викиди парникових газів.

Ключовий елемент у підвищенні енергоефективності електричних пристроїв, машин і приводів – це зменшення втрат, яких можна досягти за допомогою різних методів.

Застосування нових матеріалів, нові рішення в конструкції, оптимізація режимів роботи і створення автоматизованих електроприводів може суттєво сприяти підвищенню енергоефективності. Подальше підвищення енергоефективності може бути досягнуто за допомогою відповідного вибору і узгодження компонентів силової електроніки з успадкованими характеристиками машин або пристроїв. Належний контроль систем, що складаються з електричних пристроїв або машин, і компоненти силової електроніки, засновані на передових моделях системи, можуть ще більше покращити загальну енергоефективність систем.

Таким чином, завдання модернізації існуючих електроприводів з метою підвищення ефективності їх використання в нинішніх умовах є актуальним напрямком досліджень.

Метою написання дипломної роботи є модернізація автоматизованого електроприводу устаткування для нейтралізації соняшникової олії.

При написанні роботи були поставлені наступні задачі:

2.4.1 Навести загальну характеристику технологічного процесу нейтралізації соняшникової олії, а також розглянути характеристики обладнання,

необхідні для виконання процесу.

2.4.2 Сформулювати вимоги до електроприводу устаткування для нейтралізації соняшникової олії, навести схему управління електроприводом.

2.4.3 Виконати моделювання динамічних режимів роботи електропривода.

2.4.4 Показати доцільність модернізації електроприводу устаткування для нейтралізації соняшникової олії шляхом розрахунку економічних показників.

2.4.5 Розглянути питання безпеки праці при виконанні монтажно- налагоджувальних робіт і експлуатації системи електроприводу.

Об'єкт дослідження – процес модернізації автоматизованого електроприводу устаткування для нейтралізації соняшникової олії.

Предмет дослідження – є автоматизований електропривод устаткування для нейтралізації соняшникової олії.

Методи дослідження, які були використані при написанні роботи – аналіз, синтез, моделювання.

Практична значимість отриманих результатів. Отриманий автоматизований електропривод можна застосовувати в процесі нейтралізації соняшникової олії.

# 1 ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ

## 1.1 Загальна характеристика технологічного процесу нейтралізації соняшникової олії

Якість олії, що споживається, залежить від рівня технологій, що використовуються для видалення домішок та супутніх речовин, що містяться у первинному продукті. Споживачами рафінованих жирів є багато галузей народного господарства, такі як хлібопекарська, кондитерська, консервна, їжеконтратна та інші. Вторинні продукти з олії використовуються з технічною метою (оліфоварення, машинобудування, хімічна, текстильна промисловості та ін.) [1].

Умовою протікання процесу очищення олій та жирів є безперервність процесу, незважаючи на наявність декількох етапів цього процесу. Оскільки якість кінцевого продукту переробки, а також ефективність процесу залежить від параметрів проміжних стадій, то ведення процесу рафінації потребує постійного контролю, не тільки за технологічними, але й за економічними параметрами, які характеризують вихід продукту на конкретній стадії процесу. Проте більшість заводів по виробництву олій та жирів мають низький ступінь автоматизації виробництва, що можна пояснити низьким рівнем автоматизованих систем керування, їх локальністю та високою вартістю.

Недоліками контролю параметрів продукції є те, що в технологічному потоці використовуються об'ємні методи, які мають велику похибку, а також неефективні в роботі. Недостатня точність контролю витрат та додатків напівфабрикатів і кінцевого продукту процесів рафінації обумовлює втрати продукції. Додатковою проблемою вирішення завдань виробництва олії є недостатня ефективність каналів впливу на хід процесу рафінації олії, який би дозволив зменшувати дії збурень і завад процесу. Впровадження автоматизації процесу рафінації спрямовано на забезпечення якісного контролю (з архівацією даних) за витратами сировини, проміжних та фінішного продукту. Отже,

реалізація завдань автоматизації контрольно-вимірювальних операцій є передумовою по досягненню сучасного рівня розвитку систем керування, що базуються на використанні мікропроцесорних засобів керування.

Складність процесу рафінації олії полягає в взаємопов'язаності хімічних та фізичних параметрів, які дотично характеризують впливи на процеси, які відбуваються при видаленні тригліцеридів з олії.

Рафінація являє собою складний комплекс різних фізичних і хімічних процесів. Як зазначалося, необхідність використання тих чи інших процесів, що формують процес очищення, залежить від якості сировини та необхідним рівнем очищення [1, 2].

Класифікація методів рафінації жирів представлена у вигляді таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Класифікація методів рафінації жирів

Процеси	Методи	Призначення
Гідромеханічні	Відстоювання	Поділ утворених фаз
	Центрифугування	
	Фільтрування	
Фізико-хімічні	Нейтралізація	Видалення фосфоліпідів та інших гідрофільних речовин
	Виморожування	Видалення високо плавких речовин
	Нейтралізація	Видалення вільних жирних кислот
	Промивання	Видалення мила та інших водорозчинних речовин
Маслообмінні	Висушування	Видалення вологи
	Відбілювання	Видалення пігментів та інших забарвлених речовин
	Дезодорація	Видалення одоруючих речовин
	Дистиляційна рафінація	Видалення вільних жирних кислот одоруючих речовин

Швидкість нейтралізаційних процесів визначається законами гідродинаміки. Ці процеси використовуються для поділу рідинних неоднорідних середовищ в гравітаційному полі.

Інший варіант – застосування дії відцентрових сил, або дії різниці тисків при переміщенні продукту через пористу речовину; Швидкість фізико-хімічних процесів залежить від природи хімічної кінетики та умов масопереносу реагуючих речовин.

Стан цих процесів визначається ступенем фізичного впливу на умови масопереносу.

Адсорбція, екстракція з розчинів, дистиляція та інші, відносяться до масообмінних процесів, для яких характерні переходом однієї чи декількох компонентів вихідної суміші з однієї фази в іншу.

Окрім головної мети рафінації олії – отримати найбільший вміст вільних жирних кислот, додатковим завданням підвищення ефективності процесу є мінімізувати втрати цінних супутніх речовин, що можуть використовуватись як самостійні продукти.

До цих продуктів відносяться воскові речовини та фосфоліпіди. Довільні початкові умови процесу, які полягають в зміні параметрів олії та жирів, що надходять на рафінацію, а також прагнення виробника задовольнити різних замовників, що пред'являють різні вимоги до фінішного продукту, призводять до використання різних методів процесу рафінації або різних комбінацій їх поєднання [1, 3].

Для видалення фосфатидів із необробленої олії використовується процес нейтралізації, який проходить в результаті змішування олії з паром. Найбільш широкого використання здобув метод лужної рафінації, який передбачає попереднє видалення фосфоровмісних сполук в процесі нейтралізації [1].

Основні етапи процесу нейтралізації формуються в результаті виконання таких складових:

- 1) змішування масла з лужним розчином;
- 2) нейтралізація жирних кислот;

3) розподіл фаз нейтралізоване масло - водна емульсія;

4) процес сушіння нейтралізованого масла;

Аналізу процесу нейтралізації [4], показує, що основними технологічними параметрами, які визначають хід цього процесу, є час експозиції, кількість агента нейтралізації та температура нейтралізації.

Необхідна кількість агента нейтралізації визначається вмістом жирних кислот та їх якісного складу.

Діапазон коливань вмісту жирних кислот становить 0,5 – 6,0%. Тому завданням керування процесу нейтралізації полягає в утриманні оптимального значення кількості лужного розчину, оскільки недостатня її кількість призводить до неповного відділення жирних кислот, а перевищення значення – до утворення стабільних емульсій. Це утворення викликає додаткові енерговитрати, оскільки ускладнюється поділ фаз.

Вибір оптимального температурного режиму процесу нейтралізації ускладнений широким діапазоном його значень: 20° - 120°C, тому враховуються наступні обставини.

При температурі 20° - 40°C зберігаються міцні зв'язки між молекулами води та фосфоліпідів. Відповідно, внаслідок високої в'язкості олії, спостерігається мала швидкість процесу нейтралізації, оскільки процес дифузії води всередину міцел фосфоліпідів обмежений. Тому до теперішнього часу, з метою енергозбереження, використовувався режим, в якому підтримувалась температура 50° - 60°C, при вмісті пари 1- 4 %.

В результаті проведення такого режиму після нейтралізації отримували вміст фосфоліпідів в діапазоні 0,15...0,25 %.

При впровадженні сучасних технологій, які передбачають використання різних фізичних полів [5], що впливають на процес, вдається підвищити ступінь очищення олій.

Більш енергоємним є процес нейтралізації, що здійснюється при температурі 105°-120°C. Він передбачає наступне охолодження суспензії до 60°– 80°C. За

таких умов збільшується швидкість дифузії та розчинення води в олії. Внаслідок цього збільшується дисоціація міцел на окремі молекули, відповідно полегшується нейтралізація фосфоліпідів.

Міцність асоціатів фосфоліпідів з водою підвищується при наступному охолодженні суспензії. Такий режим дозволяє отримати 0,05 - 0,12% вмісту фосфоліпідів в соняшниковій олії. Ефективність відділення фосфатидної емульсії залежить від розміру агрегатів частинок фосфоліпідів та різниці густини поділюваних фаз.

Оскільки набухання та розростання гідратних оболонок не відбувається миттєво, то для досягнення необхідних параметрів відводиться час 10 - 30 хвилин. Поділ двохфазної системи здійснюється на сепараторі, в результаті отримуються гідратована олія та фосфатидна емульсія.

На наступному етапі вони висушуються в вакуум-сушильних апаратах при температурі 80°- 90°С, залишковому тиску не більше 3 кПа.

Технологічна схема нейтралізації соняшникової олії приведена на рисунку 1.1

[1].

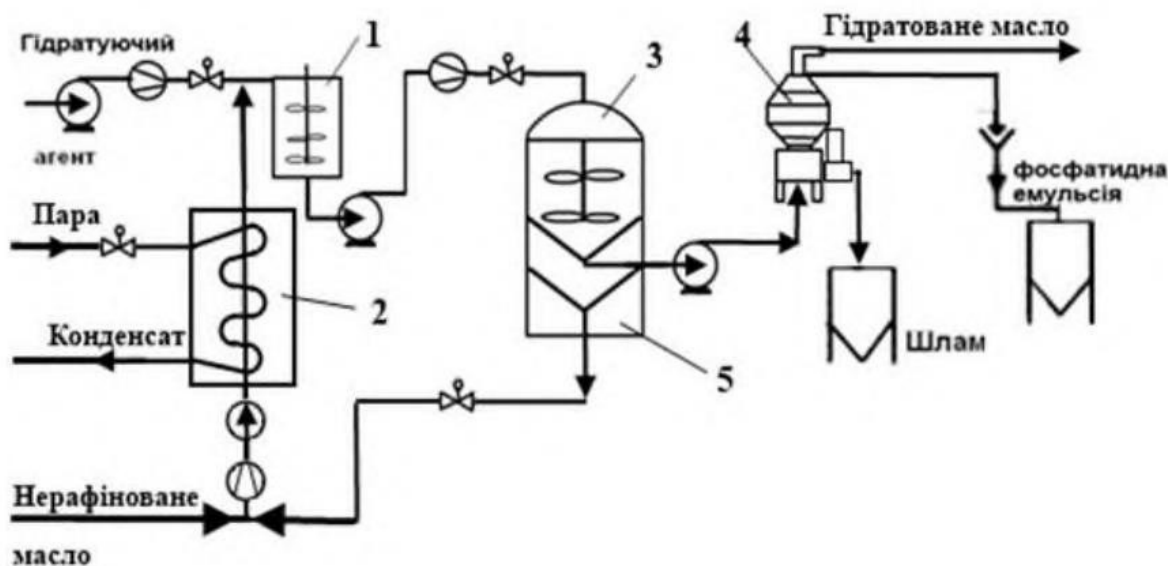


Рисунок 1.1 – Технологічна схема нейтралізації соняшникової олії: 1 - Змішувач; 2 - Теплообмінник (нагрівач); 3 - Коагулятор; 4 - Сепаратор; 5 – Бак. Нерафінована олія і олія з баку 5 крізь теплообмінник 2 подаються у змішувач 1.

Агент нейтралізації також надходить в змішувач 1. В результаті зволоження олія надходить в коагулятор 3, де знаходиться 30 - 40 хвилин.

Використання пропелерного перемішувача, який обертається з частотою 400 об /хв, дає змогу запобігти осіданню пластівців фосфатидів. З коагулятора суміш подається насосом в герметичний сепаратор 4.

Витрати насоса встановлюються таким чином, щоб узгодити надходження суміші на сепарування. Синхронізація витрат/ втрат сприяє підвищенню рівномірності суміші.

Збереження структури агрегованих частинок фосфатидів досягається завдяки спеціальній конструкції насосу.

В результаті сепарації суміш розділяється на три фази: нейтралізована олія, фосфатидна емульсія, які виводяться безперервно, та шлам, який накопичується в грязьовому просторі сепаратора.

## **1.2 Конструкція і технічні характеристики устаткування для нейтралізації соняшникової олії**

В роботі буде розглянуто модернізація електроприводу мішалки нейтралізатора. Зовнішній вигляд нейтралізатора для нейтралізації соняшникової олії представлений на рисунку 1.2.

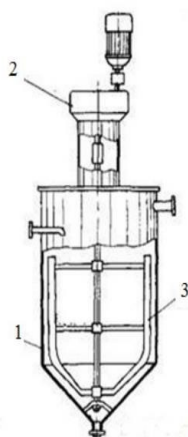


Рисунок 1.2 – Зовнішній вигляд нейтралізатора: 1 - корпус; 2 - редуктор; 3 – мішалка

Нейтралізатор має рамну мішалку 5, що обертається із частотою 1-20 рад/с. Час перебування олії в нейтралізаторі становить близько 30 хв. Суміш олії з лужним розчином повільно проходить через нейтралізатор, виходячи у вигляді олії, яка містить сформовану водно-сольову емульсію. Поділ водно-сольової емульсії та олійної дисперсної фази проходить у відстійнику безперервної дії.

В якості аналога устаткування для нейтралізації соняшникової олії прийнято нейтралізатор К-6,0, технічні характеристики якого наведені у вигляді таблиці 1.2. Зовнішній вигляд наведений на рисунку 1.3.

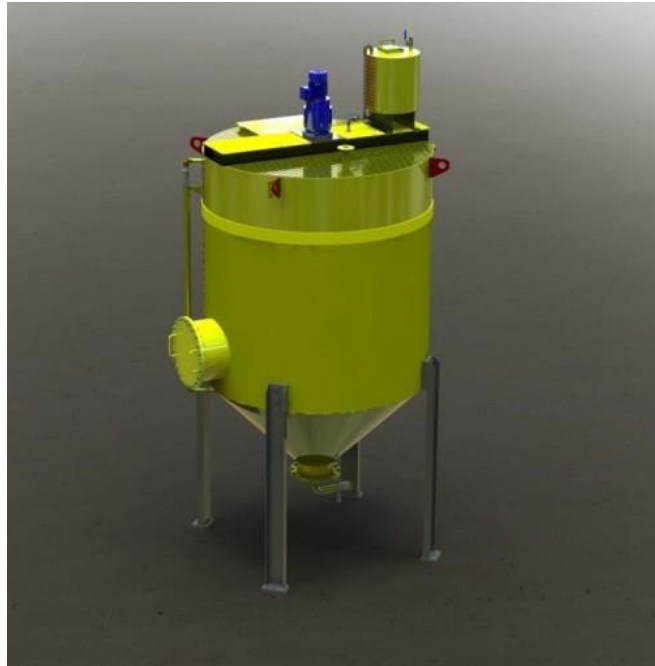


Рисунок 1.3 – Зовнішній вигляд нейтралізатор К-6,0

Таблиця 1.2 – Технічні характеристики нейтралізатор К-6,0

№ п.п	Найменування параметру	Одиниця виміру	Значення
1	Місткість нейтралізатора	м <sup>3</sup>	6,5
2	Місткість баку для лужного розчину	л	75
3	Маса	кг	1650
4	Потужність електроприводу мішалки	кВт	4

### 1.3 Характеристика електропривода устаткування нейтралізації соняшникової олії

Існуюча динаміка поступального руху у напрямі підвищення технічного рівня автоматизованого електроприводу призводить до необхідності періодичного узагальнення накопиченого досвіду у проектуванні та експлуатації існуючого електрообладнання.

Завдання експлуатаційників полягає у збереженні працездатного стану існуючих електроустановок та переведення їх у максимально енергозберігаючий режим.

Поява автоматизованого електроприводу з одного боку пов'язана з виникненням електродвигуном. Технологи почали пред'являти підвищені вимоги до електроприводу з точки зору надійності та якості роботи: розширення функцій, наявність пристроїв отримання та зберігання інформації, зобов'язання [5]. Електроприводи устаткування нейтралізації олії побудовані на застарілій елементній базі, відсутня автоматизація та відмічена невисока функціональність існуючого електропривода.

Саме тому в межах написання роботи прийнято рішення здійснити модернізації електроприводу мішалки нейтралізатора (основного устаткування процесу нейтралізації соняшникової олії).

## 2 ФОРМУЛЮВАННЯ ВИМОГ ДО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ, ОБҐРУНТУВАННЯ ТИПУ ДВИГУНА, РОЗРАХУНОК ЙОГО ПОТУЖНОСТІ

### 2.1 Вимоги до автоматизованого електропривода устаткування для нейтралізації соняшникової олії

Сучасний електропривод – це сукупність безлічі електромашин, апаратів і систем керування ними. Він є основним споживачем електричної енергії (до 60%) і головним джерелом механічної енергії в промисловості.

Для механізмів, що працюють в повторно-короткочасному режимі, більшу частину робочого циклу двигун працює на природній характеристиці і лише відносно невеликий час на штучній, зазвичай на зниженій частоті обертання. У цьому випадку втрати електроенергії на штучній характеристиці порівняно невеликі, тому що час роботи на ній невеликий. Тут можна застосовувати прості і дешеві способи регулювання, навіть якщо вони викликають підвищені втрати потужності в обмотках.

Тому завдяки простоті реалізації методу регулювання швидкості шляхом зміни опору в ланцюзі ротора, такі електроприводи знайшли найбільш широке застосування в кранових системах, і зараз складають основну частину від всіх електроприводів, що застосовуються в промисловості.

У той же час зростає число електроприводів з плавним регулюванням швидкості, в першу чергу до них відносяться електроприводи по системам “тиристорний перетворювач – двигун постійного струму” (ТП-Д) і “перетворювач частоти – асинхронний двигун” (ПЧ-АД).

Сформуємо основні вимоги до перехідного процесу автоматизованого електроприводу мішалки коагулятора:

- перерегулювання  $\delta$  – не більше 10%;
- час регулювання перехідного процесу  $t_p$  – не більше 1 с;

- час наростання – не більше 0,5 мс;
- сталі значення  $H = 1$ .

## 2.2 Розрахунок потужності і вибір двигуна нейтралізаційного обладнання.

Для привода робочих машин частіше всього використовують трифазні асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором серії 4А або міжнародної серії АІР. Останні є уніфікованими двигунами серії Інтерелектро, виконаними з конструкційних матеріалів підвищеної якості. Вони відрізняються меншими габаритами і масою, низьким рівнем вібрацій і підвищеними енергетичними показниками, котрі відповідають рівню кращих зарубіжних зразків. При виборі типу двигуна за рівнем захисту від впливу навколишнього середовища частіше всього використовують захищені – ІР23 або закриті – ІР44. У пожежо-вибухонебезпечних приміщеннях використовують двигуни спецвиконання-ІР54.

Для електропривода робочих машин, як правило вибирають прості та надійні трифазні асинхронні електродвигуни з короткозамкненим ротором серії 4А, АІР, АІРС або інші.

Електродвигуни вибирають із каталогу за розрахунковою потужністю  $P_{НОМ} \geq P_{РОЗРАХ}$  і синхронній частоті обертання  $n_0$  ( $n_0 = 3000, 1500, 1000, 750$  об/хв.) з урахуванням режиму роботи двигуна: S1 – тривалий, ПВ > 60%; режим S2 – короткочасний, ПВ < 15%; режим S3 – повторно-короткочасний,  $15\% \leq ПВ \leq 60\%$ .

При роботі машини у тривалому режимі із малозмінним навантаженням, що відповідає режиму роботи S1, потужність двигуна вибирають за результатами енергетичних розрахунків:

$$P_{НОМ} \geq P_{ДВ}, \quad (2.1)$$

а вибрані двигуни на нагрівання, відповідність пусковому моменту і на перевантажувальну здатність не перевіряють, так як в цьому випадку завод-виготовлювач гарантує їх тривалу роботу.

Вихідні технічні параметри для розрахунку потужності двигуна

гідратаційного обладнання:

$R_{MAX}$ ,  $R_{MIN}$ ,  $R_{CP}$  – максимальний, мінімальний і середній радіус лопатей гідрататора,  $R_{MAX} = 0,25$  м,  $R_{MIN} = 0,10$  м,  $R_{CP} = 0,12$  м;

$Z_H$  – кількість лопатей,  $Z_H = 2$ ;

$\omega_H$  – максимальна кутова швидкість обертання лопатей,  
 $\omega_H = 157$  рад/с (1450 об/хв.);

$q$  – питомий опір олії,  $q = 500..550$  Н/м.

Напруга живлення: 3 PEN 380/220 В 50 Гц.

В основі аналітичного розрахунку споживної потужності двигуна лежить визначення потужності на валу лопатей гідрататора.

Для визначення потужності на валу ротора лопатей  $P_0$  (кВт) (без урахування ККД привода і коефіцієнта запасу потужності двигуна) може бути рекомендована наступна емпірична формула [9]:

$$P_0 = q(R_{MAX} - R_{MIN}) \cdot R_{CP} \cdot \omega_H, \quad (2.2)$$

Тоді:

$$P_0 = 550 (0.25 - 0.10) 0.12 * 2 * 157 = 3,1 \text{ кВт}$$

Потужність на валу двигуна привода визначимо за формулою:

$$P_{ДВ} = K_3 \cdot \frac{P_0}{\eta_3}, \quad (2.5.3)(2.3)$$

де  $P_0$  - розрахункова потужність на валу ротора лопатей,  $P_0 = 3,1$  кВт;

$\eta_3$  – загальний ККД кінематичної схеми,  $\eta_3 = 0,90$ ;

$K_3$  - коефіцієнт запасу потужності двигуна,  $K_3 = 1,1...1,3$ .

Тоді потужність на валу двигуна:

$$P_{ДВ} = \frac{P_0}{\eta_0} \cdot K_3 = \frac{3,1}{0,90} \cdot 1,1 = 3,78 \text{ кВт}$$

За розрахованою потужністю двигуна  $P_{ДВ} = 3,78$  кВт і за заданим значенням частоти обертання ротора двигуна  $n = 1450$  об/хв., вибираємо трифазний асинхронний двигун 4А100L4У3 з короткозамкненим ротором, серії 4А, для режиму *S1* з напругою 380 В 50 Гц.

Таблиця 2.1 – Технічна характеристика двигуна **4А100L4У3**

$P_{НОМ}, \text{кВт}$	$n_{НОМ},$ об/хв.	$(\text{ККД})\eta_{НОМ},$ %	$\cos\varphi_{НОМ}$	$J_{ДВ},$ $\text{кг}\cdot\text{м}^2$
4.0	1450	84	0.84	0.15
$\frac{M_{\Pi}}{M_{НОМ}}$	$\frac{M_{max}}{M_{НОМ}}$	$\frac{M_{min}}{M_{НОМ}}$	$\frac{I_{\Pi}}{M_{НОМ}}$	
2	2.2	1.6	6	

### Визначення додаткових параметрів двигуна

Синхронна кутова частота обертання двигуна:

$$\omega_0 = \frac{\pi \cdot n_0}{30} = \frac{\pi \cdot 1500}{30} = 157.08 \text{ рад/с} \quad (2.5.4)(2.4)$$

Номінальна частота обертання двигуна:

$$n_{дв.н} = (1 - S_n) \cdot n_0 = (1 - 0,053) \cdot 1500 = 1450 \text{ об/хв} \quad (2.5.5)(2.5)$$

чи

$$\omega_{дв.н} = (1 - S_n) \cdot \omega_0 = (1 - 0,053) \cdot 157,08 = 148,75 \text{ рад/}$$

с  $(2.5.6)(2.6)$

Номінальний момент двигуна:

$$M_{дв.н} = \frac{P_{дв.н}}{\omega_{дв.н}} = \frac{4000}{148,75} = 26,89 \text{ Н}\cdot\text{м} \quad (2.5.7)(2.7)$$

Номінальна фазна напруга і номінальний фазний і лінійний струм статора при схемі з'єднання обмоток Y:

$$U_{1\phi н} = \frac{U_{1\text{ЛН}}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 219,393 \text{ В} \quad (2.5.8)(2.8)$$

$$I_{1\phi н} = \frac{P}{3 \cdot U_{1\phi н} \cdot \cos \varphi_n \cdot \eta_n} = \frac{4000}{3 \cdot 219,393 \cdot 0,84 \cdot 0,84} = 8,613 \text{ А} \quad (2.5.9)(2.9)$$

$$I_{1\phi н} = I_{1\text{ЛН}} = 8,613 \text{ А} \quad (2.5.10)(2.10)$$

де,

$I_{1\text{ЛН}}$  - струм, споживаний двигуном з мережі в номінальному режимі роботи.

Максимальний споживаний струм двигуна при прямому пуску:

$$I_{1\text{макс}} = k_i \cdot I_{1\text{лн}} = 6 \cdot 8,61 = 51,68 \text{ А} \quad (2.5.11)(2.11)$$

Критичний момент двигуна на природній характеристиці:

$$M_K = m_K \cdot M_{\text{дв.н}} = 2,2 \cdot 26,89 = 59,1 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.5.12)(2.12)$$

Пусковий момент двигуна при прямому пуску:

$$M_{\text{дв.пуск}} = m_{\text{п}} \cdot M_{\text{дв.н}} = 2 \cdot 26,89 = 53,78 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.5.13)(2.13)$$

### 2.3 Визначення параметрів схеми заміщення в абсолютних одиницях за довідковими технічними даними вибраного електродвигуна.

Струм фази статора при частковому завантаженні:

$$I_{1p} = \frac{p \cdot P_{\text{дв.н}}}{3 \cdot U_{1\text{фн}} \cdot \cos \varphi_p \cdot \eta_p} = \frac{0,75 \cdot 4000}{3 \cdot 219,39 \cdot 0,84 \cdot 0,84} = 6,459 \text{ А} \quad (2.6.1)(2.14)$$

Струм холостого ходу:

$$I_0 = \sqrt{\frac{I_{1p}^2 - \left[ \frac{p' \cdot (1 - S_H)}{(1 - p' \cdot S_H)} \cdot I_{1\text{фн}} \right]^2}{1 - \left[ \frac{p' \cdot (1 - S_H)}{(1 - p' \cdot S_H)} \right]^2}} = \sqrt{\frac{6,46^2 - \left[ \frac{0,75 \cdot (1 - 0,05)}{(1 - 0,75 \cdot 0,05)} \cdot 8,61 \right]^2}{1 - \left[ \frac{0,75 \cdot (1 - 0,05)}{(1 - 0,75 \cdot 0,05)} \right]^2}} = 1,59 \text{ А}$$

Критичне ковзання:

$$S_k = S_H \cdot \frac{m_k + \sqrt{m_k^2 - [1 - 2 \cdot S_H \cdot \beta \cdot (m_k - 1)]}}{1 - 2 \cdot S_H \cdot \beta \cdot (m_k - 1)} = 0,275 \quad (2.6.2)(2.15)$$

Приведений до обмотки статора активний опір обмотки ротора в номінальному режимі:

$$R'_2 = \frac{3 \cdot U_{1\text{фн}}^2 \cdot (1 - S_H)}{2 \cdot m_K \cdot P_{\text{дв.н}} \cdot C_1^2 \cdot \left( \beta + \frac{1}{S_k} \right)} = \frac{3 \cdot 219,39^2 \cdot (1 - 0,053)}{2 \cdot 2,2 \cdot 4000 \cdot 1,015^2 \cdot \left( 1 + \frac{1}{0,275} \right)} = 1,628$$

$$= \quad (2.6.3)$$

де,

$$C_1 = 1 + \frac{I_0}{2 \cdot k_i \cdot I_{1\text{фн}}} = \frac{1,589}{2 \cdot 6 \cdot 8,631} = 1,015 \quad (2.6.4)(2.16)$$

- коефіцієнт, що характеризує співвідношення:

$$\frac{X_{\mu} + X_{1\sigma}}{X_{\mu}} \quad (2.6.5) \quad (2.17)$$

Активний опір обмотки статора в номінальному режимі:

$$R_1 = R'_2 \cdot \beta \cdot C_1 = 1,628 \cdot 1 \cdot 1,0154 = 1,653 \text{ Ом} \quad (2.6.6)(2.18)$$

Індуктивний опір короткого замикання в номінальному режимі:

$$X_{\text{кн}} = R'_2 \cdot \gamma \cdot C_1 = 1,63 \cdot 3,49 \cdot 1,02 = 5,77 \text{ Ом} \quad (2.6.7)(2.19)$$

де,

$$\gamma = \sqrt{\left(\frac{1}{S_{\text{к}}}\right)^2 - \beta^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{0,28}\right)^2 - 1^2} = 3,49 \quad (2.6.8)(2.20)$$

– коефіцієнт, що характеризує співвідношення індуктивного опору короткого замикання і приведеного активного опору ротора.

Індуктивний опір розсіяння обмотки статора в номінальному режимі:

$$X_{1\sigma} = 0,42 \cdot X_{\text{кн}} = 0,42 \cdot 5,77 = 2,42 \text{ Ом} \quad (2.6.9)(2.21)$$

Індуктивність обмотки статора, обумовлена потоком розсіяння, в номінальному режимі:

$$L_{1\sigma} = \frac{X_{1\sigma}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1\text{н}}} = \frac{2,42}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 0,00771 \text{ Гн} \quad (2.6.10)(2.22)$$

Приведений до обмотки статора індуктивний опір розсіяння обмотки ротора в номінальному режимі:

$$X'_{2\sigma} = 0,58 \cdot \frac{X_{\text{кн}}}{C_1} = 0,58 \cdot \frac{5,77}{1,02} = 3,29 \text{ Ом} \quad (2.6.11) \quad (2.23)$$

Приведена індуктивність обмотки ротора, обумовлена потоком розсіяння, в номінальному режимі:

$$L'_{2\sigma} = \frac{X'_{2\sigma}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1\text{н}}} = \frac{3,29}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 0,01048 \text{ Гн} \quad (2.6.12)(2.24)$$

ЕРС гілки намагнічення, наведена потоком повітряного зазору (головним полем), в номінальному режимі:

$$E_1 = \sqrt{(U_{1\text{фн}} \cdot \cos \varphi_{\text{н}} - I_{1\text{фн}} \cdot R_1)^2 + (U_{1\text{фн}} \cdot \sin \varphi_{\text{н}} - I_{1\text{фн}} \cdot X_{1\sigma})^2} = 196,36 \quad (2.6.13)(2.25)$$

де,

$$\sin \varphi_{\text{н}} = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{\text{н}}} = \sqrt{1 - 0,84^2} = 0,54 \quad (2.6.14)$$

(2.26)

Індуктивний опір контура намагнічення (головний індуктивний опір):

$$X_m = \frac{X_\mu}{I_0} = \frac{196,36}{1,59} = 123,57 \text{ Ом} \quad (2.6.15) \quad (2.27)$$

Результуюча індуктивність, обумовлена магнітним потоком в повітряному зазорі, створюваною сумарною дією струмів статора (індуктивність контура намагнічення)

$$L_m = \frac{X_\mu}{2 \cdot \pi \cdot f_{1H}} = \frac{123,56}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 0,393 \text{ Гн} \quad (2.6.16) \quad (2.28)$$

## 2.4 Перевірка адекватності розрахункових параметрів двигуна.

При знайдених параметрах розраховуються значення номінального електромагнітного моменту двигуна:

$$M'_{\text{ЭМН}} = \frac{3 \cdot (U_{1\text{фн}})^2 \cdot R'_2}{\omega_0 \cdot S_H \cdot \left[ (X_{\text{кн}})^2 + \left( R_1 + \frac{R'_2}{S_H} \right)^2 + \left( \frac{R_1 \cdot R'_2}{S_H \cdot X_\mu} \right)^2 \right]} = 26,98 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.7.1) \quad (2.28)$$

$$M''_{\text{ЭМН}} = \frac{3}{2} \cdot z_p \cdot \left( \frac{L_m}{L_m + L_{2\sigma}} \right) \cdot \Psi_{2H} \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{I_{1H}^2 - I_0^2} = 15,46 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.7.2)$$

де,

$$\Psi_{2H} = \sqrt{2} \cdot I_0 \cdot L_m = \sqrt{2} \cdot 1,59 \cdot 0,39 = 0,88 \text{ Вб} \quad (2.7.3)$$

$$z_p = 1$$

Повинні виконуватися умови:

$$M_{\text{дв.н}} = 26,89 < M'_{\text{ЭМН}} = 26,98 \leq 1,1 \cdot M_{\text{дв.н}} = 29,58 \quad (2.7.4)$$

(2.29)

Якщо умови не виконуються, необхідно змінити заздалегідь прийняті значення ( $\cos \varphi_p$  \*  $\eta_p$ ) та  $\beta$ .

## 2.5 Вибір перетворювача частоти

Максимальний струм інвертора має бути більше максимального струму навантаження:

$$M_{\text{Эп.макс}} = M_{\text{дв.н}} \cdot m_m = 26,89 \cdot 1,6 = 43,02 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.8.1)(2.30)$$

$$I_{\text{и.макс}} = I_{1\text{лн}} \cdot \frac{M_{\text{Эп.макс}}}{M_{\text{дв.н}}} = 8,61 \cdot \frac{43,02}{26,89} = 13,78 \text{ А} \quad (2.8.2) \quad (2.31)$$

$$I_{\text{и.н}} = I_{\text{и.макс}} = 13,78 \text{ А} \quad (2.8.3) \quad (2.32)$$





Рисунок 2.2 – Зовнішній вигляд перетворювача частоти

Параметри перетворювача частоти зображенні у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 - Параметри перетворювача частоти

Модель	Кількість фаз на вході	$U_n, В$	$I_{ін}, В$	$I_{іmax}, В$	Рекомендована потужність двигуна, кВт
VLT2840	3	380-480	9.1	14.5	4.0

Загальні технічні дані перетворювача частоти серії VLT 2800:

- несуча частота: 3000–14000 Гц;
- частотний діапазон: 0,2 - 132 Гц, 1 - 1000 Гц;
- розширення по вихідній частоті: 0,013 Гц, 0,2 - 1000 Гц;
- живляча мережа: 380–480 В  $\pm$  10%; 48–62 Гц, 3 фази;
- коефіцієнт потужності 0,9/1 при номінальному навантаженні;
- перевантаження по струму: 160% впродовж 1 хвилини.
  
- діапазон регулювання в розімкненій системі: 1:10 від синхронної швидкості обертання;

- діапазон регулювання в замкнутій системі: 1:120 від синхронної швидкості обертання;
- точність швидкості обертання (розімкнений контур), об/хв: макс. погрішність  $\pm 150 - 3600$  об/хв;
- точність швидкості обертання (замкнутий контур), об/хв: макс. погрішність  $\pm 30 - 3600$  об/хв.

## 2.6 Розрахунок природної механічної характеристики електродвигуна.

Синхронна кутова частота обертання двигуна:

$$\omega_0 = \frac{\pi \cdot n_0}{30} = \frac{\pi \cdot 1500}{30} = 157,08 \frac{\text{рад}}{\text{с}} \quad (2.9.1) \quad (2.34)$$

Максимальна швидкість електроприводу:

$$\omega_{\text{эп.макс}} = 1,25 \cdot \omega_0 = 1,25 \cdot 157,08 = 196,35 \frac{\text{рад}}{\text{с}} \quad (2.9.2)(2.35)$$

Значення електромагнітного номінального моменту при номінальному ковзанні:

$$\begin{aligned} M_{\text{эм.сн}} &= \frac{3 \cdot U_{1,\text{фн}}^2 \cdot R'_2}{\omega_0 \cdot s_{\text{н}} \left[ X_{\text{кн}}^2 + \left( R_1 + \frac{R'_2}{s_{\text{н}}} \right)^2 + \left( \frac{R_1 \cdot R'_2}{s_{\text{н}} \cdot X_{\mu}} \right)^2 \right]} = \\ &= \frac{3 \cdot 219,39^2 \cdot 1,628}{157,08 \cdot 0,053 \left[ 5,77^2 + \left( 1,653 + \frac{1,628}{0,053} \right)^2 + \left( \frac{1,653 \cdot 1,628}{0,053 \cdot 123,57} \right)^2 \right]} \\ &= 27,416 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.9.3) \end{aligned}$$

$$M_{\text{эм.н}} = M_{\text{эм.сн}} = 27,416 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.9.4)$$

(2.36)

Значення кутової швидкості обертання двигуна:

$$\omega = \omega_0 \cdot (1 - s_{\text{н}}) = 157,08 \cdot (1 - 0,053) = 148,75 \frac{\text{рад}}{\text{с}} \quad (2.9.5)$$

(2.37)

Значення електромагнітного критичного моменту при критичному ковзанні:

$$M_{\text{ЭМ.СК}} = \left[ \frac{3 \cdot U_{1.\text{ФН}}^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot \left[ R_1 + \sqrt{(R_1^2 + X_{\text{КН}}^2)} \cdot \left[ 1 + \left( \frac{R_1}{X_\mu} \right)^2 \right] \right]} \right] = 63,145 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$M_{\text{ЭМ.К}} = M_{\text{ЭМ.СК}} = 63,145 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.9.6)$$

(2.38)

Момент тертя на валу двигуна:

$$M_{\text{с.ДВ}} = M_{\text{ЭМ.Н}} - M_{\text{ДВ.Н}} = 27,464 - 26,89 = 0,574 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.9.7)$$

(2.39)

Пусковий момент двигуна при прямому пуску:

$$M_{\text{ЭМ.П}} = m_{\text{П}} \cdot M_{\text{ДВ.Н}} = 2 \cdot 26,89 = 53,78 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.9.8)$$

(2.40)

$$\omega_{\text{М}} = \omega_0 \cdot (1 - S_{\text{К}}) = 72,728 \frac{\text{рад}}{\text{с}} \quad (2.9.9) \quad (2.41)$$

$$\omega_{1.\text{ЕСТ}}(s) = \omega_0 \cdot (1 - s) \quad (2.9.10)$$

(2.42)

де,  $s = 0,0001; 0,01 \dots 1$

$$M_{\text{ЭМ.ЕСТ}}(s) = \frac{3 \cdot U_{1.\text{ФН}}^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot s \left[ X_{\text{КН}}^2 + \left( R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + \left( \frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_\mu} \right)^2 \right]} \quad (2.9.11) \quad (2.43)$$

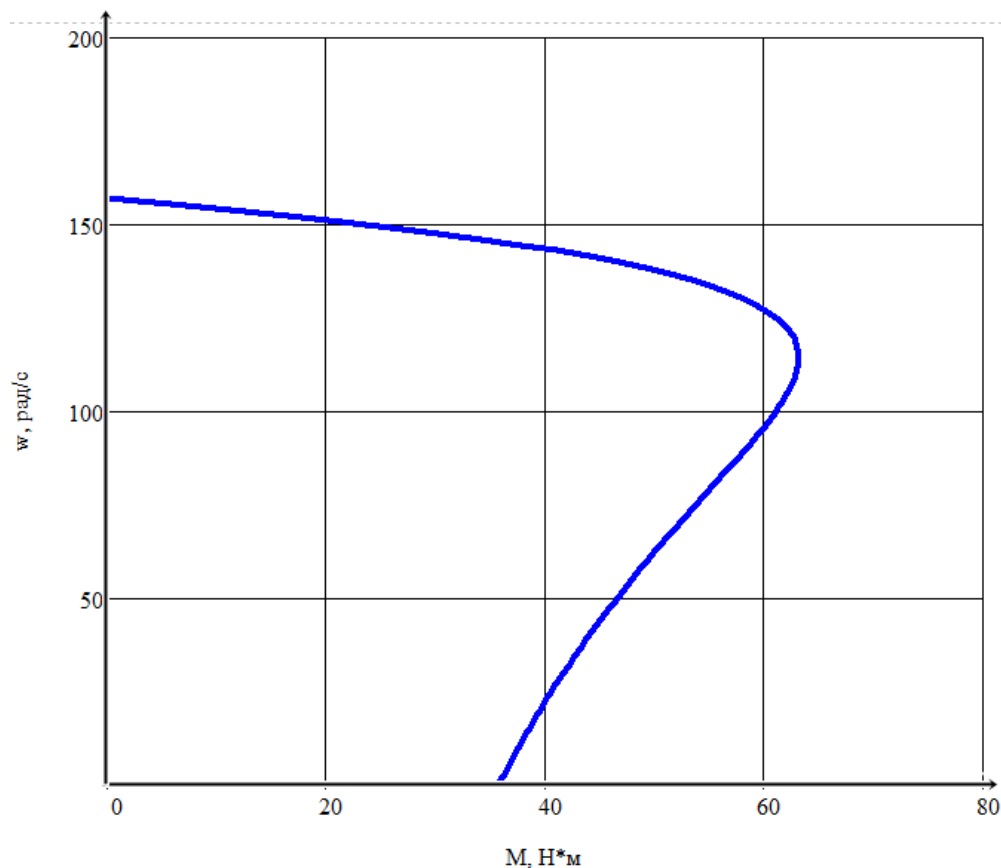


Рисунок 2.3 – Природна механічна характеристика електродвигуна

## 2.7 Розрахунок природних електромеханічних характеристик електродвигуна

Діюче значення струму холостого ходу:

$$\sin \varphi_2 = \frac{X_{KH}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s_H}\right)^2 + (X_{KH})^2 + \left(\frac{R_1 + R'_2}{s_H \cdot X_\mu}\right)^2}} =$$

$$\frac{5,77}{\sqrt{\left(1,653 + \frac{1,62}{0,053}\right)^2 + 5,77^2 + \left(\frac{1,653 + 1,62}{0,053 \cdot 123,57}\right)^2}} =$$

$$0,288 \quad (2.10.1) \quad (2.44)$$

Приведений до обмотки статора струм ротора:

$$I_0 = \frac{U_{1,\text{фн}}}{\sqrt{R_1^2 + (X_{1\sigma} + X_\mu)^2}} = \frac{219,39}{\sqrt{1,653^2 + (2,42 + 123,57)^2}} = 1,786 \text{ А} \quad (2.10.2) \quad (2.45)$$

Природні електромеханічні характеристики:

$$I'_2(s) = \frac{U_{1.\text{фн}}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + (X_{\text{кн}})^2 + \left(\frac{R_1 + R'_2}{s \cdot X_\mu}\right)^2}} \quad (2.10.3) \quad (2.46)$$

$$I_1(s) = \sqrt{I_0^2 + (I'_2(s))^2 + 2 \cdot I_0 \cdot I'_2(s) \cdot \sin \varphi_2} \quad (2.10.4) \quad (2.47)$$

$I'_2(s)$  – приведений до обмотки статора струм ротора, А

$I(s)$  – діюче значення фазного струму двигуна, А.

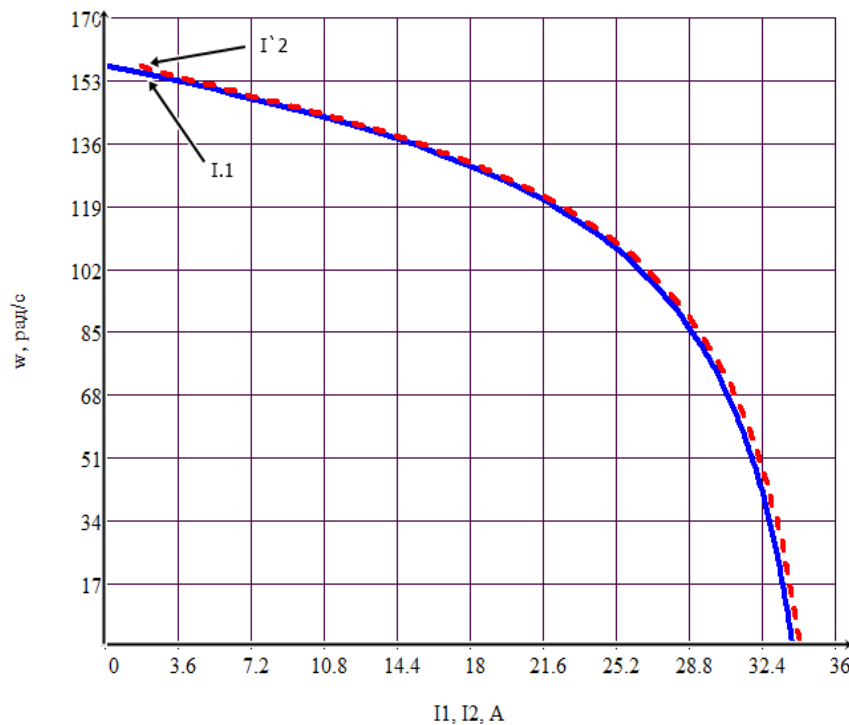


Рисунок 2.4 – Природні механічні характеристики асинхронного двигуна.

## 2.8 Розрахунок механічних і електромеханічних характеристик електроприводу при скалярному частотному управлінні.

$$s = 0,00001; 0,01 \dots 1 \quad \omega_0 = 157,08$$

$$f_{1\text{мин}} = 20 \text{ Гц}$$

$$f_{1\text{н}} = 50 \text{ Гц}$$

$$\omega_1(s, f_1) = \omega_0 \cdot \left(\frac{f_1}{f_{1\text{н}}}\right) \cdot (1 -$$

$$s) \frac{\text{рад}}{\text{с}} \quad (2.11.1)(2.48)$$

$$M_{\text{эм}}(s, f_1) = \frac{3 \cdot \left(U_{1.\text{фн}} \cdot \frac{f_1}{f_{1\text{н}}}\right)^2 \cdot R'_2}{\omega_0 \cdot \left(\frac{f_1}{f_{1\text{н}}}\right) \cdot s \cdot \left[ \left(X_{\text{кн}} \cdot \frac{f_1}{f_{1\text{н}}}\right)^2 + \left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R'_2}{s \cdot X_\mu} \cdot \frac{f_{1\text{н}}}{f_1}\right)^2 \right]}$$

При частоті більше за номінальну:

$$M_{\text{эм1}}(s, f_1) = \frac{3 \cdot \left(U_{1.\text{фн}} \cdot \frac{f_{1\text{н}}}{f_{1\text{н}}}\right)^2 \cdot R'_2}{\omega_0 \cdot \left(\frac{f_1}{f_{1\text{н}}}\right) \cdot s \cdot \left[ \left(X_{\text{кн}} \cdot \frac{f_1}{f_{1\text{н}}}\right)^2 + \left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R'_2 \cdot f_{1\text{н}}}{s \cdot X_\mu \cdot f_1}\right)^2 \right]} \quad (2.11.2) (2.49)$$

За результатами розрахунку будується:

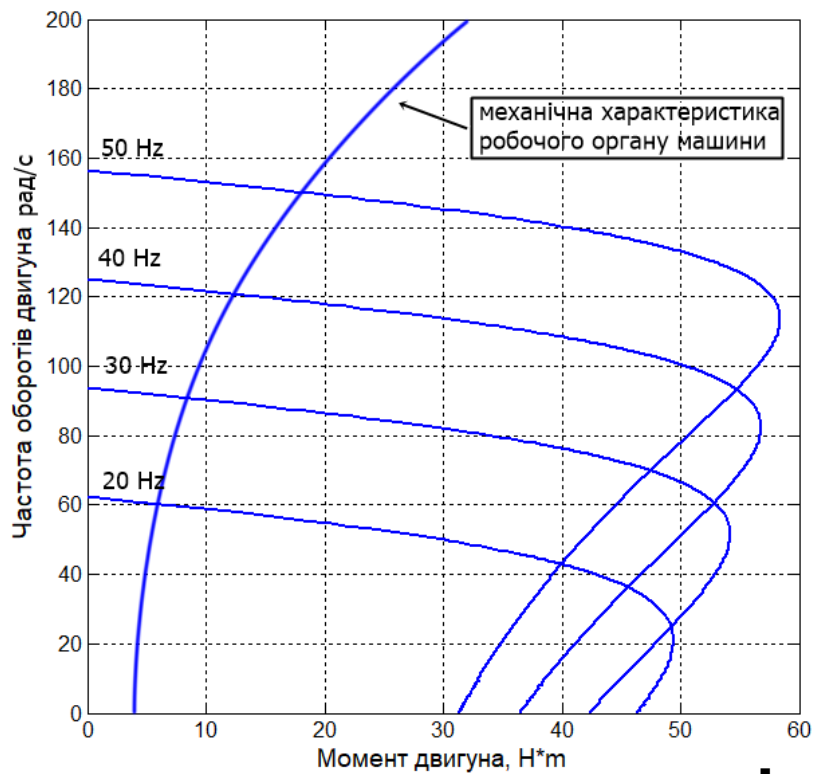


Рисунок 2.5 – Механічні характеристики електроприводу при скалярному частотному управлінні

Сімейство електромеханічних характеристик:

$$\omega_{11}(s, f_1) = \omega_0 \cdot \left(\frac{f_1}{f_{1H}}\right) \cdot (1 - s) \quad (2.11.3)$$

(2.50)

$$\sin \varphi_{22}(s, f_1) = \frac{X_{KH} \cdot \left(\frac{f_1}{f_{1H}}\right)}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_1}{s}\right)^2 + X_{KH}^2 \cdot \left(\frac{f_1}{f_{1H}}\right)^2 + \left[\frac{R_1 + R'_2}{s \cdot X_\mu} \cdot \left(\frac{f_{1H}}{f_1}\right)\right]^2}} \quad (2.11.4)(2.51)$$

Приведений струм ротора до обмотки статора :

$$I_{00}(f_1) = \frac{U_{1\Phi H} \cdot \left(\frac{f_1}{f_{1H}}\right)}{\sqrt{R_1^2 + (X_{1\sigma} + X_\mu)^2 \cdot \left(\frac{f_1}{f_{1H}}\right)^2}} \quad (2.11.5) \quad (2.52)$$

Природні електромеханічні характеристики:

$$I'_{22}(s, f_1) = \frac{U_{1\phi H} \cdot \left(\frac{f_1}{f_{1H}}\right)^2}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + X_{KH} \cdot \left(\frac{f_1}{f_{1H}}\right)^2 + \left[\frac{R_1 + R'_2}{s \cdot X_\mu} \cdot \left(\frac{f_1}{f_1}\right)\right]^2}} \quad (2.11.6) \quad (2.53)$$

$$I_{11}(s, f_1) == \sqrt{(I_{00}(f_1))^2 + (I'_{22}(s, f_1))^2 + 2 \cdot I_{00}(f_1) \cdot I'_{22}(s, f_1) \cdot \sin \varphi_{22}(s, f_1)} \quad (2.11.7)(2.54)$$

При частоті більше за номінальну:

$$\sin \varphi_{23}(s, f_1) = \frac{X_{KH} \cdot \left(\frac{f_{1H}}{f_1}\right)}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + X_{KH}^2 \cdot \left(\frac{f_1}{f_{1H}}\right)^2 + \left[\frac{R_1 + R'_2}{s \cdot X_\mu} \cdot \left(\frac{f_{1H}}{f_1}\right)\right]^2}} \quad (2.11.8) \quad (2.55)$$

$$I_{03}(f_1) = \frac{U_{1\phi H} \cdot \left(\frac{f_{1H}}{f_1}\right)}{\sqrt{R_1^2 + (X_{1\sigma} + X_\mu)^2 \cdot \left(\frac{f_1}{f_{1H}}\right)^2}} \quad (2.11.9) \quad (2.56)$$

$$I'_{23}(s, f_1) = \frac{U_{1\phi H} \cdot \left(\frac{f_{1H}}{f_1}\right)^2}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + X_{KH} \cdot \left(\frac{f_1}{f_{1H}}\right)^2 + \left[\frac{R_1 + R'_2}{s \cdot X_\mu} \cdot \left(\frac{f_{1H}}{f_1}\right)\right]^2}} \quad (2.11.10) \quad (2.57)$$

$$I_{13}(s, f_1) == \sqrt{(I_{03}(f_1))^2 + (I'_{23}(s, f_1))^2 + 2 \cdot I_{03}(f_1) \cdot I'_{23}(s, f_1) \cdot \sin \varphi_{23}(s, f_1)} \quad (2.11.11)(2.58)$$

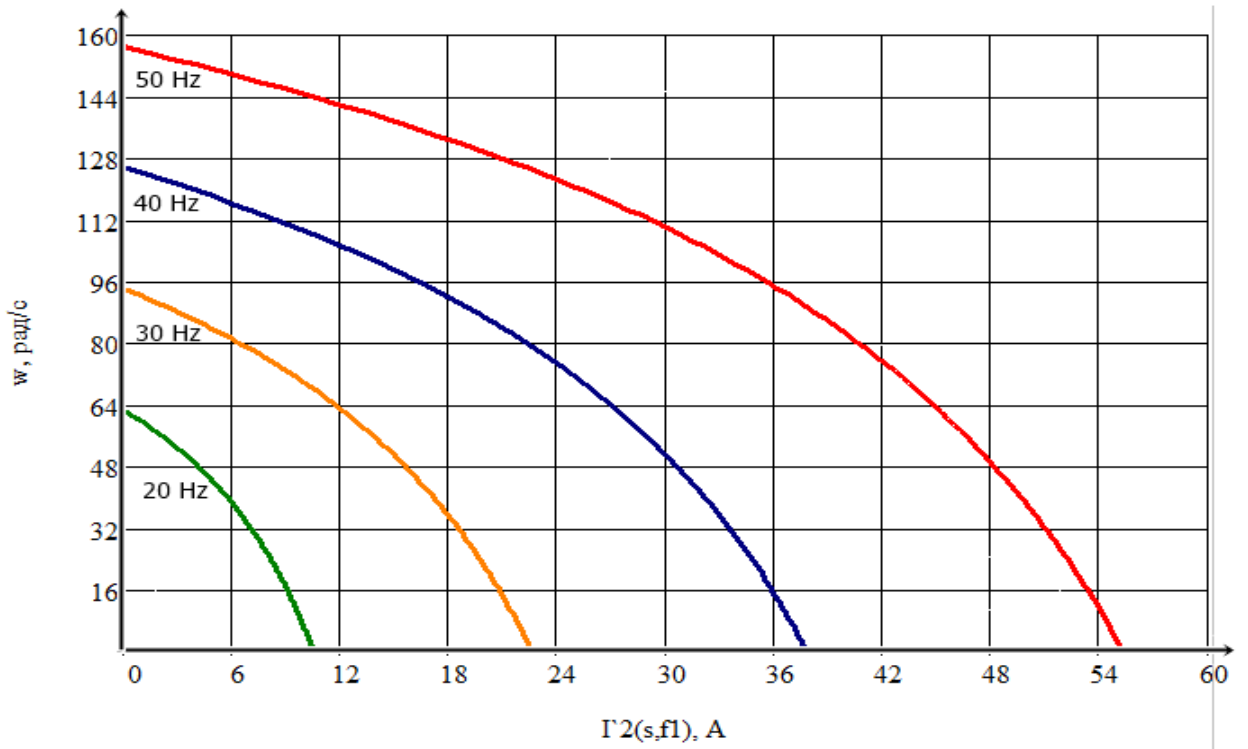


Рисунок 2.6 – Електромеханічні характеристики  $\Gamma^2(s, f_1)$

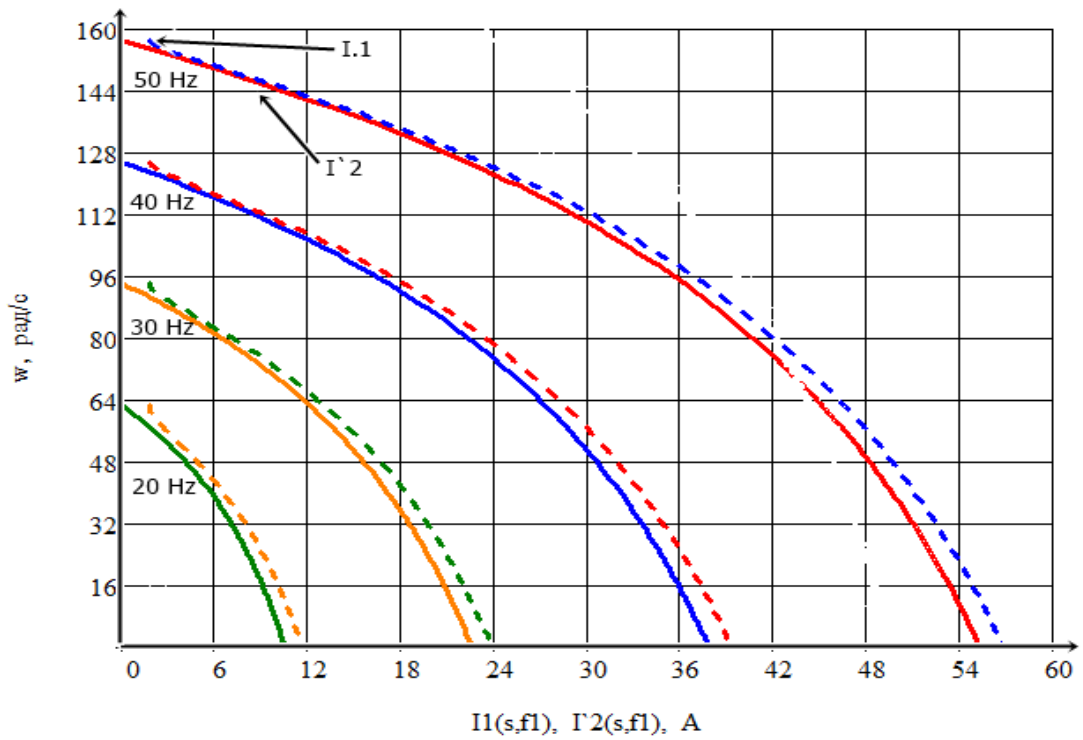


Рисунок 2.7 – Електромеханічні характеристики  $I_1(s, f_1), I'_2(s, f_1)$

## 2.9 Розрахунок параметрів перетворювача

Максимальне значення напруги управління:

$$U_{\text{уп.макс}} = 10 \text{ В}$$

Максимальне значення коефіцієнта посилення перетворювача:

$$k_{\text{и}} = \frac{(\sqrt{2} \cdot U_{1.\text{фн}})}{U_{\text{уп.макс}}} = \frac{\sqrt{2} \cdot 219,39}{10} = 31,82 \quad (2.12.1)(2.59)$$

Несуча частота інвертора, приймаємо за:  $f_{\text{шим}} = 4000 \text{ Гц}$

Еквівалентна постійна часу перетворювача:

$$T_{\text{шим}} = \frac{1}{f_{\text{шим}}} = \frac{1}{4000} = 0,0003 \text{ с} \quad (2.12.2)(2.60)$$

$$T_{\text{и}} = T_{\text{шим}} = 0,0003 \text{ с} \quad (2.12.3)(2.61)$$

## 2.10 Розрахунок параметрів електродвигуна.

Еквівалентні індуктивності обмоток:

- статора:

$$L_1 = L_{1\sigma} + L_m = 0,008 + 0,393 = 0,401 \text{ Гн} \quad (2.13.1)(2.62)$$

-ротора:

$$L_2 = L'_{2\sigma} + L_m = 0,01 + 0,393 = 0,404 \text{ Гн} \quad (2.13.2)(2.63)$$

Коефіцієнт розсіяння:

$$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_1 \cdot L_2} = 1 - \frac{0,393^2}{0,401 \cdot 0,404} = 0,044 \quad (2.13.3)(2.64)$$

Еквівалентний опір:

$$R_{\Sigma} = R_1 + R_2' \cdot \frac{L_m^2}{L_2^2} = 1,653 + 1,628 \cdot \frac{0,393^2}{0,404^2} = 3,199 \text{ Ом} \quad (2.13.4)(2.65)$$

Електромагнітні постійні часу:

$$T_{\vartheta} = \frac{(\sigma \cdot L_1)}{R_3} = \frac{(0,044 \cdot 0,401)}{3,199} = 0,006 \text{ с} \quad (2.13.5) \quad (2.70)$$

$$T_2 = \frac{L_2}{R_2'} = \frac{0,404}{1,628} = 0,248 \text{ с} \quad (2.13.6) \quad (2.71)$$

## 2.11 Розрахунок параметрів ланцюга для замкнутої по струму системи скалярного частотного управління асинхронного електроприводу.

а) Параметри ланцюга позитивного зворотного зв'язку по струму в каналі регулювання напруги, використовуючи методику налаштування контура **IR- компенсації** (компенсації моменту).

Коефіцієнт передачі ланцюга зворотного зв'язку вибирається з умови:

$$k_{iR} = 0,8 \cdot R_1 = 0,8 \cdot 1,653 = 1,323 \quad (2.14.1)(2.72)$$

Еквівалентна електромагнітна постійна часу ланцюгів статора і ротора асинхронного двигуна:

$$T_{\vartheta} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_{1H} \cdot S_K} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0,53} = 0,006 \text{ с} \quad (2.14.2)(2.73)$$

Постійна часу ланцюга зворотного зв'язку:

$$T_{iR} = 4 \cdot T_{\vartheta} = 4 \cdot 0,006 = 0,024 \text{ с} \quad (2.14.3)(2.74)$$

б) Параметри ланцюга позитивного зворотного зв'язку по струму в каналі регулювання частоти:

коефіцієнт передачі ланцюга зворотного зв'язку по струму:

$$\frac{f_{1H} \cdot S_H}{I_{1\phi} - I_0} = \frac{50 \cdot 0,053}{4,613 - 1,786} = 0,937 > k_{if.1} < \frac{f_{1H} \cdot S_H}{I_{1\phi}} = \frac{50 \cdot 0,053}{4,613} = 0,574 \quad (2.14.4)(2.75)$$

Постійна часу ланцюга зворотного зв'язку:

$$T_{if.1} = 4 \cdot T_{\vartheta} = 4 \cdot 0,006 = 0,024 \text{ с} \quad (2.14.5)(2.76)$$

с) Параметри ланок структурної схеми асинхронного двигуна при управлінні зміною частоти:

Модуль жорсткості лінеаризованої механічної характеристики асинхронного двигуна:

$$P_Z = 1$$

$$\beta = \frac{M_{эм.к} \cdot P_Z}{\pi \cdot f_{1н} \cdot S_k} = \frac{63,145}{3,14 \cdot 50 \cdot 0,537} = 0,749 \quad (2.14.6)(2.77)$$

Еквівалентна електромагнітна постійна часу ланцюгів статора і ротора асинхронного двигуна:

$$T_{э.з} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_{1н} \cdot S_k} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 0,53} = 0,006 \text{ с} \quad (2.14.7)(2.78)$$

Приведений момент інерції електроприводу:

$$J'_{мех} = 3 \cdot J_{дв} = 3 \cdot 0,05 = 0,15 \text{ кг} \cdot \text{см}^2 \quad (2.14.8)(2.79)$$

$$J_{э} = J_{дв} \cdot J'_{мех} = 0,05 + 0,15 = 0,2 \text{ кг} \cdot \text{см}^2 \quad (2.14.9) \quad (2.80)$$

Електромеханічна постійна часу електроприводу:

$$T_M = \frac{J_{э}}{\beta} = \frac{0,2}{0,749} = 0,267 \quad (2.14.10) \quad (2.81)$$

Коефіцієнт зміни швидкості ідеального холостого ходу асинхронного двигуна від відхилення частоти живлячої напруги:

$$k_{\omega} = \frac{2 \cdot \pi}{P_Z} = \frac{2 \cdot 3,14}{1} = 6,28 \quad (2.14.11) \quad (2.82)$$

Параметри ланок контура швидкості

Значення максимального завдання на вході контура швидкості:

- у відносних одиницях:

Коефіцієнт, що враховує можливе перерегулювання швидкості, приймаємо:

$$\sigma_c = 1,1$$

$$N_{\text{зс.макс}} = \frac{1}{\sigma_c} = \frac{1}{1,1} = 0,909 \quad (2.14.12)(2.83)$$

тогда  $N_{\text{ос.макс}} = 1$

$$k_c = \frac{1}{\sigma_c \cdot \omega_{\text{эп.макс}}} = \frac{1}{1,1 \cdot 196,35} = 0,005 \quad (2.14.13)(2.84)$$

Максимальна швидкість приводу:

$$n_{\text{ацп.дс}} = 12$$

$$k_{\text{ос.с}} = \frac{1}{0,5 \cdot 2^{n_{\text{ацп.дс}}}} = \frac{1}{0,5 \cdot 2^{12}} = 0,000488 \quad (2.14.14)(2.85)$$

- в одиницях виміру швидкості (рад/с):

$$N_{\text{зс.макс}} = \omega_{\text{эп.макс}} = 196,35 \quad (2.14.15) (2.85)$$

тогда,  $k_c = 1$

$$k_{\text{дс}} = \frac{0,5 \cdot 2^{n_{\text{ацп.дс}}}}{\sigma_c \cdot \omega_{\text{эп.макс}}} = \frac{0,5 \cdot 2^{12}}{1,1 \cdot 196,35} = 9,482 \quad (2.14.16)(2.87)$$

$$k_{\text{ос}} = \frac{1}{k_{\text{дс}}} = \frac{1}{9,482} = 0,105 \quad (2.14.17)(2.88)$$

- у дискретах датчика швидкості:

$$N_{\text{зс.макс}} = k_{\text{дс}} \cdot \omega_{\text{эп.макс}} = 9,48 \cdot 196,35 = 1861,82 \quad (2.14.18)(2.89)$$

тогда,

$$k_c = k_{\text{дс}} = 9,482 \quad (2.14.19) \quad (2.90)$$

$$k_{\text{ос}} = 1$$

Коефіцієнт перетворювача сигналу управління в частоту напруги двигуна:

$$k_{f1} = \frac{\omega_{\text{эп.макс}} \cdot p_z}{2 \cdot \pi \cdot N_{\text{зс.макс}}} = \frac{196,35}{2 \cdot 3,14 \cdot 196,35} = 0,159 \quad (2.14.20)(2.91)$$

Коефіцієнт зворотного зв'язку за швидкістю:

$$k_c = \frac{N_{\text{зс.макс}}}{\omega_{\text{эп.макс}}} = \frac{196,35}{196,35} = 1 \quad (2.14.21) \quad (2.92)$$

Коефіцієнт датчика швидкості на базі тахогенератора та АЦП:

$$k_{\text{дс}} = 9,48$$

Число імпульсів на оборот валу датчика швидкості, імпульс/об:

$$n_{\text{дс}} = 2500$$

$$n_{\text{ос}} = 40$$

Інтервал зміни швидкості:

$$T_{\text{изм}} = n_{\text{ос}} \cdot T_{\text{шим}} = 40 \cdot 0,003 = 0,012 \text{ с} \quad (2.14.22) \quad (2.93)$$

Коефіцієнт передачі імпульсного датчика швидкості з системою оцифрування:

$$k_{\text{дис}} = \frac{n_{\text{дс}}}{2 \cdot \pi} \cdot T_{\text{изм}} = \frac{2500}{2 \cdot 3,14} \cdot 0,012 = 3,979 \quad (2.14.23)(2.94)$$

Коефіцієнт узгодження сигналів імпульсного датчика швидкості і завдання на вході контура швидкості:

$$k_{\text{ос}} = \frac{k_{\text{с}}}{k_{\text{дс}}} = \frac{0,00463}{9,482} = 0,0004883 \quad (2.14.24) \quad (2.95)$$

Відповідно до структурної схеми передатна функція асинхронного двигуна при управлінні частотою живлячої напруги записується у виді:

$$W(p)_{\text{дв}} = \frac{\Delta f_1}{\Delta \omega} = \frac{k_{\omega}}{T_{\text{м}} \cdot T_{\text{з}} \cdot p^2 + T_{\text{м}} \cdot p + 1} \quad (2.14.25)(2.96)$$

що в загальному випадку відповідає коливальній ланці.

При виконанні умови  $T_{\text{м}} \geq 4 \cdot T_{\text{з}}$  двигун може бути представлений аперіодичною ланкою другого порядку:

$$W(p)_{\text{дв}} = \frac{k_{\omega}}{(T_1 \cdot p + 1)(T_2 \cdot p + 1)} \quad (2.14.26)(2.97)$$

де,  $4 \cdot T_{\text{з}} = 0,022$

$$T_1 = \frac{T_M}{2} \cdot \left(1 + \sqrt{1 - \frac{4 \cdot T_3}{T_M}}\right) = \frac{0,267}{2} \cdot \left(1 + \sqrt{1 - \frac{4 \cdot 0,006}{0,267}}\right) = 0,261 \quad (2.14.27)(2.98)$$

$$T_2 = \frac{T_M}{2} \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{4 \cdot T_3}{T_M}}\right) = \frac{0,267}{2} \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{4 \cdot 0,006}{0,267}}\right) = 0,006 \quad (2.14.28)(2.99)$$

- передатна функція ПІ-регулятора швидкості:

$$W(p)_{pc} = k_{pc} \cdot \frac{T_{pc} \cdot p + 1}{T_{pc} \cdot p} \quad (2.14.29)(2.100)$$

- постійна часу регулятора:

$$T_{pc} = 2 \cdot 2 \cdot T_2 = 2 \cdot 2 \cdot 0,006 = 0,023 \quad (2.14.30)(2.101)$$

- коефіцієнт посилення регулятора:

$$k_{pc} = \frac{T_1}{k_{f1} \cdot k_{\omega} \cdot k_c \cdot 2 \cdot T_2} = \frac{0,261}{0,159 \cdot 6,28 \cdot 2 \cdot 0,248} = 0,527 \quad (2.14.31)(2.102)$$

- постійна часу вхідного фільтру :

$$T_{\phi, \text{вх}} = T_{pc} = 0,023 \quad (2.14.32)(2.103)$$

- передатна функція фільтру на вході контура:

$$W_{\phi, \text{вх}} = \frac{1}{T_{\phi, \text{вх}} \cdot p + 1} = \frac{1}{0,023 \cdot 2 + 1} = 0,956 \quad (2.14.33)(2.104)$$

## 2.12 Розрахунок параметрів структурної схеми контура обмеження струму з ПІ-регулятором і аналоговим датчиком струму.

Мала постійна часу в прямому каналі контура струму:

$$T_{\mu, \text{тп}} = 2 \cdot T_{\text{шим}} = 2 \cdot 0,00025 = 0,0005 \text{ с} \quad (2.15.1)(2.105)$$

Мала постійна часу ланцюга зворотного зв'язку контура струму:

$$T_{\mu, \text{то}} = T_{\text{шим}} = 0,0003 \text{ с} \quad (2.15.2)(2.106)$$

Інтервал квантування сигналів в ланцюзі зворотного зв'язку контура струму:

$$T_{\text{ос.т}} = T_{\text{шим}} = 0,0003 \text{ с} \quad (2.15.3)(2.107)$$

Постійна часу аналогового фільтру в ланцюзі виміру струму:

$$T_{\text{ф.от}} = 0 \text{ с}$$

Розрядність АЦП датчика струму, приймаємо:

$$n_{\text{ацп.дт}} = 14$$

Коефіцієнт, що враховує можливе перерегулювання струму, приймаємо:

$$\sigma_{\text{т}} = 1,1$$

Максимальне значення струму приводу, приймаємо:

$$I_{\text{эп.макс}} = 1,5 \cdot I_{1\text{ф}} = 1,5 \cdot 4,613 = 6,92 \text{ А} \quad (2.15.4)(2.108)$$

Коефіцієнт передачі датчика струму:

$$k_{\text{дт}} = \frac{(0,5 \cdot 2^{n_{\text{ацп.дт}}})}{\sigma_{\text{т}} \cdot (\sqrt{2} \cdot I_{\text{эп.макс}})} = \frac{(0,5 \cdot 2^{14})}{1,1 \cdot (\sqrt{2} \cdot 6,92)} = 761,04 \quad (2.15.5)(2.109)$$

Максимальне значення завдання на вході контура струму у відносних одиницях:

$$N_{\text{зт.макс}} = \frac{1}{\sigma_{\text{т}}} = \frac{1}{1,1} = 0,909 \quad (2.15.6)(2.110)$$

тоді,  $N_{\text{от.макс}} = 1$

$$k_{\text{т}} = \frac{1}{\sigma_{\text{т}} \cdot I_{\text{эп.макс}}} = \frac{1}{1,1 \cdot 6,92} = 0,131 \quad (2.15.8)(2.111)$$

$$k_{\text{ос.т}} = \frac{1}{0,5 \cdot 2^{n_{\text{ацп.дт}}}} = \frac{1}{0,5 \cdot 2^{14}} = 0,0001 \quad (2.15.9)(2.112)$$

- у одиницях виміру струму (А):

$$N_{\text{зт.макс}} = I_{\text{эп.макс}} = 6,92 \quad (2.15.10)(2.113)$$

тоді  $k_T = 1$

$$k_{\text{ос.т}} = \frac{1}{k_{\text{дт}}} = \frac{1}{761,04} = 0,001 \quad (2.15.11)(2.114)$$

- у дискретах датчика струму з АЦП:

$$N_{\text{зт.макс}} = k_{\text{дт}} \cdot I_{\text{эп.макс}} = 761,04 \cdot 6,92 = 5266,017 \quad (2.15.12) (2.115)$$

тоді,

$$k_T = k_{\text{дт}} = 761,04 \quad (2.15.13)(2.116)$$

$$k_{\text{ос.т}} = 1$$

Вибираємо  $N_{\text{зт.макс}}$  у одиницях виміру струму ( $A$ ).

### Параметри налаштування контура обмеження струму

Передатна функція ПІ-регулятора обмеження струму:

$$W(p)_{\text{рот}} = k_{\text{рот}} \cdot \frac{T_{\text{рот}} \cdot p + 1}{T_{\text{рот}} \cdot p} \quad (2.15.14)(2.117)$$

Коефіцієнт передачі по каналу управління частотою  $A/\Gamma\omega$ :

$$k_{if} = \left( \frac{U_{1.\text{лн}}}{f_{1н}} \right) \cdot \frac{1}{R_3} = \frac{380}{50} \cdot \frac{1}{3,199} = 2,376 \quad (2.15.15)(2.118)$$

Коефіцієнт типового налаштування контура струму на модульний оптимум (МО):

$$a_T = 2$$

Коефіцієнт апроксимації ланки чистого запізнювання аперіодичною ланкою, приймаємо:

$$n_T = 2$$

Еквівалентна мала постійна часу оптимізованого контура струму:

$$T_{\text{зу.и}} = T_{\text{шим}} = 0,0003 \text{ с} \quad (2.15.16)(2.119)$$

$$T_{\mu.тэ} = \left( \frac{T_{oc.т}}{n_T} \right) + T_{зу.и} + T_{ф.от} = \frac{0,00025}{2} + 0,00025 + 0 = 0,000375 \text{ с} \quad (2.15.17)(2.120)$$

Коефіцієнт посилення регулятора струму при регулюванні по каналу управління частотою інвертора:

$$k_{рот.f} = \frac{T_э}{k_{if} \cdot k_T \cdot a_T \cdot T_{\mu.тэ}} = \frac{0,006}{2,376 \cdot 0,131 \cdot 2 \cdot 0,000375} = 23,825 \quad (2.15.18)(2.121)$$

Коефіцієнт передачі по каналу управління напругою А/В:

$$k_{iu} = \frac{1}{R_3} = \frac{1}{3,199} = 0,313 \quad (2.15.19)(2.122)$$

При регулюванні по каналу управління напругою інвертора:

$$k_{рот.u} = \frac{T_э}{k_{if} \cdot k_T \cdot a_T \cdot T_{\mu.тэ}} = \frac{0,006}{2,376 \cdot 0,313 \cdot 2 \cdot 0,000375} = 23,825 \quad (2.15.20)(2.123)$$

$$k_T = \frac{N_{эт.макс}}{I_{эп.макс}} = \frac{0,909}{6,92} = 0,131 \quad (2.15.21)(2.124)$$

Постійна часу регулятора струму:

$$T_{рот} = T_э = 0,006 \text{ с} \quad (2.15.22)(2.125)$$

### 2.13 Висновки та пропозиції

В розділі 2 Приведені розрахунок потужності і вибір АД двигуна електропривода гідратаційного обладнання та вибір ПЧ для АД електропривода гідратора К-6,0.

Розроблена параметрична схема. Обґрунтований вибір каналів контролю і управління нейтралізатором, розроблений новий метод автоматичного керування електропривода коагулятора, обрані прилади і пристрої для контролю та управління електромеханічної системи процесу нейтралізації..

### 3. ДОСЛІДЖЕННЯ АСР ЕЛЕКТРОПРИВОДА НЕЙТРАЛІЗАТОРА НА ЕОМ

#### 3.1 Постановка задачі моделювання роботи електропривода на ЕОМ

Одним із важливіших елементів при створенні регулюючого електропривода є розробка енергоефективних законів управління і підвищення ККД самої машини. Метою математичного моделювання є створення системи управління асинхронним електроприводом і забезпечення максимального моменту на валу двигуна при низьких обертах. Тому велике значення має не тільки вибір системи моделювання, але і адекватність самої моделі до процесів, які відбуваються у перетворювачі. Велике значення при векторному управлінні має система координат, тому рівняння руху розглядаються не в стаціонарній системі координат, а системі координат Парка – Горева [5].

Це дозволило будувати системи управління з асинхронним двигуном (АД) за тими ж принципами, що і системи управління з двигуном постійного струму. При цьому характеристики асинхронного двигуна становляться близькими до характеристик двигуна постійного струму, це дозволяє суттєво підвищити економічну ефективність електропривода з АД.

Моделювання роботи асинхронної машини у режимах двигуна або генератора можна провести за допомогою блоку Asynchronous Machine у пакеті програм MATLAB. Піктограми машини приведені на рис. 3.1.

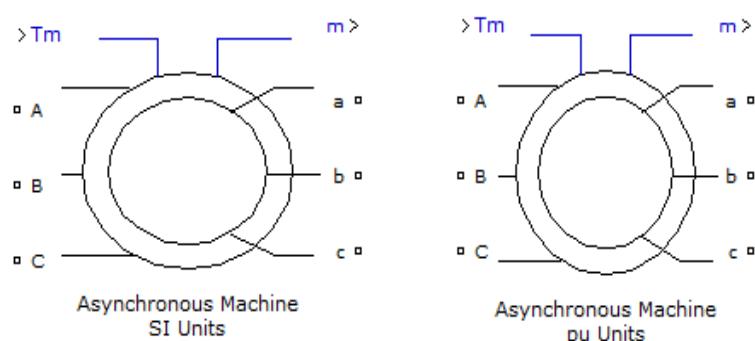


Рисунок 3.1.1 - Піктограми асинхронної машини.

Режим роботи визначається знаком електромагнітного моменту машини. Порти моделі  $A$ ,  $B$  і  $C$  є виводами обмоток статора машини, а порти  $a$ ,  $b$  і  $c$  – обмотки ротора машини. Порт  $Tm$  призначений для подавання моменту опору руху. На вихідному порту  $m$  формується векторний сигнал, що складається із 21 елемента: струмів, потоків і напруг ротора і статора у нерухомій і обіговій системах координат, електромагнітного моменту, кутової частоти обертання вала, а також його кутового положення. Для зручності витягання змінних машини з вектора в бібліотеці Sim Power Systems передбачений блок Machines Measurement Demux. Модель асинхронної машини містить в себе модель електричної частини, яка представлена моделлю простору стану четвертого порядку, і модель механічної частини у вигляді системи другого порядку. Всі електричні змінні і параметри машини приведені до статора. Вихідні рівняння електричної частини машини записані для двофазної ( $dq$ -вісі) системи координат. На рис. 3.2 приведена схема заміщення машини.

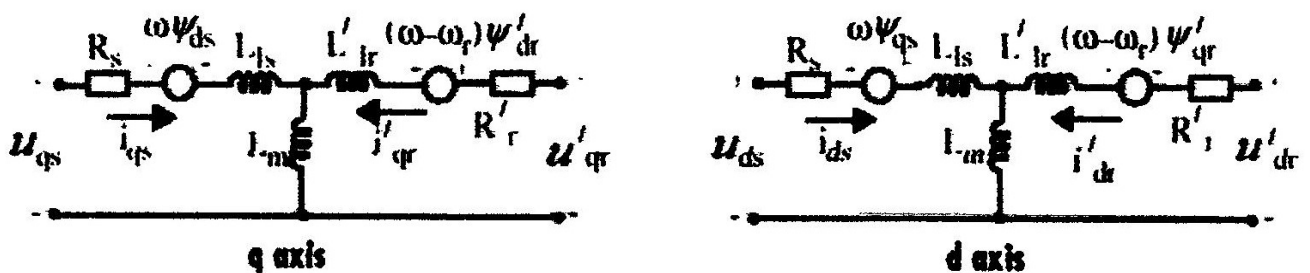


Рисунок 3.1.2- Схема заміщення асинхронної машини:

Режим роботи визначається знаком електромагнітного моменту машини. Порти моделі  $A$ ,  $B$  і  $C$  є виводами обмоток статора машини, а порти  $a$ ,  $b$  і  $c$  – обмотки ротора машини. Порт  $Tm$  призначений для подачі моменту опору руху. На вихідному порту  $m$  формується векторний сигнал, який складається з 21 елемента: струмів, потоків і напруги ротора і статора в нерухомих системах координат, електромагнітного моменту, кутової частоти обертання вала, а також його кутового положення, що обертаються.

Для зручності витягання змінних машини з вектора в бібліотеці Sim Power

Systems передбачений блок Machines Measurement Demux. Модель асинхронної машини включає модель електричної частини, яка представлена моделлю простору станів четвертого порядку, і моделлю механічної частини у вигляді системи другого порядку. Всі електричні змінні і параметри машини приведені до статора. Вихідні рівняння електричної частини машини записані для двофазної (dq-вісі) системи координат.

Рівняння електричної частини машини мають вигляд:

$$u_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d}{dt} \cdot \psi_{qs} + \omega \psi_{ds},$$

$$u'_{dr} = R'_r i'_{dr} + \frac{d}{dt} \psi'_{dr} - (\omega - \omega_r) \psi'_{qr},$$

$$T_e = 1,5(\psi_{ds} i_{qs} - \psi_{qs} i_{ds}),$$

де:

$$\psi_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i'_{qr}, \quad \psi_{ds} = L_s i_{qs} + L_m i'_{dr}, \quad \psi'_{qr} = L'_r i'_{qr} + L_m i_{qs},$$

$$\psi'_{dr} = L'_r i'_{dr} + L_m i_{ds}, \quad L_s = L_{ls} + L_m, \quad L'_r = L'_{lr} + L_m.$$

Індекси в системі рівнянь машини мають наступні значення:

- $d$  – проекція змінної на вісь  $d$ ;
- $q$  – проекція змінної на вісь  $q$ ;
- $r$  – індекс, який позначає параметр або змінну ротора;
- $s$  – індекс, який позначає параметр або змінну статора;
- $l$  – індуктивність розсіювання;
- $m$  – індуктивність кола намагнічування.

Механічна частина машини описується двома рівняннями:

$$\frac{d}{dt} \omega_m = \frac{1}{2H} (T_e - F \omega_m - T_m),$$

$$\frac{d}{dt} \theta_m = \omega_m.$$

Змінні в рівняннях машини мають такі значення:

- $R_s, L_{ls}$  – активний опір і індуктивність розсіювання статора;
- $R'_r, L'_{lr}$  – активний опір і індуктивність розсіювання ротора;

- $L_m$  – індуктивність кола намагнічування;
- $L_s, L'_r$  – повні індуктивності статора і ротора;
- $U_{qs}, i_{qs}$  – проекції напруги і струму статора на вісь  $q$ ;
- $u'_{qr}, i'_{qr}$  – проекції напруги і струму ротора на вісь  $q$ ;
- $u_{ds}, i_{ds}$  – проекції напруги і струму статора на вісь  $d$ ;
- $u'_{dr}, i'_{dr}$  – проекції напруги і струму ротора на вісь  $d$ ;
- $Y_{ds}, Y_{qs}$  – проекції потокозчеплення статора на вісі  $d$  і  $q$ ;
- $\psi'_{dr}, \psi'_{qr}$  – проекції потокозчеплення ротора на вісі  $d$  і  $q$ ;
- $\omega_m$  – кутова частота обертання ротора;
- $\theta_m$  – кутове положення ротора;
- $p$  – число пар полюсів;
- $\omega_Y$  – електрична кутова частота обертання ротора ( $\omega_m \times p$ );
- $\theta_Y$  – електричне кутове положення ротора ( $\theta_m \times p$ );
- $T_e$  – електромагнітний момент;
- $T_m$  – механічний момент на валу;
- $J$  – сумарний момент інерції машини і навантаження;
- $H$  – сумарна інерційна постійна машини і навантаження;
- $F$  – сумарний коефіцієнт в'язкого тертя (машини і навантаження).

З Simulink-моделлю асинхронної машини можна ознайомитися, відкривши бібліотеку powerlib\_models.mdl у папці...toolbox\physmod\powersys\ powersys.

### **3.2. Розрахунок параметрів схеми заміщення АД електропривода нейтралізатора К-6,0**

Для моделювання роботи АД з КЗ ротором на ПЕОМ у пакеті програм MATLAB потрібно розрахувати параметри схеми заміщення двигуна.

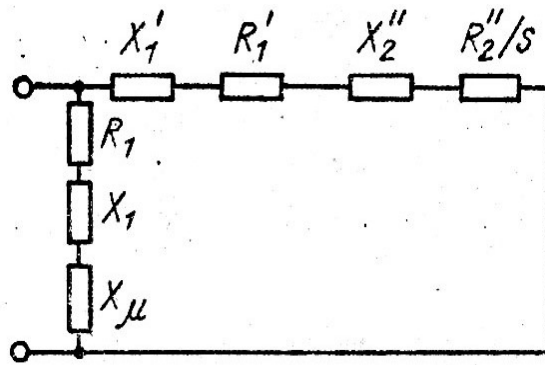


Рисунок 3.2.1 - Схема заміщення фази асинхронного двигуна

Параметри схеми заміщення двигуна в технічних довідниках приведені у відносних одиницях [7]. Технічні параметри двигуна електропривода серії АІР200М2У3 та результати розрахунків параметрів схеми заміщення фази АД у фізичних одиницях приведені в табл. 3.2.2.

Таблиця 3.2.1 Технічні параметри двигуна електропривода

Двигун тістомісильної машини <b>4A100L4У3</b>						
$P_{НОМ}$ , кВт	$n_{НОМ}$ , об/хв.	$\eta_{НОМ}$ , %	$\cos\varphi_{НОМ}$	$J_{ДВ}$ , кг·м <sup>2</sup>	$U_{НОМ}$ , В	$I_{НОМ}$ , А
4,0	1450	84	0,84	0,15	220	8,61
Параметри схеми заміщення фази АД у відносних одиницях						
$\frac{M_{П}}{M_{НОМ}}$		$\frac{M_{max}}{M_{НОМ}}$		$\frac{M_{min}}{M_{НОМ}}$		$\frac{I_{П}}{M_{НОМ}}$
2		2.2		1.6		6

Для переведення параметрів схеми заміщення з відносних одиниць у фізичні одиниці знайдемо номінальний момент двигуна:

Лінійна номінальна напруга для всіх машин  $U_n = 380$  В.

Кутова швидкість обертання магнітного поля статора:

$$\omega_1 := \frac{2 \cdot \pi \cdot f_1}{p} = 157.08$$

Номінальна частота обертання ротора двигуна:

$$n_{2H} := n_1 \cdot (1 - S_H) = 1420.5 \frac{\text{об}}{\text{хв}}$$

Номинальна кутова швидкість обертання ротора двигуна:

$$\omega_H := \frac{\pi \cdot n_{2H}}{30} = 148.754$$

Номинальний момент двигуна:

$$M_H := \frac{P_{2H}}{\omega_H} = 26.89 \quad \text{Н}\cdot\text{м}$$

Критичне ковзання:

$$S_{кр} := S_H \cdot \left( k_{\max} + \sqrt{k_{\max}^2 - 1} \right) = 0.22$$

Номинальний струм статора:

$$I_H := \frac{P_{2H}}{3 \cdot U_{\phi} \cdot \cos \varphi_H \cdot \eta_H} = 8.613 \text{ А}$$

фазна номінальна напруга:

$$U_{\phi} := \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}} = 219.393$$

Якщо припустити, що повні втрати складаються з постійних і змінних втрат, і постійні приблизно рівні 1/3 повних втрат, а механічні втрати становлять половину постійних втрат, то механічні втрати  $\Delta P_{\text{мех}}$  визначаються з рівняння

$$\Delta P_{\text{мех}} := P_{2H} \cdot \left( \frac{1}{\eta_H} - 1 \right) \cdot \frac{1}{6} = 126.984$$

Коефіцієнт приведення  $C$  приймається рівним **1,01-1,05** (менші значення для машин більшої потужності).

Приведений активний опір ротора:

$$R_r := \frac{1}{3} \cdot \frac{P_{2H} + \Delta P_{\text{мех}}}{I_H^2 \cdot \frac{1 - S_H}{S_H}} = 1.038 \text{ Ом}$$

Активний опір статора:

$$R_s := \frac{1}{6} \cdot \frac{U_{\Pi}^2 \cdot (1 - S_H)}{C \cdot \left(1 + \frac{C}{S_{кр}}\right) \cdot k_{\max} \cdot (P_{2H} + \Delta P_{\text{мех}})} = 0.43 \text{ Ом}$$

Приведена індуктивність розсіювання статора й ротора:

$$L_{ls} := \left(\frac{1}{4 \cdot \pi \cdot f_1}\right) \cdot \sqrt{\left(\frac{U_{\Phi}}{k_i \cdot I_H}\right)^2 - (R_s + R_r)^2} = 0.006$$

$$L_{lr} := L_{ls}$$

Індуктивність статора:

$$L_s := \frac{U_{\Phi}}{2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot I_H \cdot \left(\sqrt{1 - \cos^2 \varphi_H} - \cos \varphi_H \cdot \frac{S_H}{S_{кр}}\right)} = 0.238$$

Індуктивність ланцюга намагнічування:

$$L_m := L_s - L_{ls} = 0.232$$

По закінченню розрахунків необхідно визначити розрахунковий коефіцієнт:

$$C_1 := 1 + \frac{L_{ls}}{L_m} = 1.027$$

Порівняти його з раніше прийнятим коефіцієнтом  $C$ .

$$C_1 = C$$

### Розрахунок статичних механічних характеристик при частотному керуванні за законом $U_1 / f_1 = const$ .

Для розрахунків і побудови механічних характеристик асинхронного двигуна, при керуванні за законом  $U_1 / f_1 = const$  і іншими законами, розробили модель в *Simulink*, схема якої показана на рис. 2.1. Модель містить у собі перетворювач нерухливої системи координат в обертovu і перетворювач двофазної системи в трифазну систему  $A, B, C$ .

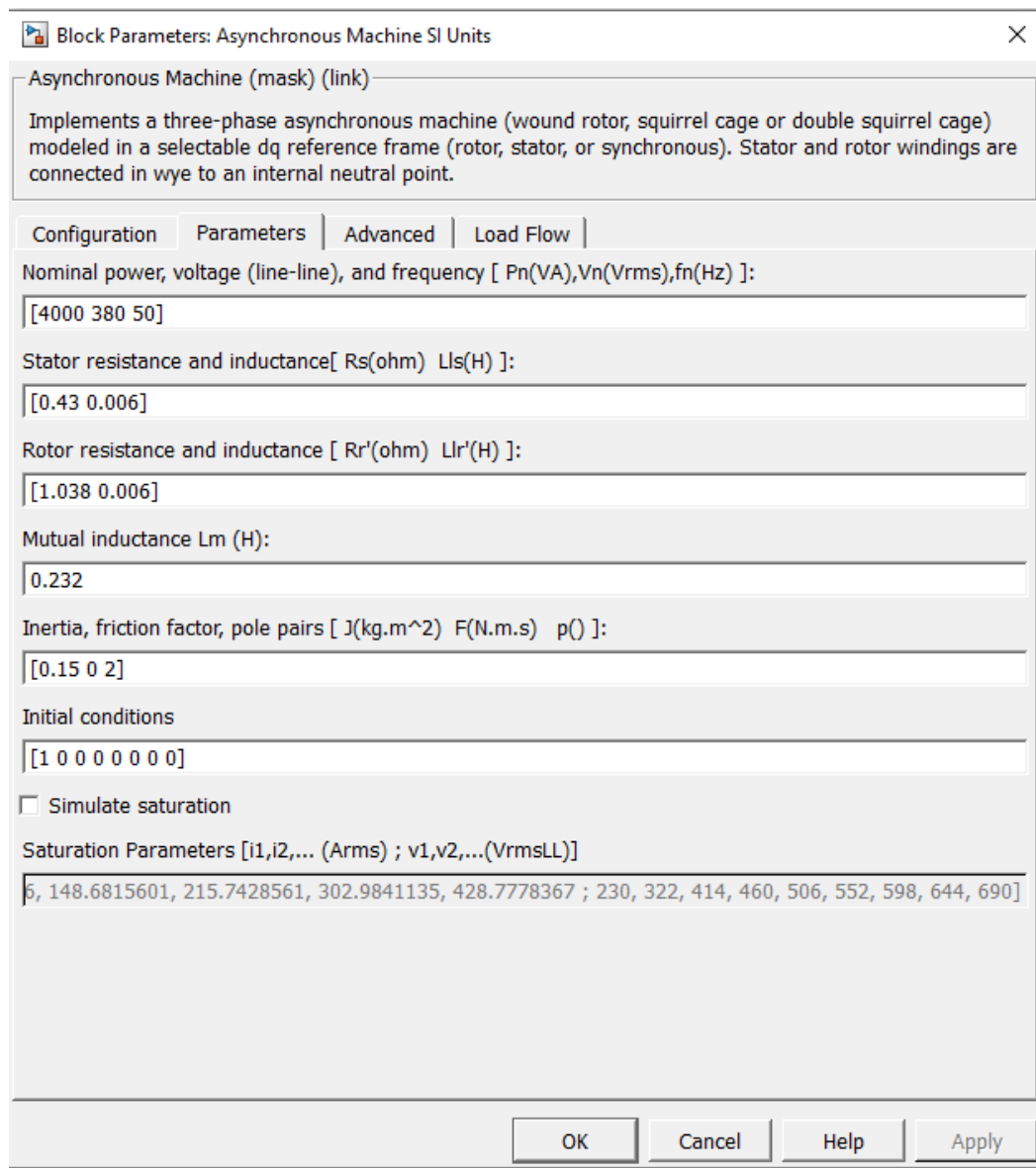


Рисунок 3.4 – Вікно параметрів моделі АД з КЗ ротором.

**Параметри блоку:**

**Preset model:**

[Вибір моделі]. Параметр дозволить вибрати модель машини з каталогу.

**Show detailed parameters:**

[Показати параметри моделі]. При встановленому прапорцю параметри моделі доступні для перегляду і змін.

**Rotor type:**

[Тип ротора]. Значення параметра вибирається зі списку:

- Squirrel-Cage – короткозамкнений ротор, або «біляча клітка»;
- Wound – фазний ротор.

**Reference frame:**

[Система координат]. Значення параметра вибирається зі списку:

- Rotor – нерухома відносно ротора;
- Stationary – нерухома відносно статора;
- Synchronous – обертана разом з полем.

**Nom.power, L-L volt.andfrequency** [ $P_n(\text{VA})$ ,  $V_n(\text{V})$ ,  $f_n(\text{Hz})$ ]:

[Номінальна потужність  $P_n$  (ВА), діюча лінійна напруга  $U_n$  (В) та номінальна частота  $f_n$  (Гц).

**Stator** [ $R_s$  (Ohm)  $L_s$  (H)]:

[Активний опір  $R_s$  (Ом) і індуктивність  $L_s$  (Гн) статора].

**Rotor** [ $R_r$  (Ohm)  $L_r'$  (H)]:

[Активний опір  $R_r$  (Ом) і індуктивність  $L_r$  (Гн) ротора].

**Mutual inductance**  $L_m$  (H):

[Взаємна індуктивність (Гн)].

**Inertia, friction factor and pairs of poles** [ $J$  ( $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ )  $F$  ( $\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$ ) $p$ ]:

[Момент інерції  $J$  ( $\text{кг}\cdot\text{м}^2$ ), коефіцієнт тертя  $F$  ( $\text{Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}$ ) і число пар полюсів  $p$ ].

**Initial conditions** [ $s$  (deg)  $i_{sa}$ ,  $i_{sb}$ ,  $i_{sc}$  (A)  $\varphi_{sA}$ ,  $\varphi_{sB}$ ,  $\varphi_{sC}$  (deg)]:

[Початкові умови]. Параметр задається у вигляді вектора, кожний елемент котрого має наступні значення:

- $s$  – ковзання;
- $\varphi_{st}$  – фаза (град.);
- $i_{sa}$ ,  $i_{sb}$ ,  $i_{sc}$  – початкові значення струмів статора (А);
- $\varphi_{sA}$ ,  $\varphi_{sB}$ ,  $\varphi_{sC}$  – початкові фази струмів статора (град.). Початкові умови машини можуть бути обчислені за допомогою блоку Powergui.

Вихідними даними для розрахунку параметрів машини є наступні:

- $P_n$  – номінальна потужність [Вт];
- $U_n$  – номінальна лінійна напруга [В];
- $f_1$  – частота мережі [Гц];
- $n_n$  – номінальна кутова частота обертання вала [об/хв.];
- $p$  – число пар полюсів

- $\eta$  – коефіцієнт корисної дії [в.о.];
- $\cos\varphi$  – коефіцієнт потужності [в.о.];
- $I_n$  – номінальний струм статора [А];
- $k_I$  – кратність пускового струму [в.о.];
- $m_{II}$  – кратність пускового моменту [в.о.];
- $m_{max}$  – кратність максимального моменту [в.о.];
- $J$  – момент інерції [ $\text{кг} \times \text{м}^2$ ].

Параметри асинхронної машини розраховуються за наступними виразами [2]:

$U = \frac{U_n}{\sqrt{3}}$  – номінальна фазна напруга [В] при схемі з'єднання обмотки – зірка;

$n_1 = \frac{60f_1}{p}$  – частота обертання магнітного поля (синхронна частота обертання) [об/хв];

$s_n = \frac{n_1 - n_n}{n_1}$  – номінальне ковзання [в.о.];

$s_{кр} = s_n (m_{max} + \sqrt{m_{max}^2 - 1})$  – критичне ковзання [в.о.];

$\omega_1 = \frac{2\pi f_1}{p}$  – кутова частота обертання магнітного поля (синхронна частота) [рад/с];

$\omega_n = \frac{\pi n_n}{30}$  – номінальна кутова частота обертання вала [рад/с];

$M_n = \frac{P_n}{\omega_n}$  – номінальний момент [Нм];

$M_{max} = m_{max} M_n$  – максимальний момент [Нм];

$M_n = m_n M_n$  – пусковий момент [Нм];

$P_{мех} = (0,01 \div 0,05) P_n$  – механічні втрати [Вт];

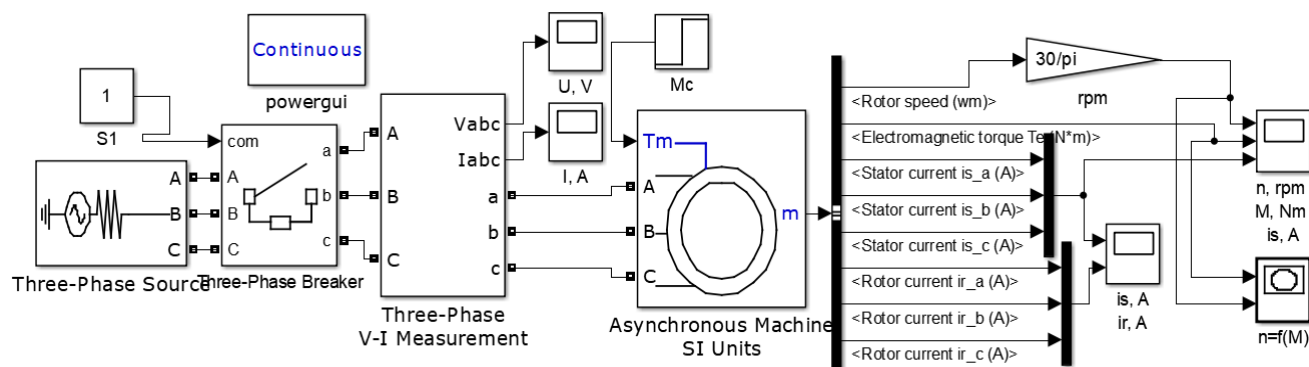
$C = (1,01 \div 1,05)$  – розрахунковий коефіцієнт (менше значення для машин більшої потужності).

### 3.3 Моделювання прямого пуску двигуна електропривода нейтралізатора

Модель прямого пуску асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором електропривода гідрататора представлена на рис. 3.3.1

Схема містить джерело трифазного живлення, трифазний вимикач, трифазний вимірювач напруги і струму обмоток статора двигуна, графобудівник механічної характеристики, осцилографи та вимірювальні прилади.

Навантаження на валу двигуна має пропорційну характеристику. Інформація про частоту обертання поступає з виходу датчика швидкості.



**Рисунок 3.3.1** - Схема моделювання прямого пуску АД гідратаційної машини

Результати моделювання прямого пуску асинхронного двигуна представлені на рис. 3.3.1.

У результатах виведені діаграми наступних величин:

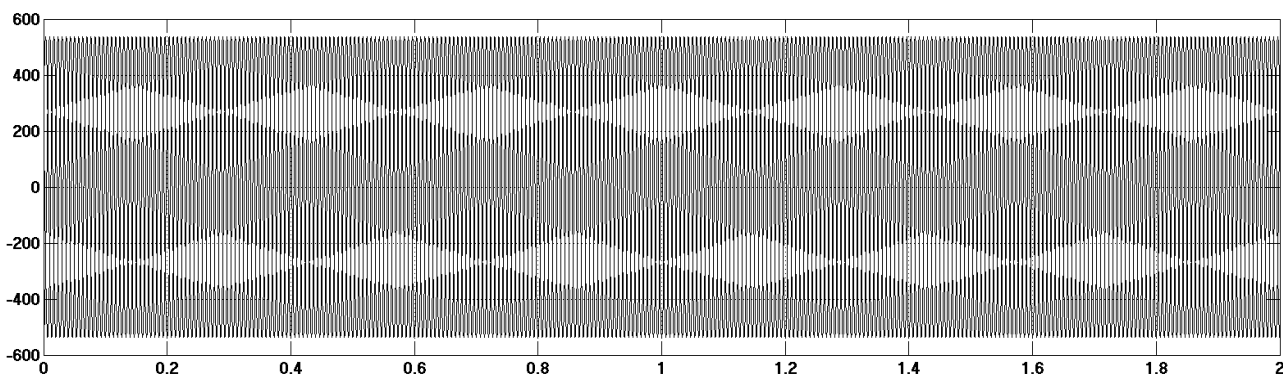
**а** – осцилограма фазних напруг на обмотках статора АД;

**б** – часова діаграма перехідного струму в обмотках статора АД;

**в** – часова діаграма швидкості ротора при розгоні АД;

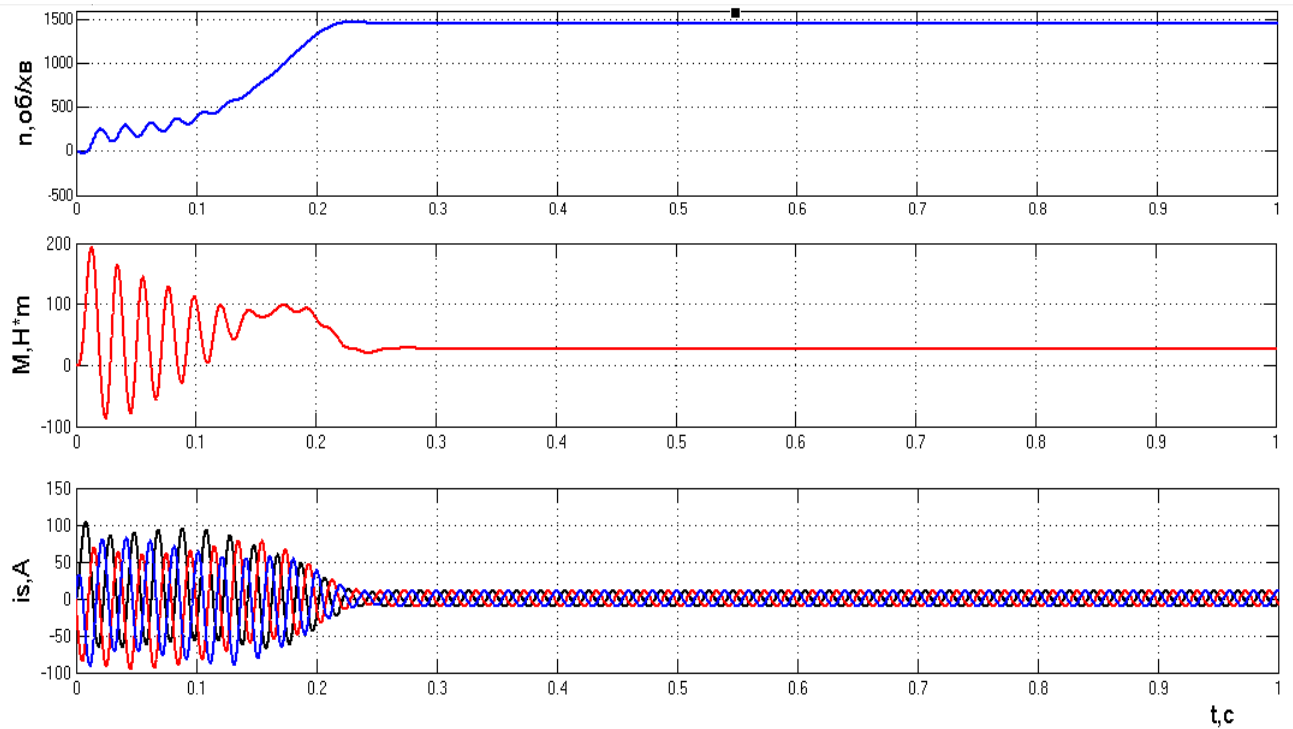
**г** – часова діаграма зміни обертового моменту на валу ротора при розгоні АД;

**д** – співвідношення швидкості ротора двигуна та електромагнітного моменту при прямому пуску АД.

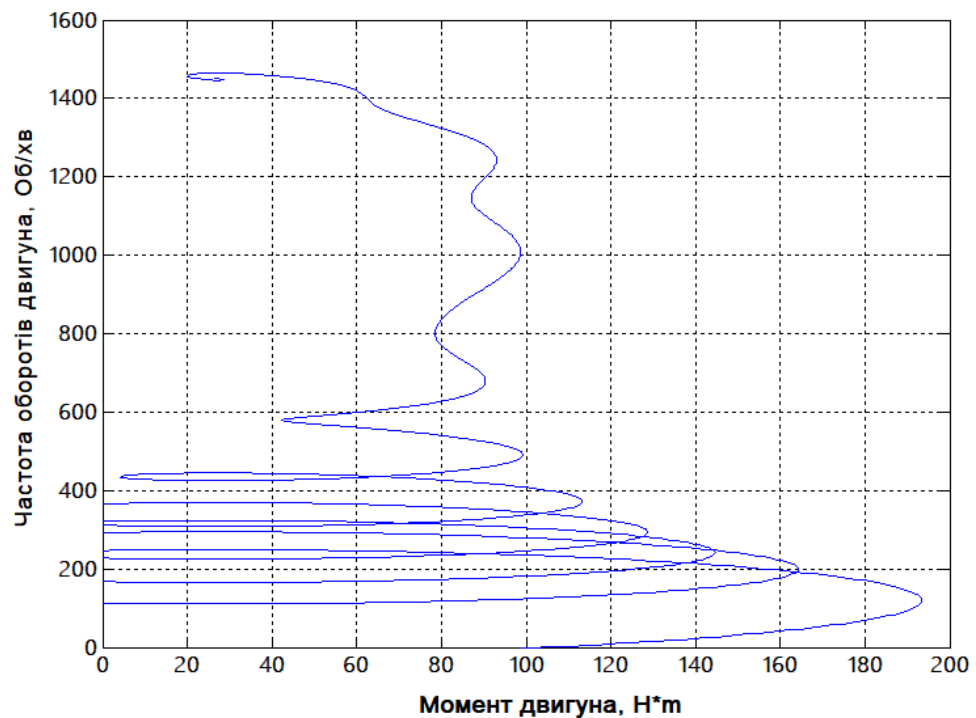


### РиРисунок 3.3.2 - Результати моделювання прямого пуску АД нейтралізатора

а – осцилограма фазних напруг на обмотках статора АД;



б – часова діаграма швидкості ротора, електромагнітного моменту на валу ротора, перехідного струму в обмотках статора АД і навантаження АД.



в – співвідношення швидкості ротора двигуна та електромагнітного моменту при прямому пуску АД.

### 3.4 Моделювання пуску двигуна електропривода нейтралізатора з ПЧ

Модель електропривода з перетворювачем частоти ПЧ-АД представлена на рис. 3.4.1 В моделі використовується система управління із зворотним зв'язком за швидкістю двигуна, яка забезпечує широкий діапазон регулювання швидкості. Схема містить джерело трифазного живлення з ШІМ, трифазний вимикач, трифазний вимірювач напруги і струму обмоток статора двигуна, осцилографи та вимірювальні прилади.

Закон зміни частоти струму аперіодичний, час зміни 1 с. Навантаження на валу двигуна має вентиляторну характеристику. Інформація про частоту обертання поступає з виходу датчика швидкості.

У результатах виведені діаграми наступних величин:

- а – осцилограма зміни частоти вихідної напруги ПЧ, тобто на обмотках АД;
- б – осцилограма форми вихідної напруги ПЧ, тобто на обмотках статора АД;
- в – часова діаграма перехідного струму в обмотках статора АД;
- г - часова діаграма зміни обертового моменту на валу ротора при розгоні АД;
- д – часова діаграма швидкості ротора при розгоні АД.

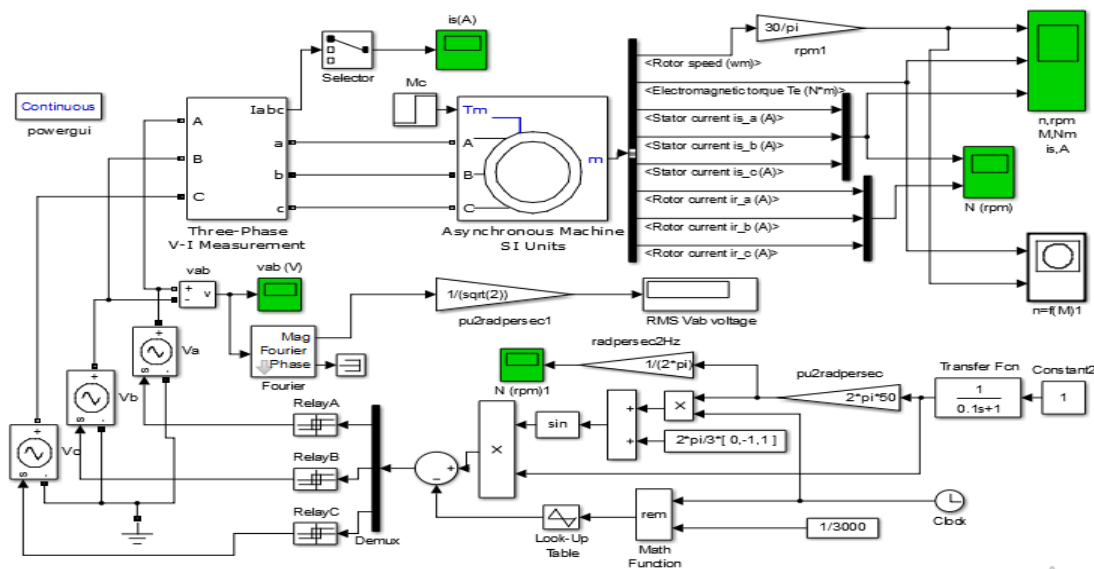


Рисунок 3.4.1 – Схема моделі пуску асинхронного двигуна з перетворювачем частоти ПЧ-АД

Результати моделювання асинхронного двигуна з частотним перетворювачем представлені на рис. 3.4.2

Результати моделювання пуску АД з ПЧ:

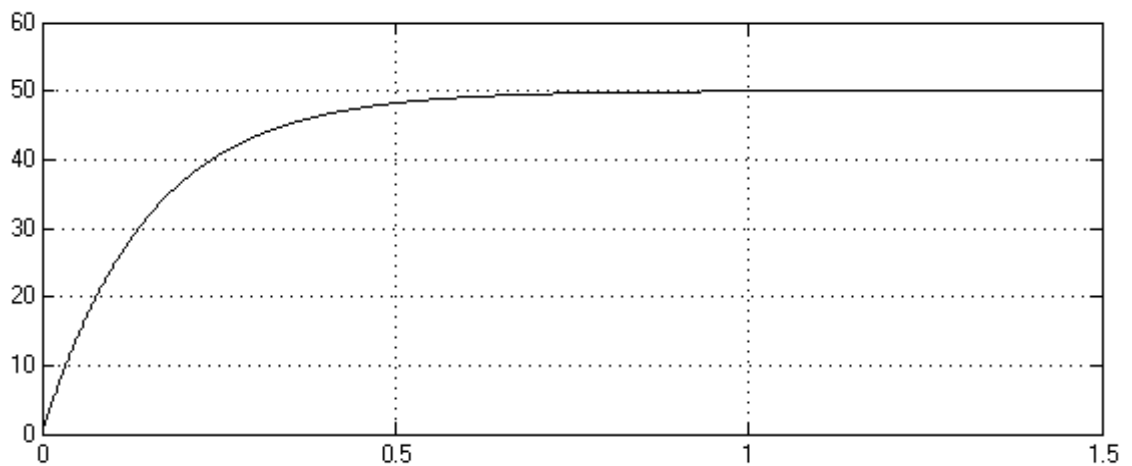


Рисунок 3.4.3- осцилограма зміни частоти вихідної напруги ПЧ, тобто на обмотках АД

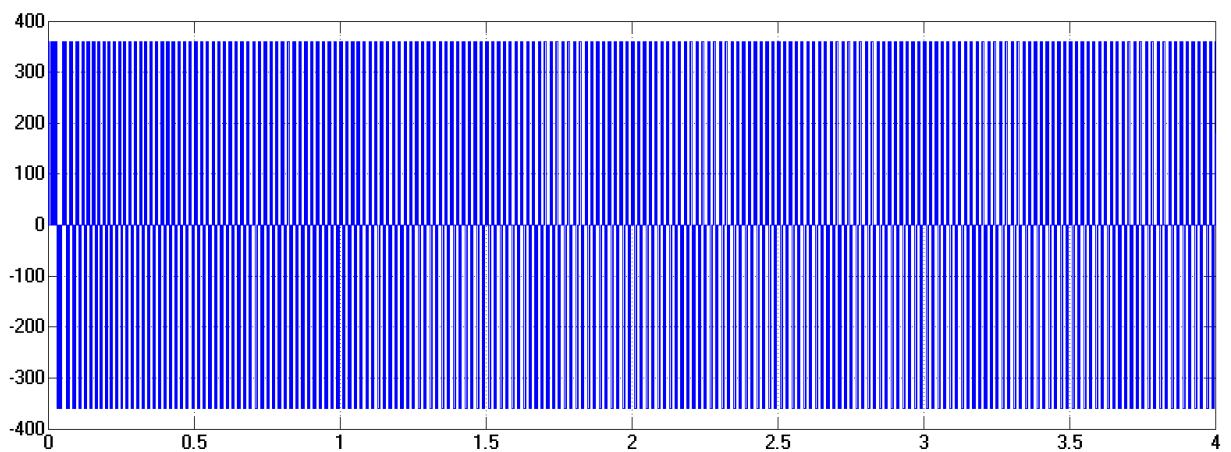


Рисунок 3.4.4- осцилограма форми вихідної напруги ПЧ, тобто на обмотках статора АД

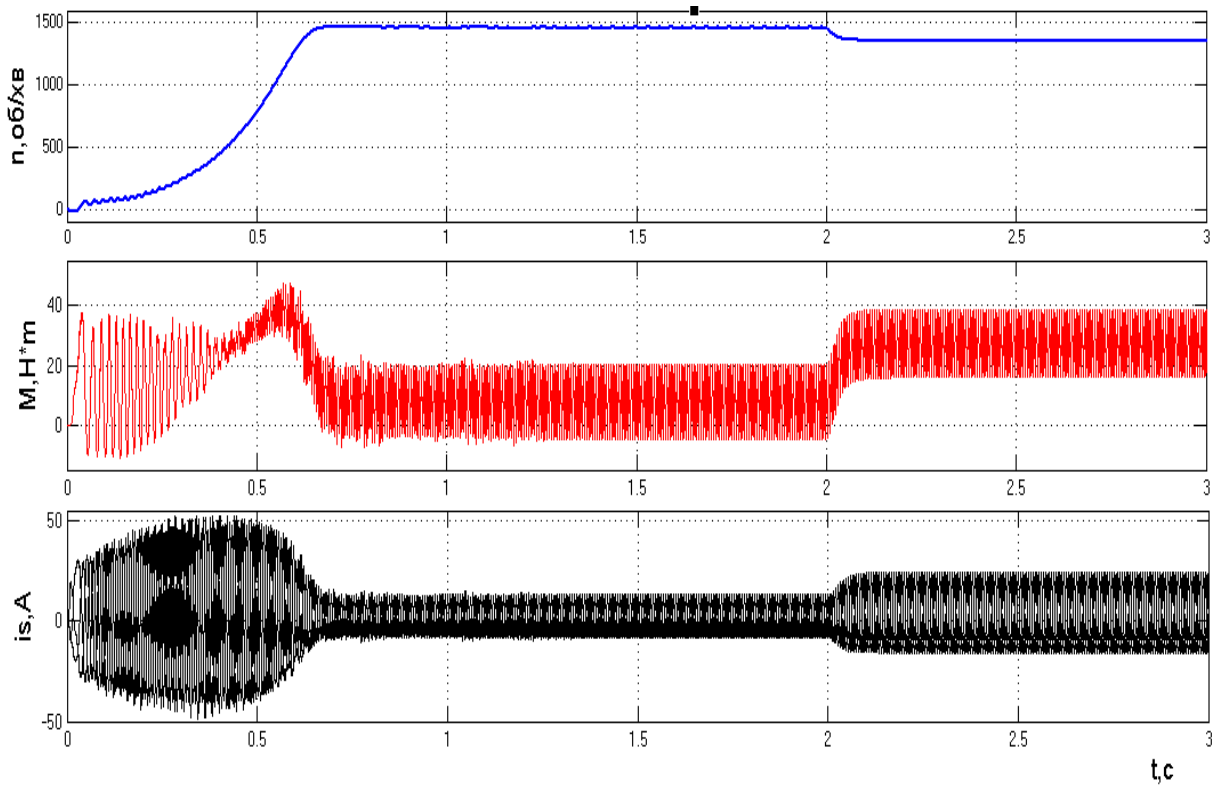


Рисунок 3.4.5 - Динамічні характеристики асинхронного електропривода з частотним регулюванням при частоті  $f_1=50$  Гц для номінального режиму роботи двигуна

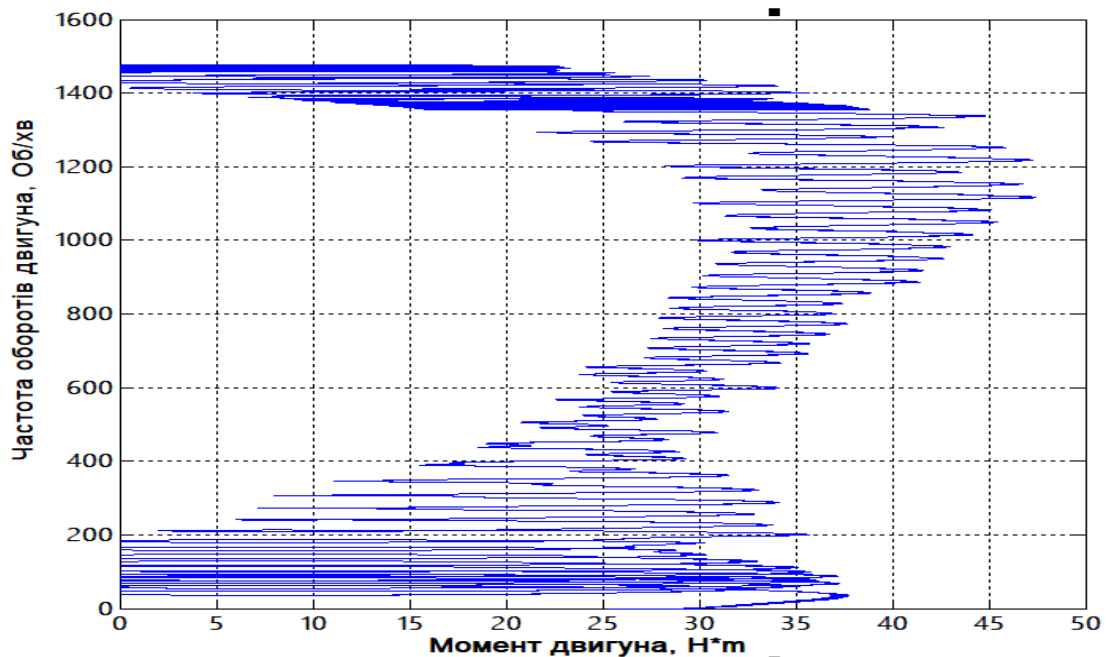


Рисунок 3.4.6 - Динамічна механічна характеристика асинхронного електропривода з частотним регулюванням при частоті  $f_1=50$  Гц для номінального режиму роботи

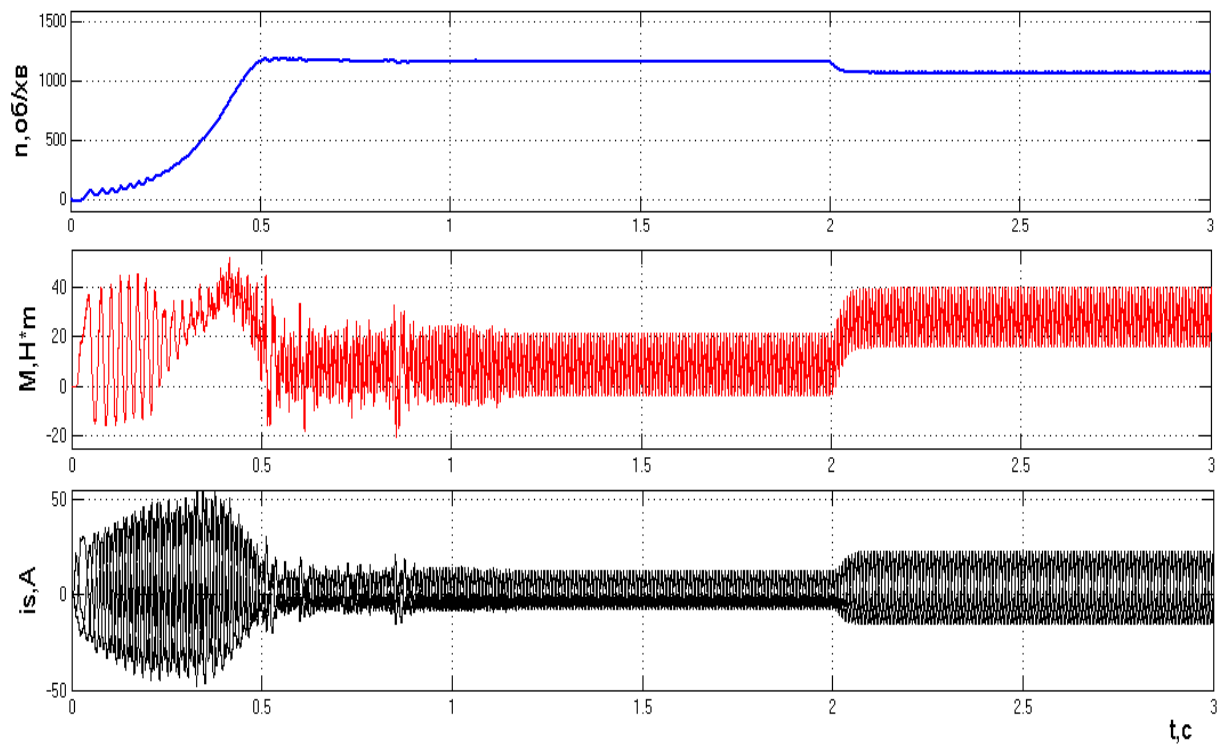


Рисунок 3.4.7- Динамічні характеристики асинхронного електропривода з частотним регулюванням при частоті  $f_1=40$  Гц для режиму роботи з швидкістю  $n = 1200$  об/хв.

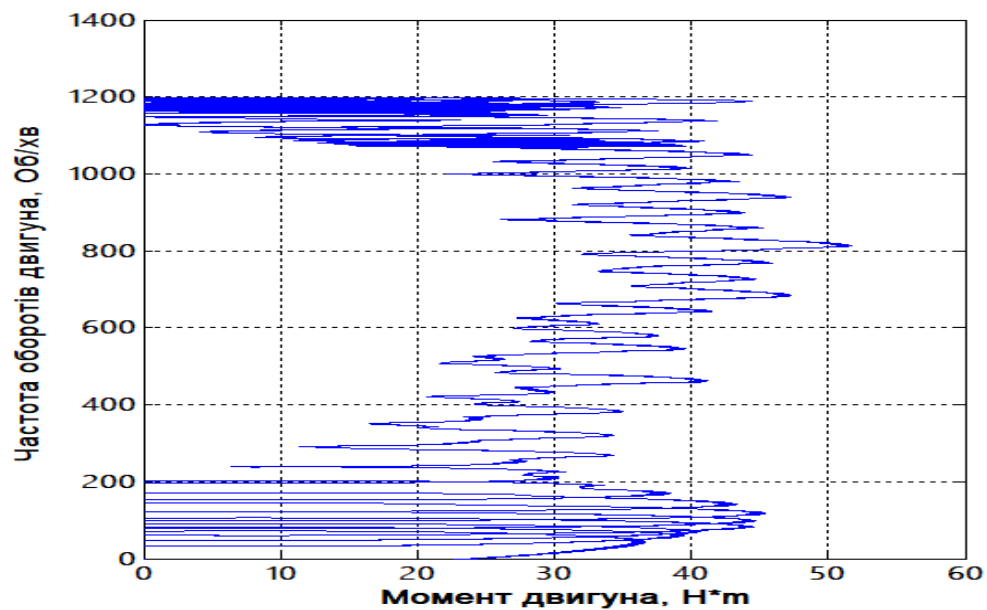


Рисунок 3.4.8- Динамічна механічна характеристика асинхронного електропривода з частотним регулюванням при частоті  $f_1=40$  Гц для режиму роботи зі швидкістю  $n = 1200$  об/хв.

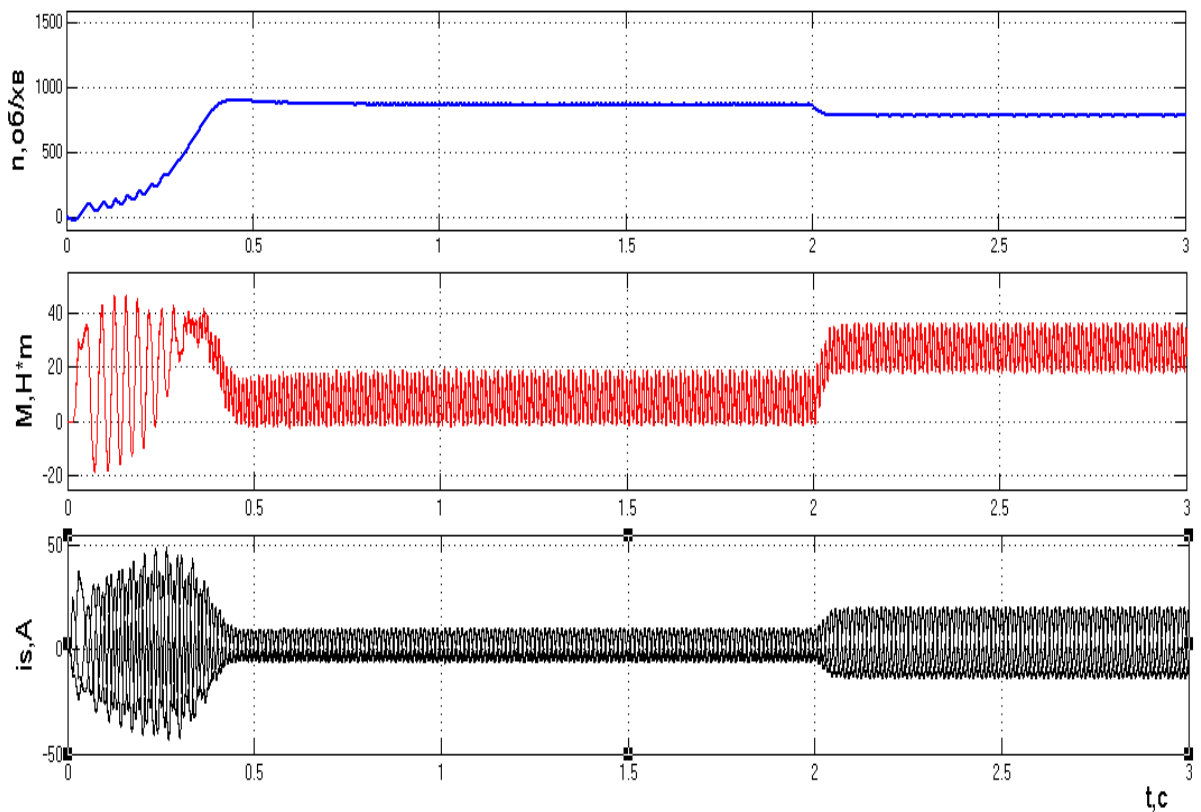


Рисунок 3.4.9- Динамічні характеристики асинхронного електропривода з частотним регулюванням при частоті  $f_1=30$  Гц

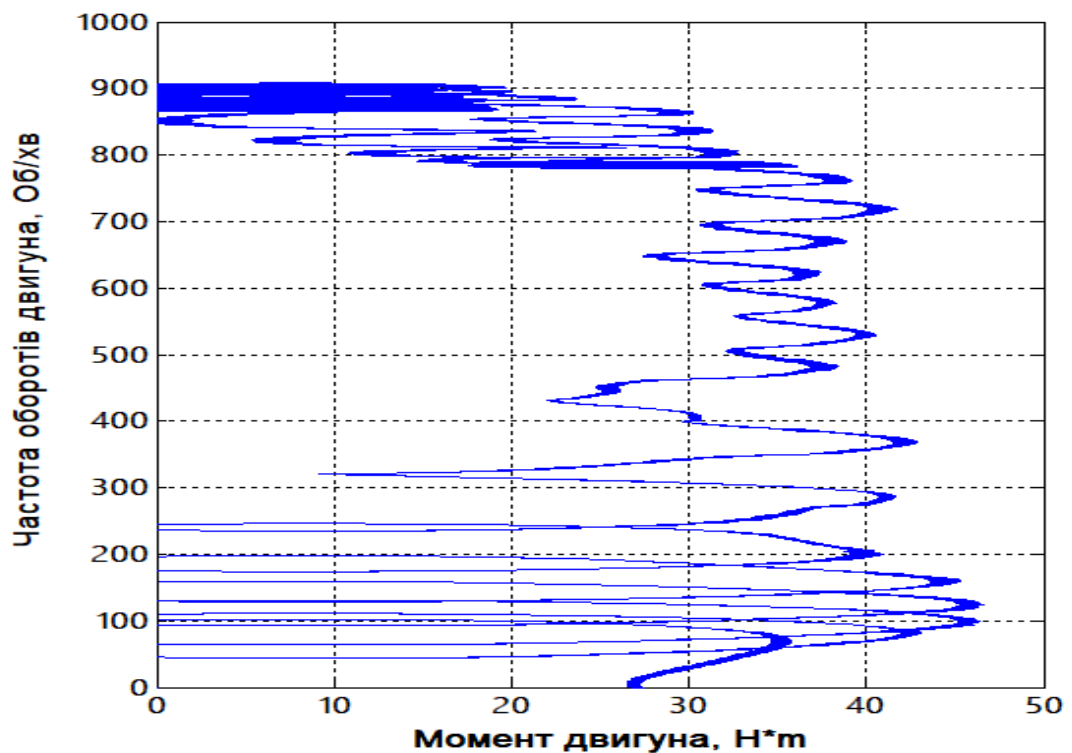
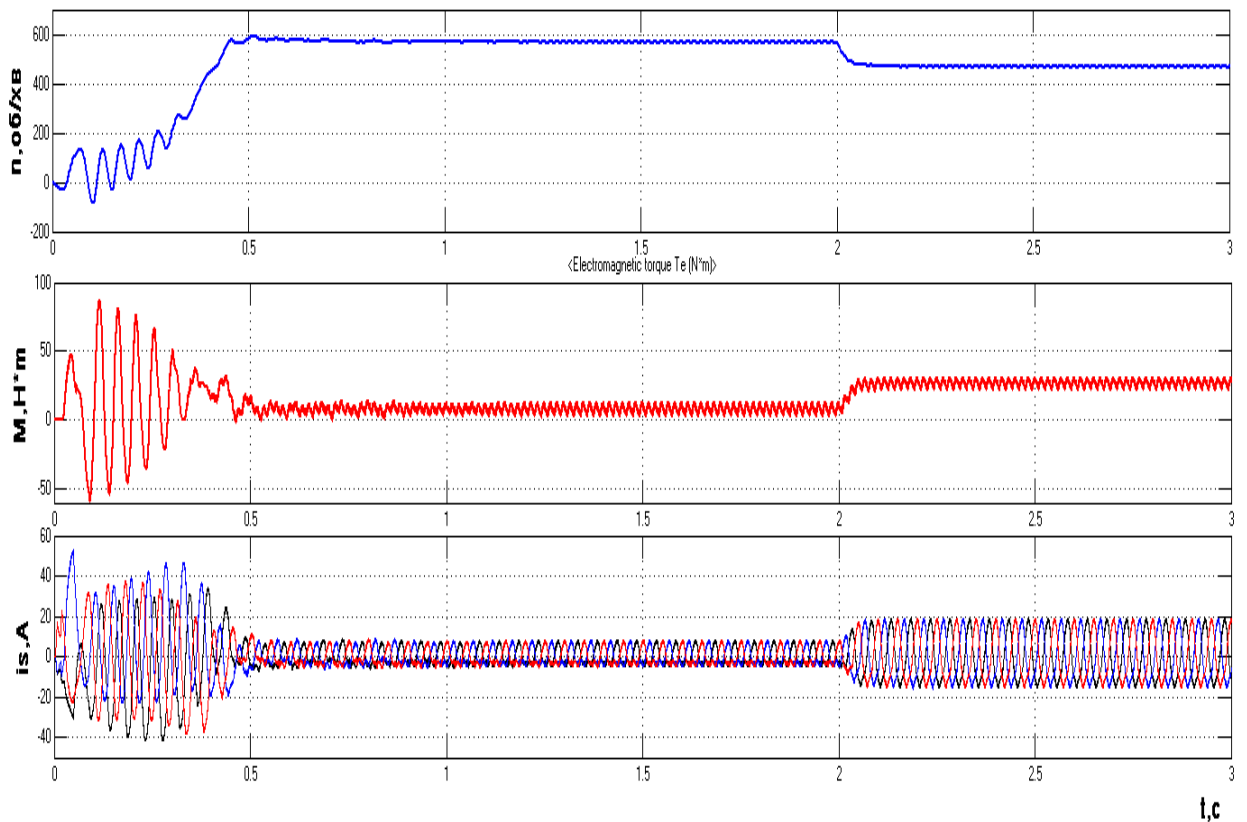
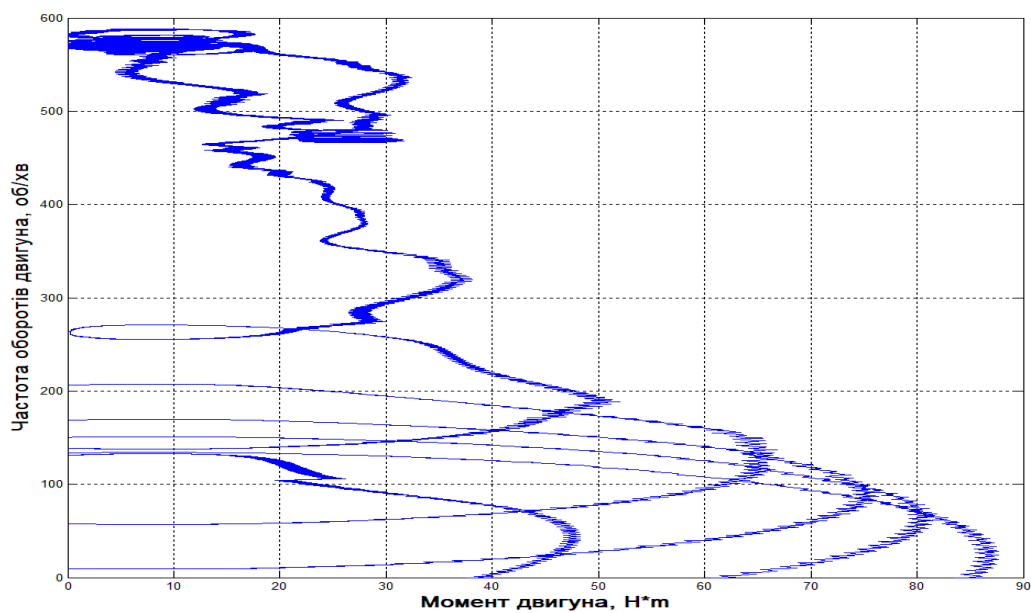


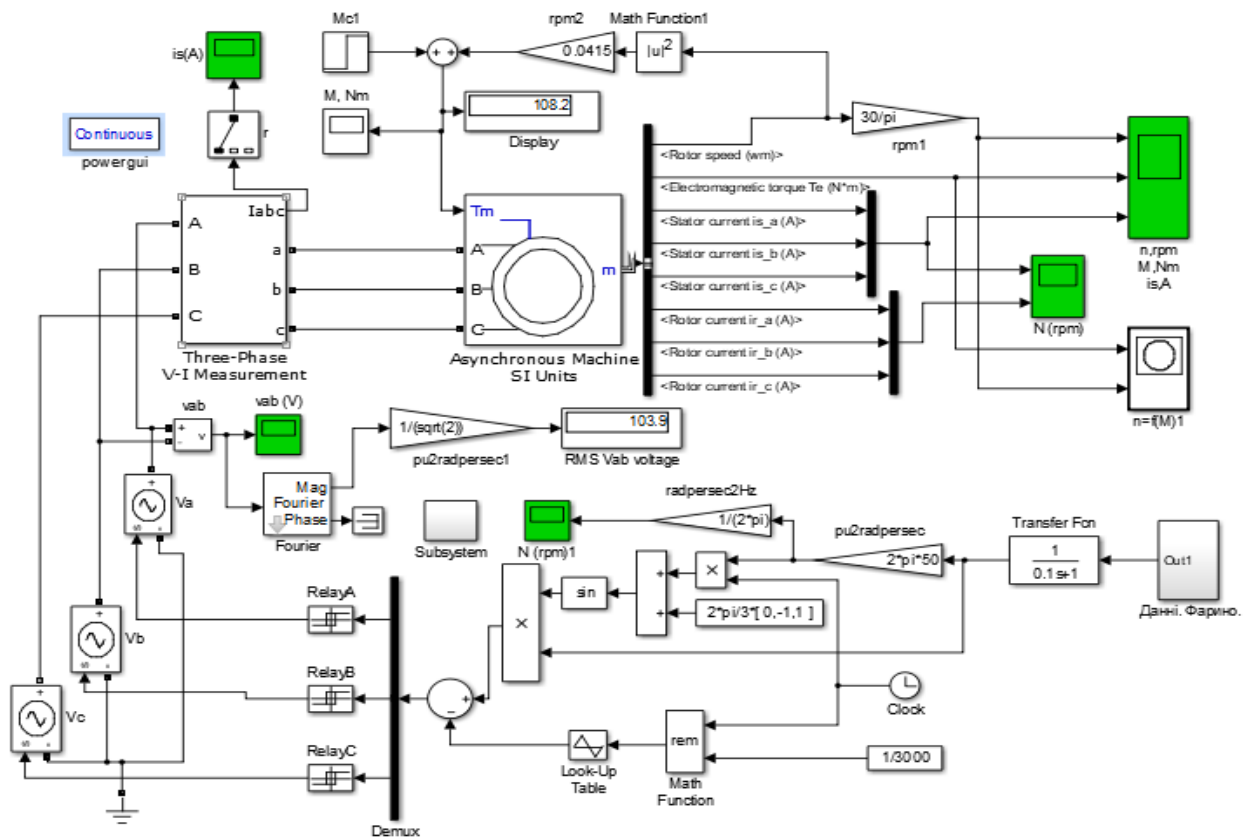
Рисунок 3.4.10- Динамічна механічна характеристика асинхронного електропривода з частотним регулюванням при частоті  $f_1=30$  Гц



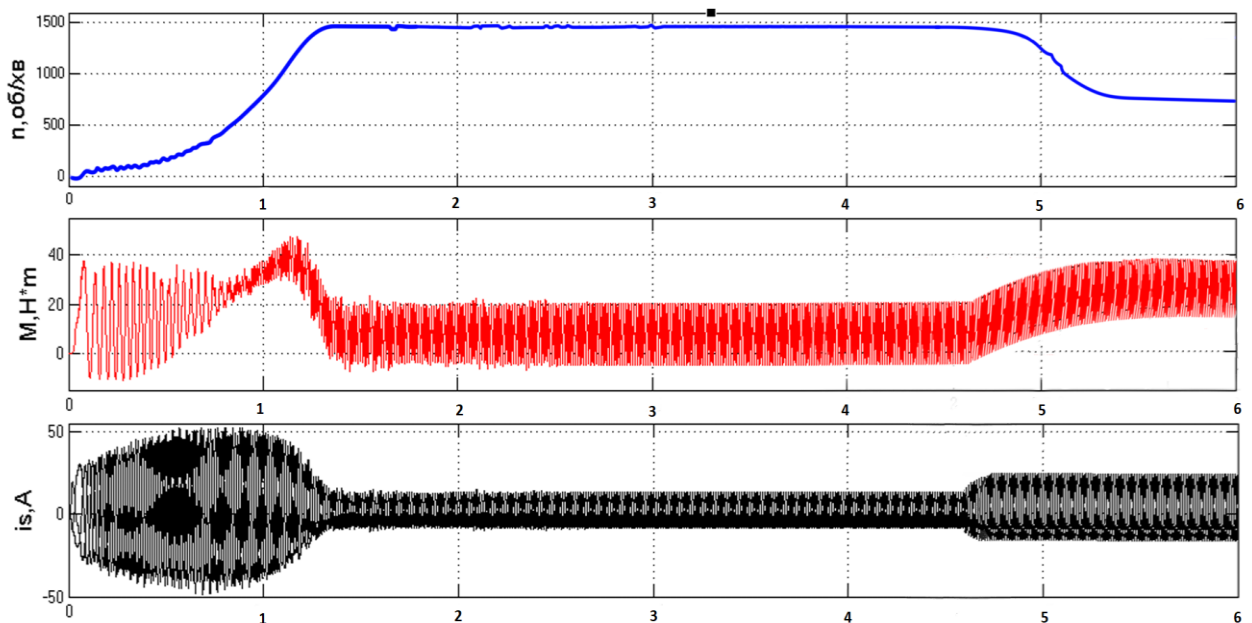
**Рисунок 3.4.11-** Динамічні характеристики асинхронного електропривода з частотним регулюванням при частоті  $f_1=20$  Гц



**Рисунок 3.4.12-** Динамічна механічна характеристика асинхронного електропривода з частотним регулюванням при частоті  $f_1=20$  Гц



3.4.14 Модель в Matlab частотне регулювання з асинхронним двигуном ми отримали такі показники при регулюванні



3.4.15. Ми промодельовали по даним заданими Matlab і отримали такі показники при скалярному частотному регулюванні зробили перехід з однієї швидкості на іншу.

### 3.5 Висновки і пропозиції

При прямому пуску асинхронного двигуна спостерігається великий пусковий момент, але при цьому дуже висока кратність пускового струму: 5...6 разів. При пуску із перетворювачем частоти імпульси пускового струму двигуна значно зміншуються: у 2...3 рази, пусковий обертовий момент практично відсутній, а розгін двигуна зменшився від 1,2 с до 0,9 с.

Трифазний асинхронний двигун серії **4A100L4У3** потужністю 4,0 кВт із перетворювачем частоти ПЧ типу VLT2840 забезпечить у діапазоні регулювання обертання лопатей  $n_{шн} = 30-60$  об/хв. і стабілізацію частоти його обертання з точністю  $\Delta n_{шн} = 5,0\%$  в розімкненій схемі управління електроприводом гідрататора, тобто забезпечить нормальну роботу машини електрифікованого агрегату.

## 4 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА

### 4.1 Розрахунок інвестиційних витрат на модернізацію і впровадження системи електроприводу

Предметом вдосконалення у даному дипломному проєкті є електропривод мішалки коагулятора нейтралізації соняшникової олії. Розроблена система керування дозволяє автоматично змінювати частоту обертання двигуна в залежності від умов. До модернізації частота обертання завжди була постійною і не змінювалася.

Враховуючи викладене вище, можна провести економічне обґрунтування пропонуваніх заходів по модернізації електроприводу.

Одноразові капітальні витрати на обладнання для створення САК будуть складатись з вартостей основного та додаткового обладнання. Перелік основного обладнання, яке треба закупити для створення системи, наведено в таблиці 4.1.

Відзначимо, що до модернізації застосовувався також двигун постійного струму. Установлений двигун повністю задовольняє вимогам, які пред'являються до САК, тому у купівлі нового двигуна необхідності немає.

У таблиці наведено виключно основне обладнання, яке необхідне для створення САК.

Таблиця 4.1 – Основне обладнання, яке необхідно закупити для модернізації електроприводу

Найменування	Кількість, шт	Ціна, грн
Частотний перетворювач	1	5400
Резистори, конденсатори та інші складники	1	550
Всього		5950

Додаткові витрати:

$$Z_{\text{ДОД}} = 0,1 \cdot 5950 = 595 \text{ грн.}$$

Тоді загальні інвестиційні витрати:

$$Z_K = Z_{\text{ОСН}} + Z_{\text{ДОД}}. \quad (4.1)$$

Підставивши чисельні значення, одержимо:

$$Z_K = 5950 + 595 = 6545 \text{ грн.}$$

#### 4.2 Розрахунок змін основних показників діяльності підприємства

Для створення модернізованого електроприводу необхідно виконати роботи по монтажу, наладці та пуску системи.

Дані роботи буде проводити один працівник шостого розряду протягом одного дня.

Витрати на заробітну плату з нарахуваннями визначимо за формулою:

$$S_{\text{ЗПМ}} = K_{\text{НВ}} \cdot \lambda \cdot t \cdot \sum_{t=1}^m C_{ti} \cdot (1 + H), \quad (4.2)$$

де  $K_{\text{НВ}}$  – коефіцієнт, який враховує накладні витрати на заробітну плату,  $K_{\text{НВ}} = 1,3$ ;

$\lambda$  – коефіцієнт, який враховує премії,  $\lambda = 1,25$ ;

$t$  – час виконання робіт,  $t = 16 \text{ год}$ ;

$H$  – норма нарахування на заробітну плату;  $H = 0,362$ ;

$m$  – кількість робітників,  $m = 1 \text{ чол.}$

Тоді заробітна плата з нарахуваннями дорівнює:

$$S_{\text{ЗПМ}} = 1,3 \cdot 1,25 \cdot 16 \cdot 29,74 \cdot (1 + 0,362) = 526,57 \text{ грн.}$$

Витрати на модернізацію визначимо як суму витрат на купівлю

комплектуючих та витрат на заробітну платню з нарахуваннями робітників, які проводять модернізацію:

$$З_M = З_K + З_{ЗПМ}. \quad (4.3)$$

Тоді

$$З_M = 6545 + 526,57 = 7071,57 \text{ грн.}$$

Розрахунок річного фонду часу роботи системи визначимо формулою:

$$\dot{O}_D = \frac{\dot{O}_0}{\frac{1}{t_{Ci} K_{Ci}} + D_D}. \quad (4.4)$$

де  $T_P$  – річний фонд робочого часу,  $T_P = 251$  день;

$t_{3M}$  – тривалість зміни в машино-годинах,  $t_{3M} = 8$  машино-годин;

$K_{3M}$  – коефіцієнт змінності роботи устаткування,  $K_{3M} = 2$ ;

$D_P$  – простой в машино-днях у всіх видах технічного обслуговування і ремонту, який приходить на одну машино-годину.

Останній визначимо за формулою:

$$D_P = \frac{\sum_{i=1}^n d_{Pi} a_{Pi}}{T_{Ц}}, \quad (4.5)$$

де  $n$  – число різновидів ТО та ремонтів за міжремонтний період, прийmemo рівним  $n = 3$ ;

$d_{Pi}$  – тривалість перебування в  $i$ -му ремонті або ТО, приймаемо рівним 0,5 год;

$T_{Ц}$  – час міжремонтного циклу, приймаемо рівним  $T_{Ц} = 8950$  год;

$a_{Pi}$  – кількість ремонтів або технічних обслуговувань за міжремонтний період, приймаемо рівним 12.

$$D_P = \frac{3 \cdot 0,5 \cdot 12}{8950} = 0,0021 \frac{\text{маш} \cdot \text{днів}}{\text{маш} \cdot \text{год}}.$$

Річний фонд часу роботи установки до і після модернізації дорівнює:

$$T_P = \frac{251}{\frac{1}{8 \cdot 2} + 0,0021} = 3885,44 \text{ год}.$$

Річну експлуатаційну продуктивність можна розрахувати виходячи з виразу:

$$B = B_{ec} T_P K_{ПР}, \quad (4.6)$$

де  $B_{ec}$  – часова експлуатаційна продуктивність, од.прод./год;

$K_{ПР}$  – коефіцієнт, що враховує простоювання не враховані в часовій експлуатаційній продуктивності, приймаємо рівним 0,9.

Використання розробленої САК веде до зменшення браку продукції на 5%, тому річна експлуатаційна продуктивність буде різною до і після модернізації.

Після модернізації:

$$B = 4176 \cdot 3885,44 \cdot 0,9 = 14,6 \cdot 10^6 \text{ од}.$$

До модернізації:

$$B = 4176 \cdot 3885,44 \cdot 0,9 \cdot 0,95 = 13,87 \cdot 10^6 \text{ од}.$$

Витрати на заробітну плату з нарахуваннями визначимо за формулою:

$$S_{\text{цт}} = \hat{E}_{i\lambda} \cdot \lambda \cdot t \cdot \sum_{i=1}^m C_{ii} \cdot (1 + H), \quad (4.7)$$

де  $K_{HB}$  – коефіцієнт, який враховує накладні витрати на заробітну плату,  $K_{HB} = 1,3$ ;

$\lambda$  – коефіцієнт, який враховує премії,  $\lambda = 1,25$ ;

$t$  – час виконання робіт, приймаємо рівним річному фонду часу роботи установки;

$C_{ii}$  – годинна тарифна ставка для працівників  $i$ -розряду;

$H$  – норма нарахування на заробітню плату,  $H = 0,362$ ;

$m$  – кількість робітників,  $m = 1$  чол.

Витрати на заробітню до і після модернізації з нарахуванням визначимо таким чином:

$$S_{ЗПМ} = 1,3 \cdot 1,25 \cdot 3885,44 \cdot 9 \cdot (1 + 0,362) = 77395,05 \text{ грн.}$$

Витрати на технічне обслуговування і поточний ремонт визначимо за формулою:

$$S_{oi} = S_{oi\zeta} + S_{oii} , \quad (4.8)$$

де  $S_{TOЗ}$  – витрати на заробітню плату ремонтників з нарахуваннями;

$S_{ТОМ}$  – витрати на матеріали та запасні частини.

До модернізації технічне обслуговування проводив один робітник четвертого розряду, а після модернізації система стала більш складною, тому її обслуговування повинен виконувати спеціаліст із розрядом не нижче п'ятого.

Витрати на заробітню плату ремонтним робітникам із нарахуваннями визначаються за формулою:

$$S_{oi\zeta} = \frac{\dot{O}_D}{\dot{O}_o} \hat{E}_{iA} \lambda \tilde{N}_D \sum_{i=1}^m a_i \times (1 + I) , \quad (4.9)$$

де  $C_p$  – середня тарифна ставка ремонтного робітника четвертого розряду;

$a_i$  – кількість техобслуговувань і поточних ремонтів без капітального ремонту,

$Ch$  – трудоемкість  $i$ -го технічного обслуговування та поточного ремонту,  $Ch = 1,57$ .

Витрати на матеріали та запасні частини визначаються за формулою:

$$S_{ТОМ} = K_{1n} \frac{S_{TOЗ} (1 - H)}{K_{HЗ}} K_{ЗР} , \quad (4.10)$$

де  $K_{In}$  – норма накладних витрат по всім видам витрат, крім заробітної плати;

$K_{In} = 1,1$ ,  $K_{ЗР}$  – коефіцієнт переходу від витрат на заробітну плату до витрат на матеріали та запасні частини,  $K_{ЗР} = 1,25$ .

Таким чином, витрати на заробітну плату ремонтних робітників дорівнюють:

– до модернізації:

$$S_{ТОЗ} = \frac{3885,44}{8950} \cdot 1,3 \cdot 1,25 \cdot 11,15 \cdot 12 \cdot 1,57 \cdot (1 + 0,362) = 201,83 \text{ грн};$$

– після модернізації:

$$S_{ТОЗ} = \frac{3885,44}{8950} \cdot 1,3 \cdot 1,25 \cdot 12,80 \cdot 12 \cdot 1,57 \cdot (1 + 0,362) = 231,70 \text{ грн}.$$

Відповідно витрати на матеріали та запасні частини:

– до модернізації:

$$S_{ТОМ} = 1,1 \cdot \frac{201,83 \cdot (1 - 0,362)}{1,3} \cdot 1,25 = 108,95 \text{ грн};$$

– після модернізації:

$$S_{ТОМ} = 1,1 \cdot \frac{231,70 \cdot (1 - 0,362)}{1,3} \cdot 1,25 = 125,08 \text{ грн};$$

Таким чином, витрати на технічне обслуговування і поточний ремонт системи:

– до модернізації складають:

$$S_{ТО} = 201,83 + 108,95 = 310,78 \text{ грн};$$

– після модернізації:

$$S_{ТО} = 231,70 + 125,08 = 356,78 \text{ грн}.$$

Величину витрат на електроенергію визначимо за формулою:

$$S_{EЛ} = K_{1n} W_{EЛ} C_{КЛ} T_P, \quad (4.11)$$

де  $C_{EЛ}$  – ціна 1 кВт·год електроенергії для підприємств;

,  $W_{EЛ}$  – витрата за годину енергії, кВт·год.

До модернізації електропривод споживав 1,1 кВт·год, після модернізації споживання електроенергії зменшилося на 20% і складає 0,88 кВт·год.

Відповідно, витрати на електроенергію становили:

– до модернізації:

$$S_{EЛ} = 5923,74 \text{ грн};$$

– після модернізації:

$$S_{EЛ} = 4738,99 \text{ грн}.$$

Розрахунок суми річних витрат на експлуатацію зводимо до таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Сума річних витрат на експлуатацію

Найменування статті витрат	Величина витрат, грн	
	До модернізації	Після модернізації
Заробітна плата з нарахуваннями	77395,05	77395,05
ТО та поточний ремонт	310,78	356,78
Електроенергія	5923,74	4738,99
Всього	83629,57	82490,82

Вартість машино-годин розрахуємо за формулою:

$$S_{ix} = \frac{S}{\dot{O}_D}. \quad (4.12)$$

До модернізації:

$$S_{MЧ} = \frac{83629,57}{3885,44} = 21,52 \text{ грн / год},$$

після модернізації:

$$S_{MЧ} = \frac{82490,82}{3885,44} = 21,23 \text{ грн / год}.$$

Вартість технологічної операції для одиниці продукції визначається за формулою:

$$S_{1П} = \frac{S}{B}. \quad (4.13)$$

До модернізації:

$$S'_{1П} = \frac{83629,57}{13,87 \cdot 10^6} = 0,006 \text{ грн / од}.$$

після модернізації:

$$S_{1П} = \frac{82490,82}{14,6 \cdot 10^6} = 0,0056 \text{ грн / од}.$$

### 4.3 Розрахунок змін основних показників діяльності підприємства

Економічний ефект від проведення модернізації визначається за формулою:

$$E = (S'_{1П} - S_{1П})B. \quad (4.14)$$

Тоді

$$E = (0,006 - 0,0056) \cdot 14,6 \cdot 10^6 = 6945 \text{ грн}.$$

Термін окупності витрат після модернізації визначимо за формулою:

$$T_M = \frac{Z_M}{E}. \quad (4.15)$$

Тоді

$$T_M = \frac{7071,57}{5840} = 1,02 \text{ років} \approx 12 \text{ місяців} .$$

Виходячи із проведених розрахунків, можна зробити такі висновки:

- витрати на модернізацію склали 7071,57 грн;
- витрати на заробітну плату робітників, які обслуговують установку, не змінилися;
- витрати на ТО і ПР після проведення модернізації збільшилися на 14,8%;
- витрати на електроенергію після проведення модернізації зменшилися на 20%;
- вартість машино-години роботи після модернізації зменшилася на 1,34%;
- вартість технологічної операції для одиниці продукції після модернізації знижена на 6,6%;
- економічний ефект від проведення модернізації склав 6945 грн/рік;
- термін окупності витрат на модернізацію склав 12 місяців.

## 5. БЕЗПЕКА ПРАЦІ ПРИ МОНТАЖІ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

### 5.1 Забезпечення безпеки при виконанні монтажних налагоджувальних робіт

Для обслуговуючого персоналу небезпечними чинниками є рухомі частини машин і механізмів, механічних передач, а також струмоведучі частини системи електроживлення і кіл управління. Небезпечний і металевий корпус, якщо за відсутності його заземлення (занулення) трапляється пошкодження ізоляції і він опиниться під напругою.

Велику небезпеку представляє раптовий пуск агрегата в той час, коли на приводі знаходяться люди, що проводять які-небудь роботи.

Для пробних вмикань і вимикань електроприводу під час його налагоджування та регулювання допускається тимчасове вмикання допоміжних і силових кіл приводу, а також подавання повітря в привод та на вимикач. У цьому разі слід зняти плакати "Не вмикати! Працюють люди" та "Не відкривати! Працюють люди".

Дистанційно вмикати та вимикати електропривод під час його випробування дозволяється оперативним та оперативно-виробничим працівникам, якщо це обумовлено нарядом в "Окремих вказівках".

Роботи по монтажу устаткування необхідно виконувати відповідно до проекту виконання робіт (далі по тексту – ПВР), розробленого, затвердженого і виданого до виконання робіт у встановленому порядку [9].

Перед випробуванням устаткування необхідно здійснити контроль виконання всіх необхідних врізань для первинних перетворювачів вимірювальних приладів і регуляторів відповідно до проекту автоматизації технологічних процесів.

При виконанні робіт у безпосередній близькості від діючого устаткування монтажна площадка повинна бути відділена перешкодами, що відповідають рівню небезпеки або шкідливості технологічних факторів даного діючого

виробництва з урахуванням вимог «Правил пожежної безпеки в Україні. Загальні вимоги» [9].

## **5.2 Забезпечення безпеки при експлуатації системи електроприводу**

Щоб уникнути нещасних випадків при експлуатації електроприводів, необхідно дотримуватись ряду спеціальних вимог правил техніки безпеки:

1. При огляді, очищенні від пилу кожухів електродвигуна і апаратури управління без відключення і зупинки електроприводу слід переконатися, що корпуси і кожухи надійно приєднані до магістралі заземлення або нульового дроту.

2. Всі неізольовані струмоведучі частини і частини електроприводу, що обертаються, повинні мати огорожі, знімати які під час роботи не допускається.

3. Роботи по поточному ремонту і випробуванням ізоляції приводного електродвигуна і пускорегулюючих апаратів доручаються тільки електротехнічному персоналу, який в електроустановках до 1000

В повинен мати кваліфікаційну групу по ТБ не нижче III, вище 1000 В - групу

IV. Роботи, що проводяться черговим персоналом на закріпленому за ним цеховому електрообладнанні, проводяться в порядку поточної експлуатації (перелік робіт затверджується особою, відповідальною за електрогосподарство підприємства, наприклад головним енергетиком або начальником електровідділу) з дотриманням наступних заходів безпеки:

а) після відключення електроприводу для проведення на ньому яких-небудь робіт необхідно на пусковому пристрої повісити заборонний переносний плакат з написом «Не включати - працюють люди!». При цьому повинен бути або видимий розрив кола, або між контактами закритого апарату, наприклад контактора, прокладений листовий ізоляційний матеріал, або від'єднані дроти живлення, що відходять в сторону електродвигуна;

б) якщо електродвигун силової установки (насоса, вентилятора,

компресора і т. п.) працює при напрузі вище 1000В, наприклад 6 кВ, і отримує живлення шин розподільчого пристрою підстанції, то необхідно на цій підстанції відключити

живлячий кабель вимикачем і роз'єднувачем (видимий розрив кола!), замкнути їх приводи і вивісити на приводах вимикача і роз'єднувача заборонні плакати. Про відключення двигуна в ремонт у журналі чергового робиться запис із вказанням прізвища особи, що дала вказівку про відключення електроприводу. Знімати попереджувальні плакати і включати електропривод в роботу можна тільки після закінчення роботи на ньому і оформлення закінчення записом в журналі;

в) на електродвигуні, що обертається, дозволяється шліфування контактних кілець скляною шкіркою при допомозі дерев'яної колодки. Інструменти, що застосовуються при цьому повинні бути з ізолюючими ручками;

г) допускаються роботи в колі пускового реостата у включеного асинхронного електродвигуна з контактними кільцями, але за умови, що ротор замкнений накоротко при повністю виведеному опорі реостата. При цьому слід стояти на гумовому килимку або бути в діелектричних калошах і працювати інструментами з ізольованими ручками. Робота в пускових апаратах, встановлених в колі живлення обмоток статора, допускається тільки при знятій напрузі з струмоведучих частин;

д) якщо в ремонт виведений електродвигун насоса або вентилятора, то необхідно попередити обертання електроприводу з боку механізму (насос може почати працювати як турбіна, вентилятор - прийти в рух від натиску повітря), для чого слід закрити відповідні вентиля на трубопроводі або шибери на повітроводі вентиляційної установки.

4. Перед пуском слід подавати звуковий сигнал для попередження робочих щоб уникнути травмування їх раптовим рухом механізмів.

## ВИСНОВКИ

В результаті написання кваліфікаційної роботи виконана модернізація автоматизованого електроприводу устаткування для нейтралізації соняшникової олії.

Розроблено САК швидкістю. У рамках цього здійснено вибір двигуна, розраховано елементи схеми, розроблено математичну модель САК,.

Моделювання роботи приводу у середовищі *Simulink MATLAB* при подачі на її вхід задаючого впливу  $\omega_z = 15,7 \text{ рад/с}$  показало, що система характеризується наступними значеннями показників якості перехідного процесу:

- перерегулювання  $\Delta = 6,9 \%$ ;
- час перехідного процесу  $t_{nn} = 0,05 \text{ с}$ ;
- статична похибка – відсутня.

За допомогою критеріїв Гурвіца і Найквіста доведено стійкість розробленої системи.

Розрахована економічна ефективність модернізації електропривода. У результаті річний економічний ефект склав 6945 грн., а термін окупності капітальних вкладень – 12 місяців.

В результаті написання роботи були виконані наступні задачі:

1. Наведено загальну характеристику технологічного процесу нейтралізації соняшникової олії, а також розглянуто характеристики обладнання, необхідні для виконання процесу.
2. Сформульовано вимоги до електроприводу устаткування для нейтралізації соняшникової олії, наведено схему управління електроприводом.
3. Виконано моделювання динамічних режимів роботи електропривода.
4. Показано доцільність модернізації електроприводу устаткування для нейтралізації соняшникової олії шляхом розрахунку економічних показників.
5. Розглянуто питання безпеки праці при виконанні монтажних-налагоджувальних робіт і експлуатації системи електроприводу.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Лисов В.С. Автоматизація процесу рафінації олії. Кваліфікаційна робота бакалавра. Сумський державний університет, 2020. – 50 с.
2. Захарченко А.С., Соколов С.В. Система керування процесом рафінації масла/ Матеріали науково-технічної конференції ІМА. Автоматика, електромеханіка і системи управління. – Суми. – 2018. – с.172.
3. Ромашко І.С., Паска М.З., та ін. Технохімічний контроль виробництва/ Навчально-методичний посібник. – Львів. – 2016. – 98с.
4. Фіалковська Л.В., Дейдей М.М. Удосконалення апаратурно технологічної схеми нейтралізації олії./ Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. Серія:Технічні науки.– Вінниця.– 2011.– №9. – с.187-189.
5. Обладнання підприємств переробної і харчової промисловості / І.С. Гулий, М.М. Пушанко, Л.О. Орлов та ін. За ред. академіка УААН Гулого І.С. – Вінниця: Нова книга, 2001 – 576 с
6. Шульга О.В. Методичні вказівки і завдання до виконання курсового проекту з дисципліни “Електропривід і автоматизація роботів і маніпуляторів” для студентів спеціальності 7.092203 “Електромеханічні системи автоматизації і електропривод” всіх форм навчання. – Полтава: Полтавський державний технічний університет імені Юрія Кондратюка, 1999. – 24 с.
7. Онушко В.В. Машини постійного струму: Посібник із модуля “Машини постійного струму” / В.В. Онушко, О.В. Шефер. – Полтава: ПолтНТУ, 2007. – 111 с.
8. Загірняк М. В., Невзлін Б. І. Електричні машини: Підручник. — 2-ге вид., перероб. і доп. — Київ: Знання, 2009. — 400 с. — ISBN 978-966-346-644-6.
9. Попович М.Г. Теорія автоматичного керування: Підручник. – 2-ге вид. / М.Г. Попович, О.В. Ковальчук. – К.: Либідь, 2007. – 656 с.
10. Монтаж, наладка і експлуатація електрообладнання. Джерело: \_

<https://dspace.mnau.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/11538/3/ciganov-montazh-elektroobl-lekc-2022.pdf>

11. Правила безпечної роботи електроустановок. Харків, «Форт», 2003. – 250с.

12. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи магістра для здобувачів СВО «Бакалавр» спеціальності 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», галузі знань 14 – «Електрична інженерія» / Укладачі: П.І. Осадчук, В.Ф. Бабіч, А.А. Галіулін, Є.П. Штепа. – Одеса: ОНТУ, 2021. – 55 с.