

Міністерство освіти і науки України
ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кафедра електромеханіки та мехатроніки



«

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
ДО КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ МАГІСТРА**

**на тему «Дослідження та вдосконалення автоматизованого
електроприводу живильного насосу парового котла»**

Здобувача Андрешкова А.В.

2 курсу АЕММ-20 групи

Керівник: к.т.н., доцент Бабіч В.Ф.

Кваліфікаційна робота допускається до захисту

Рішення кафедри від 19 грудня 2023 р., протокол № 5.

Завідувач кафедри Е та М _____ Петро Осадчук

Одеса – 2023 рік

ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

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

Факультет: *Автоматизації та робототехніки*

Кафедра: *Електромеханіки та мехатроніки*

Освітньо-кваліфікаційний рівень: *магістр*

Галузь знань: *14 – Електрична інженерія*

Спеціальність: *141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка*

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Зав. кафедри ЕтаМ

Д.т.н., доц. Осадчук П.І.

« ____ » _____ 2023 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА здобувачу вищої освіти

Андрешкову Артему Васильовичу

1 Тема роботи: «Дослідження та вдосконалення автоматизованого електроприводу живильного насосу парового котла»

Керівник роботи: Бабіч Владислав Федорович, к.т.н., доцент.

2 Затверджено наказом ОНТУ № 841-03 від 15.11.2022 р.

Строк подання студентом роботи: 18.12.2023 р.

3 Вихідні дані до роботи: Живильний насос парового котла VYNCKE типу HGM 3/10 продуктивністю $Q_n = 44,1$ т/год, тиск 10,0 МПа. Режим роботи – безперервний.

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

Вступ. 1. Загальна характеристика роботи. Актуальність теми. Об'єкт і мета роботи.

2 Розрахунково-конструкторська частина. Опис технологічної схеми котла. Загальна характеристика електропривода живильного насоса, як об'єкта управління. Опис принципу дії, конструкції та кінематичної схеми живильного насоса. Методи регулювання швидкості обертання електроприводу насоса. Формулювання вимог до електроприводу насоса, обґрунтування типу двигуна, розрахунок його потужності. Розрахунок статичних характеристик двигуна.

3 Дослідження роботи електропривода живильного насоса на моделі. Обґрунтування вибору, розробка структурних і функціональних схем та розрахунок параметрів окремих елементів системи електроприводу насоса. Опис системи ПЧ-АД. Моделювання динамічних режимів електромеханічної системи насоса до і після модернізації.

4 Економічна частина. Розрахунок економічної ефективності від модернізації електроприводу.

5 Висновки і рекомендації за прийнятими в роботі рішеннями.

Список використаних джерел.

5 Перелік демонстраційного матеріалу: слайди презентації (20 шт.):

1 Титульний. 2 Мета, задачі, методи. 3 Технологічна схема живильного тракту котла. 4 Розрахунок потужності двигуна, технічні характеристики. 5 Статичні характеристики електропривода. 6 Структурна схема перетворювача частоти. 7 Принципова електрична схема силової частини. 8 Модель електроприводу насоса з прямим пуском. 9 Результати моделювання приводу з прямим пуском. 10. Модель електроприводу живильного насоса з ПЧ. 11-19. Результати моделювання приводу з векторним керуванням. 20 Висновки.

6 Консультанти розділів проекту (роботи)

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

7 Дата видачі завдання: 17.08.2023 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи бакалавра	Строк виконання етапів	Прим.
1	Вступ. 1. Загальна характеристика роботи. Актуальність теми. Об'єкт і мета роботи.	05.09.2023	
2	2 Опис технологічної схеми котла. Загальна характеристика електропривода живильного насоса, як об'єкта управління. Опис принципу дії, конструкції та кінематичної схеми живильного насоса. Методи регулювання швидкості обертання електроприводу насоса. Формулювання вимог до електроприводу насоса, обґрунтування типу двигуна, розрахунок його потужності. Розрахунок статичних характеристик двигуна.	18.10.2023	
3	3 Дослідження роботи електропривода живильного насоса на моделі. Обґрунтування вибору, розробка структурних і функціональних схем та розрахунок параметрів окремих елементів системи електроприводу насоса. Опис системи ПЧ-АД. Моделювання динамічних режимів електромеханічної системи насоса з скалярним та векторним керуванням.	22.11.2023	
4	4 Економічна частина. Розрахунок економічної ефективності від модернізації електроприводу.	05.12.2023	
5	5 Висновки і рекомендації за прийнятими в роботі рішеннями.		
6	Попередній захист кваліфікаційної роботи магістра	18.12.2023	
7	Перевірка роботи на доброчесність. Рецензування роботи	19.12.2023	
8	Захист кваліфікаційної роботи магістра	25.12.2023	

Здобувач СВО «магістр» _____ Андрешков А.В.

Керівник _____ Бабіч В.Ф.

Несу відповідальність за ідентичність електронного та друкованого тексту кваліфікаційної роботи, даю згоду на обробку персональних даних та не проти розміщення кваліфікаційної роботи на офіційних web-ресурсах ОНТУ.

Підтверджую, що в кваліфікаційній роботі відсутні порушення академічної доброчесності. Здобувач СВО _____ Андрешков А.В.

РЕФЕРАТ

Андрешков А.В. «Дослідження та вдосконалення автоматизованого електроприводу живильного насоса парового котла». Кваліфікаційна робота магістра. – Одеса: ОНТУ, 2023. – 85 с. Бібл.: 10. Іл.: 31. Табл.: 6. Слайдів: 21.

Розроблені вимоги до модернізації електропривода відцентрового живильного насоса парового котла для плавного регулювання його продуктивності.

Розрахована потужність двигуна, вибрані апарати управління і захисту схеми управління електропривода насоса. Обґрунтовано застосування перетворювача частоти в системі управління електропривода живильного насоса парового котла, розроблена схема автоматичного управління насоса з використанням перетворювача частоти.

Розраховані параметри схеми заміщення асинхронного двигуна, проведено моделювання роботи електропривода при прямому пуску і плавному пуску з частотним регулюванням в пакеті моделювання Matlab-Simulink. Проведено аналіз динамічних властивостей електроприводу насосної установки парового котла.

Розрахована економічна ефективність від модернізації електропривода живильного насоса парового котла.

Ключові слова: парови котел, відцентровий живильний насос, електропривод, асинхронний двигун, перетворювач частоти.

ABSTRACT

Andreshkov A.V. " Research and improvement of the automated electric drive of the feed pump of a steam boiler ". Master's qualification work. – Odessa: ONTU, 2023. – 85 p. Bibl .: 10. Il .: 31. Tabl .: 6. Slide: 21.

Requirements for modernization of the electric drive of the centrifugal feed pump of the steam boiler for smooth regulation of its productivity are developed.

Calculated engine power, selected control devices and protection of the control circuit of the pump electric drive. The use of the frequency converter in the control system of the electric drive of the feed pump of the steam boiler is substantiated, the scheme of automatic control of the pump with the use of the frequency converter is developed. frequency control in Matlab-Simulink.

Calculated economic efficiency from modernization electric drive of the steam pump feed pump

Keywords: steam boiler, centrifugal feed pump, electric drive, induction motor, frequency converter.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ І ОДИНИЦЬ	8
ВСТУП.....	9
1 ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА НАУКОВО-ПРАКТИЧНОГО НАПРЯМУ РОБОТИ	12
1.1 Опис технологічної схеми водотрубного парового котла компанії VYNCKE типу WTB-V.....	12
1.2 Панель управління котлом.....	17
1.3 Візуалізація	18
1.4 Основні вимоги до насосних установок живильної води.....	21
1.5 Розрахунок параметрів і вибір живильних насосів	21
2 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ І ХАРАКТЕРИСТИК РЕГУЛЬОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА ЖИВИЛЬНОГО НАСОСУ	28
2.1 Вибір електродвигуна	28
2.2 Визначення параметрів схеми заміщення АД.....	28
2.3 Simulink-програма для розрахунку параметрів асинхронного двигуна	35
2.4 Вибір перетворювача частоти.....	36
2.5 Вибір типу системи керування електроприводом на основі ПЧ.....	44
3 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА НАСОСА	49
3.1 Побудова механічної характеристики насоса	49
3.2 Побудова сімейства механічних характеристик двигуна	50
3.3 Дослідження динамічних характеристик асинхронного двигуна при прямому пуску	53
3.4 Дослідження динамічних характеристик асинхронного електропривода з широтно-імпульсним перетворювачем.....	56

					KPM.EmM.1.841-03.1.8			
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	Дослідження та вдосконалення автоматизованого електроприводу живильного насосу	<i>Літ.</i>	<i>Аркуш</i>	<i>Аркушіє</i>
Розробив		Андрешков А.В..					6	
Керівник		Бабіч В.Ф.				ОНТУ, АЕМм-20а		
Зав.кафедри		Осадчук П.І.						

3.5 Дослідження динамічних характеристик асинхронного електроприводу з векторним керуванням та мережевим інвертором	59
3.5.1 Рекуперування енергії мережевими інверторами.....	59
3.5.2 Розрахунок оптимальних параметрів налаштування регуляторів струмом для ідеального джерела струму	65
3.5.3 Розрахунок оптимальних параметрів налаштування регулятора потоку при ідеальному джерелі струму.....	68
3.5.4 Розрахунок оптимальних параметрів налаштування регулятора швидкості при ідеальному джерелі струму.....	71
4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА.....	81
4.1 Розрахунок витрат при використанні існуючого електроприводу насосу.....	81
4.2 Розрахунок витрат у проектному варіанті (з ПЧ-АД).....	83
5 РЕЗУЛЬТАТИВНА ЧАСТИНА	86
5.1 Висновки та рекомендації на основі рішень, прийнятих у цьому дослідженні	86
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	88

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ І ОДИНИЦЬ

АД – асинхронний двигун;
ЕП – електропривод;
ВЖН – відцентровий живильний насос;
ДШ – датчик швидкості;
ПЧ – перетворювач частоти;
АН – автономний інвертор напруги;
ШІМ – широтно-імпульсна модуляція;
ККД, η – коефіцієнт корисної дії;
 ω – кутова швидкість (частота обертання), рад/с;
М – момент сили, Н·м;
Н, h – тиск, Па;
Q – продуктивність, м³/с;
P, N – потужність, Вт;
I, i – струм (сила електричного струму), А;
 Ψ , ψ – потокозчеплення, Вб;
f – частота, Гц;
R, r – електричний опір, Ом;
T, t – час, с;
L, l – індуктивність, Гн;
S, s – ковзання, %;
J, j – момент інерції, кг·м².

ВСТУП

Одним з ключових факторів підвищення продуктивності праці та якості продукції є автоматизація процесів виробництва тепла в котельнях. Така автоматизація забезпечує безпечні умови експлуатації, зменшує викиди шкідливих речовин в атмосферу та звільняє людей від монотонної та важкої праці.

Наразі понад 90 % виробленої енергії споживають системи електроприводу, електротехнічні та освітлювальні установки. Значний потенціал енергозбереження полягає в удосконаленні електроприводів, на які припадає близько 60% загального споживання електроенергії. У деяких галузях промисловості електроприводи споживають до 80% електроенергії. Енергію можна заощадити і покращити керування процесом, узгодивши швидкість двигуна зі швидкістю робочого механізму.

Використання мікропроцесорних систем управління технологічними процесами може зробити управління процесами більш гнучким і оперативним, одночасно адаптуючи впливи навколишнього середовища на роботу об'єкта управління.

Управління теплогенеруючих установок повинно забезпечувати підтримку ряду якісних показників роботи обладнання, а також вироблення теплової енергії. Таким чином, сучасні установки і технічні процеси, що здійснюються в них, вимагають широкого використання сучасних засобів автоматичного управління, заснованих на постійному моніторингу, різних вимірювальних приладів і безперервному отриманні інформації про хід процесу за допомогою відповідних вимірювань. У зв'язку з цим необхідність створення автоматичних систем управління технологічними процесами (АСУ ТП) в управлінні тепловими енергогенеруючими та електромеханічними установками обумовлена рядом причин, найбільш важливими з яких є

- зростаючі економічні вимоги до енерговитрат на виробництво продукції;
- велика кількість інформації, яку необхідно обробляти;
- складність управління.

Системи управління технологічними процесами повинні вирішувати такі основні завдання:

- збір та первинну обробку інформації про стан об'єкта управління;
- оптимальне керування для зменшення втрат;
- регулювання параметрів процесу;
- облік на робочих місцях і в масштабах підприємства;
- діагностичний контроль робочого стану обладнання;
- оперативне управління режимами роботи системи.

Для парових котлів малої та середньої потужності основними робочими параметрами є управління процесом горіння палива, тиском і температурою пари. Ці параметри коливаються під впливом зміни навантаження котла, якості живильної води (температури і тиску) та інших збурень. Крім того, конструктивні особливості, потужність і режим роботи котлоагрегату впливають на структуру блоку управління.

Котельний агрегат WTB-V виробництва німецької компанії VYNCKE відноситься до категорії парових котлів і забезпечує подачу перегрітої пари на парову турбіну для вироблення електроенергії та задоволення потреб виробничого процесу. Особливістю цього парового котла є використання в якості палива відходів виробництва - негранульованого лушпиння соняшника.

Надійна робота цього котлоагрегату забезпечується застосуванням якісного електромеханічного обладнання, в тому числі живильних насосів, електропривод яких споживає значну потужність.

В даній кваліфікаційній роботі було розглянуто питання автоматизації пароводяного тракту парового котла WTB-V, а також виконана детальна розробка системи автоматичного керування електроприводом живильного насоса.

Актуальність теми

Актуальність теми визначається потребою в забезпеченні стійкої і економічної роботи живильних насосів при використанні сучасних засобів та законів частотного регулювання асинхронного електроприводу.

Мета дослідження

Метою роботи є дослідження електропривода живильної насосної установки котла WTB-V з скалярним та векторним частотним керуванням, що дозволяє підвищити показники якості регулювання та енергозбереження.

Об'єкт дослідження

Об'єктом дослідження є процеси керування асинхронним електроприводом.

Предмет дослідження

Предметом дослідження є асинхронний електропривод з скалярним та векторним частотним керуванням.

Задачі дослідження

1. Провести аналіз проблем керування, технічних характеристик, особливостей роботи асинхронного електроприводу насосної установки.
2. Запропонувати структуру системи керування і провести оптимізацію параметрів контурів регулювання електропривода.
3. Розробити математичні моделі асинхронного електропривода з скалярним та векторним частотним керуванням на базі запропонованої структури системи керування.
4. Провести аналіз динамічних властивостей електроприводу насосної установки.

1 ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА НАУКОВО-ПРАКТИЧНОГО НАПРЯМУ РОБОТИ

1.1 Опис технологічної схеми водотрубного парового котла компанії VYNCKE типу WTB-V

Водотрубний паровий котел WTB-V компанії VYNCKE був розроблений для постачання перегрітої пари на новий завод з виробництва соняшникової олії в Україні.

Технічні характеристики та режимні параметри парового котла WTB-V наведені в таблицях 1.1 та 1.2.

Таблиця 1.1 – Технічні характеристик парового котла WTB-V

Параметр	Значення
Вид палива	Лушпиння соняшника (негранульовані)
Кількість котлів на підприємстві	2
Тип котла	Вертикальний водотрубний
Число радіантних газоходів	3
Число блоків випарника	2
Число пакетів пароперегрівача	3
Число блоків економайзера	5
Тип циркуляції	Природна
Тип циркуляції в економайзері	Примусова
Середовище	Перегріта пара
Тиск пара на виході з пароперегрівача	6,5 МПа
Температура пари на виході з пароперегрівача	450 °С
Температура живильної води (деаератор на виході)	105 °С

Таблиця 1.2 – Режимні параметри парового котла типу WTB-V

Параметр	Од. вим.	100%	85%	75%	60%	40%
Температура пари	°С	450	+/- 440	+/- 420	+/- 400	+/- 350
Тиск пари	МПа	6,5	6,5	6,5	6,5	,5
Продуктивність одного котла	т/год	38	32,3	28,5	22,8	15,2
Продуктивність двох котлів	т/год	76	64,6	57	45,6	30,4

Паровий котел WTB-V складається з газоповітряного та пароводяного трактів.
Технологічна схема пароводяного тракту котла показана на рисунку 1.1.

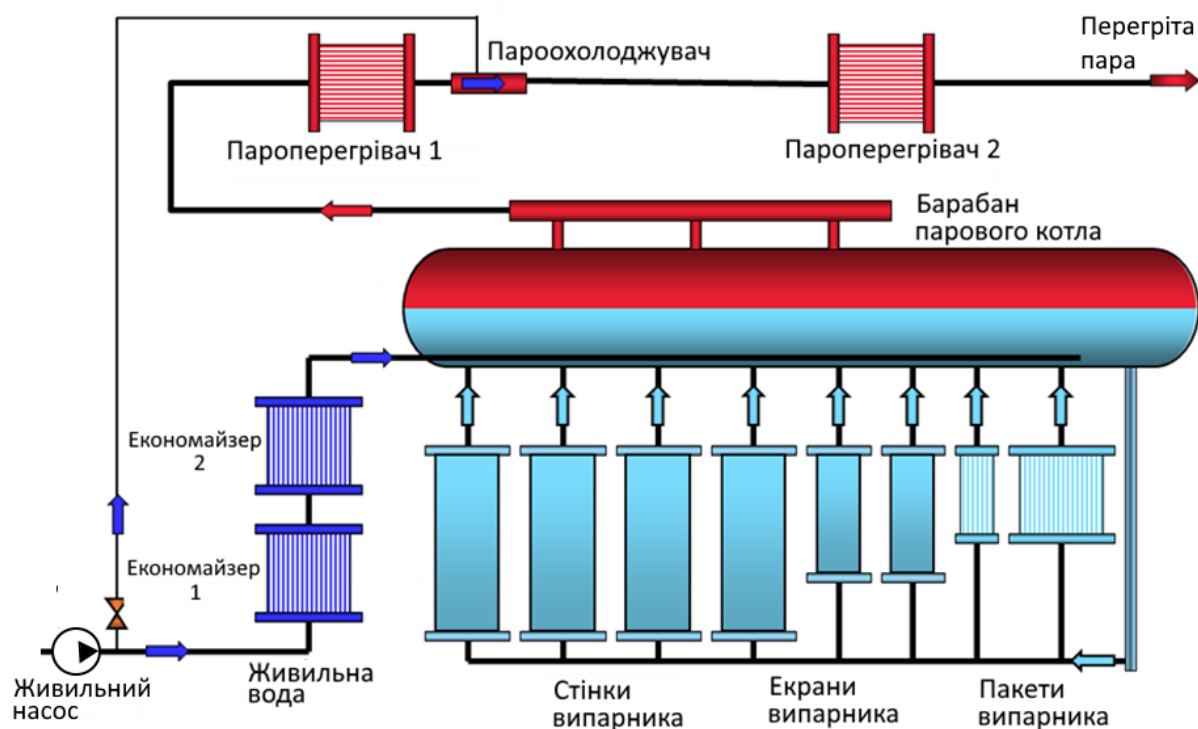


Рисунок 1.1 – Технологічна схема пароводяного тракту парового котла WTB-V

Конструкція парового котла WTB-V показана на рисунку 1.2.

Газоповітряний тракт вертикального водотрубного котла WTB-V складається з трьох основних частин:

- 1 – екранна топка;
- 2 – радіаційна секція;
- 3 – конвекційна секція.

Конвекційна секція містить три частини пароводяного тракту:

- 3.1 – передній випарник;
- 3.2 – перегрівач;
- 3.3 – задній випарник;
- 3.4 – економайзер;
- 4 – барабан.

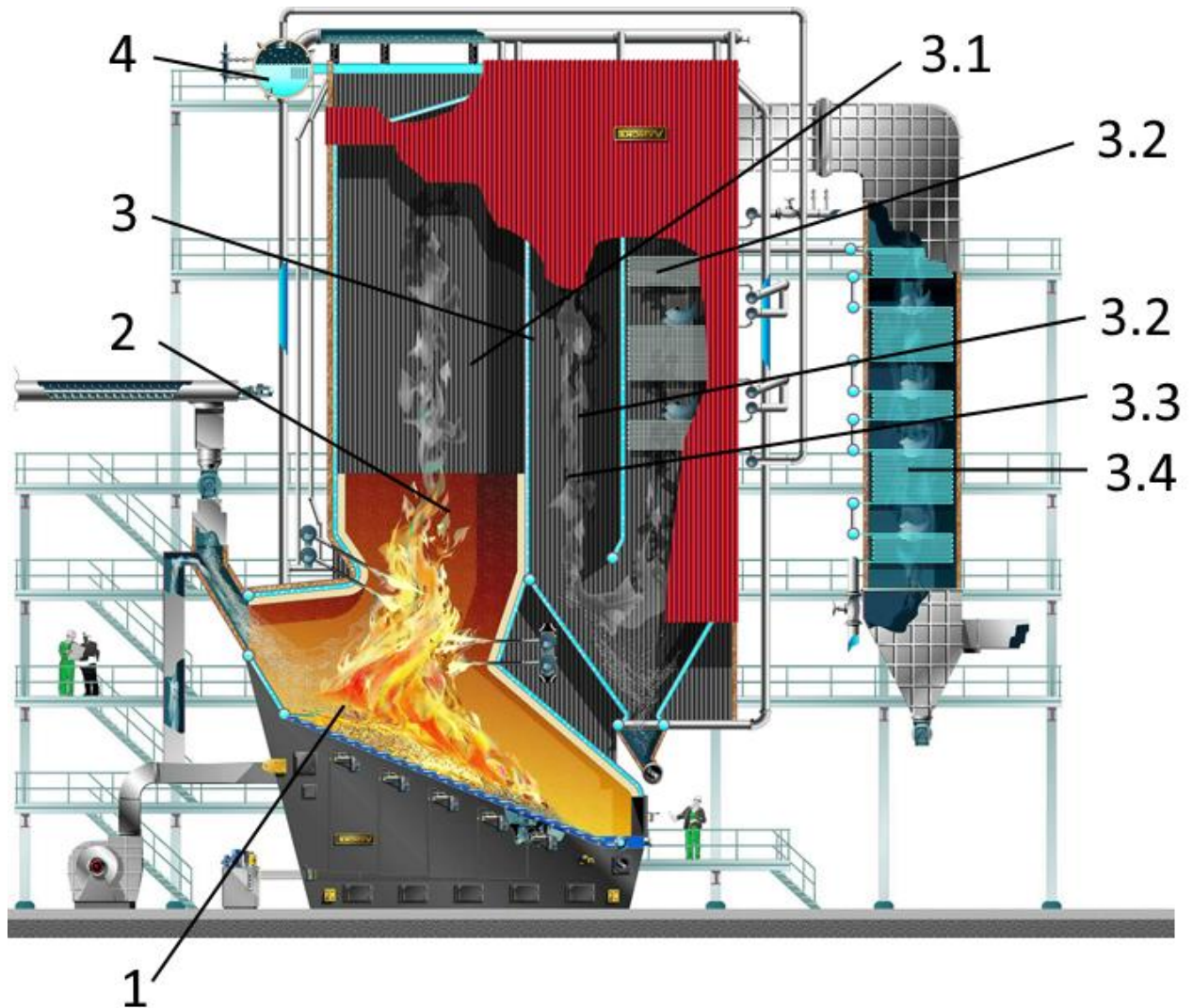


Рисунок 1.2 – Конструкція газоповітряного тракту парового котла типу WTB-V

Котел виробляє пару наступним чином:

Лущиння соняшника спалюється на динамічній водоохолоджуваній ступінчастій колосниковій решітці 1, що являє собою конструкцію у вигляді сходів, приварену між двома порожнистими балками (рисунок 1.3).

Циркуляційний насос перекачує охолоджуючу воду від однієї балки до іншої через решітку. Різниця температур на вході і виході з решітки становить лише кілька °С. Температура ступінчастої решітки трохи вища за температуру води, приблизно 100... 130 °С.

Поглинуте тепло використовується для підігріву живильної води або зворотного конденсату від технологічного споживача або когенераційної

установки. Якщо поглинутої теплоти не вистачає, вона розсіюється в зовнішньому теплообміннику.



Рисунок 1.3 – Динамічна ступенчаста решітка з водяним охолодженням

Повне згоряння палива відбувається при підтримці оптимального співвідношення надлишку повітря в топці шляхом регулювання подачі повітря за допомогою відцентрового вентилятора.

Екранована топка 2 (рисунок 1.2) інтегрована з котлом, а бічні стінки і дах топки повністю охолоджуються мембранними панелями котла.

Мембранні панелі топкової камери повністю футеровані вогнетривким бетоном. Для мінімізації інвестиційних витрат і витрат на технічне обслуговування, а також для максимізації експлуатаційної готовності котла, використання звичайного бетону не розглядається.

Екранування топки дозволяє знизити температуру поверхні до рівня, значно нижчого за температуру плавлення золи, що дозволяє уникнути надмірного прилипання золи до стінок топки. Таким чином, попереднє нагрівання повітря для горіння обмежується до мінімуму. Це дозволяє підтримувати температуру поверхні екрану нижче температури плавлення золи.

Температуру горіння можна регулювати завдяки інтеграції топки в конструкцію котла. Тому концепція котла надзвичайно ефективна при спалюванні палива з високою низькою теплотою згоряння.

Люк в задній стінці топки забезпечує безперешкодний доступ до котла. У задній стінці є досить велике оглядове вікно для спостереження за процесом спалювання палива в топці.

Промениста частина котла 3 (рисунок 1.2) розділена на три газоходи двома внутрішніми мембранними екранами.

Відпрацьовані гази, що піднімаються з колосникової решітки і топки, надходять у перший вільний газохід.

У цьому першому вільному газоході відбувається спалювання димових газів. Швидка подача вторинного повітря на вхід першого вільного газоходу активно сприяє спалюванню димових газів.

Поки димові гази знаходяться у вільних газоходах 1 і 2, вони охолоджуються випромінюванням до температури, при якій передача тепла випромінюванням є неефективною.

Конвекційна секція 3 (рисунок 1.2) складається з переднього випарника 3.1, пароперегрівача 3.2, заднього випарника 3.3 та економайзера 3.4.

Хімічно очищена живильна вода подається в економайзери живильними насосами і підігрівається відпрацьованими газами для підвищення ефективності котла.

Перший випарник 3.1 встановлений на вході в пароперегрівач і захищає останню ступінь пароперегрівача від гарячих відпрацьованих газів. Це максимізує термін служби пароперегрівача. Це робиться для того, щоб уникнути високотемпературної корозії пароперегрівача через високий вміст хлору і сірки в паливі.

Перегрівач 3.2 використовується для перегріву насиченої пари до температури перегрітої пари.

Перегрівач розділений на три ступені. Між першим і другим ступенями та між другим і третім ступенями в потік пари вприскується охолоджуюча вода для регулювання температури перегрітої пари. Охолоджуюча вода подається живильними насосами, які забезпечують котли хімічно очищеною водою. Перегрівач третього ступеня (пакет високотемпературних перегрівачів)

включений в паралельний потік. Це гарантує, що температура поверхні сталевого пароперегрівача підтримується на якомога нижчому рівні. Низька температура поверхні уповільнює початок гарячої корозії. Для захисту пароперегрівача навколо сажового вентилятора встановлений захисний кожух.

Конвекційний випарник (задній трубний пучок) 3.3 встановлений за пароперегрівачем для охолодження відпрацьованих газів перед входом в економайзер. Це необхідно для того, щоб уникнути утворення пари в економайзері, що може призвести до пошкодження трубного пучка економайзера.

Економайзери 3.4. Економайзери знижують температуру відпрацьованих газів, що підвищує ефективність котла і, відповідно, зменшує споживання палива.

Економайзери встановлюються між насосом живильної води та котлом. Хімічно очищена вода перед подачею в котел нагрівається в економайзері, а відпрацьовані гази, що виходять з котла, охолоджуються.

Парові барабани 4 (рисунок 1.2) використовуються для відділення пари від поверхні води. Відокремлена насичена пара надходить у вихідний колектор барабана. Котельна вода надходить в опускную трубу і розподіляється по окремих секціях випарника. Хімічно оброблена і попередньо підігріта живильна вода рівномірно розподіляється по всій довжині барабана з економайзера.

1.2 Панель управління котлом

Панель управління містить всі пристрої управління і контролю безпеки, які забезпечують автоматичну роботу установки. Панель включає програмований логічний контролер (ПЛК) для управління процесом, схему аварійного захисту для контролю стану безпеки основного блоку і систему управління двигуном (МСС). Все обладнання змонтовано в міцних шафах Rittal (або аналогічних).

ПЛК контролює всі параметри процесу і здійснює логічне управління всіма виконавчими механізмами і електродвигунами, а також видає відповідні аварійні сигнали. Серед інших функцій ПЛК включає пропорційне регулювання

інтенсивності горіння і всі інші схеми управління, необхідні для нормальної роботи установки.

Схема аварійного захисту контролює стан запобіжників, які є критично важливими для безпеки установки. У разі тривоги або спрацьовування аварійного вимикача установка безпечно вимикається.

ММС включає захист від перегріву для головного вимикача, контакторів і всіх електродвигунів.

Залежно від розміру установки, система керування може бути розділена на кілька панелей керування (панель МСС, панель ПЛК та/або локальна панель).

1.3 Візуалізація

Комп'ютеризована система моніторингу з людино-машинним інтерфейсом (НМІ) дозволяє оператору безперешкодно керувати котлом, оскільки всі параметри процесу, стан двигуна, виміряні значення та аварійні сигнали відображаються на екрані, а котел може бути зображений графічно. Додаток був розроблений відповідно до стандарту візуалізації VYNCKE і включає наступні елементи

- приладова панель з інструментами моніторингу та управління котлом;
- графічне представлення установки з візуалізацією параметрів процесу;
- реєстрація стану системи та даних процесу, включаючи графічне відображення;
- відображення аварійних сигналів і реєстрація всіх аварійних сигналів;
- реалізовано декілька рівнів доступу з паролями;

Візуалізація (рисунки 1.4 і 1.5) доступна тільки для компонентів, що входять в комплект поставки VYNCKE.

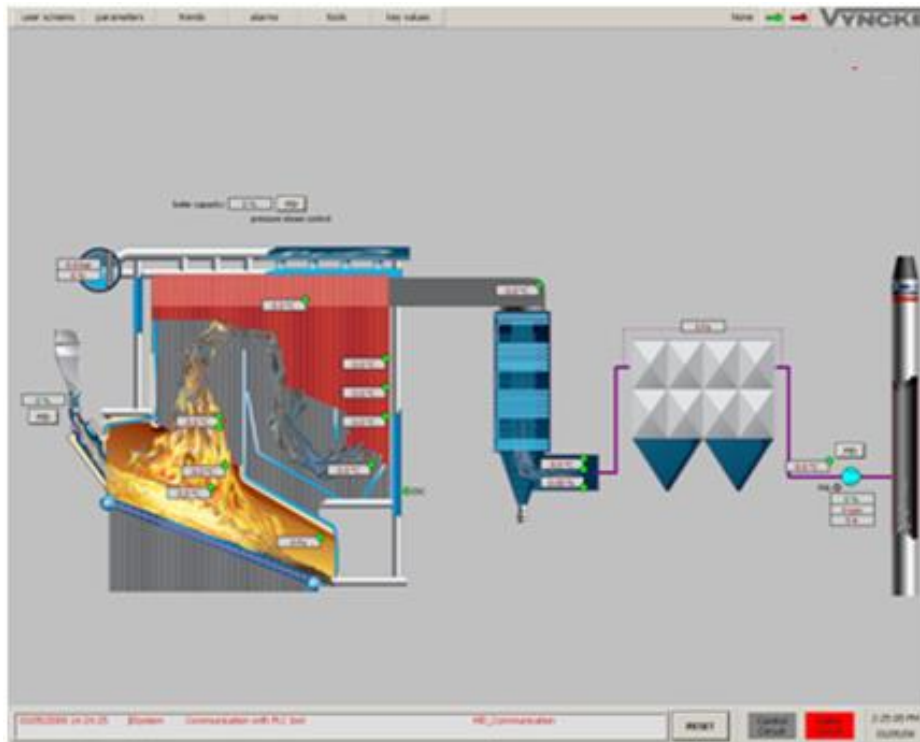


Рисунок 1.4 – Екранна форма контролю технологічних параметрів одного котла

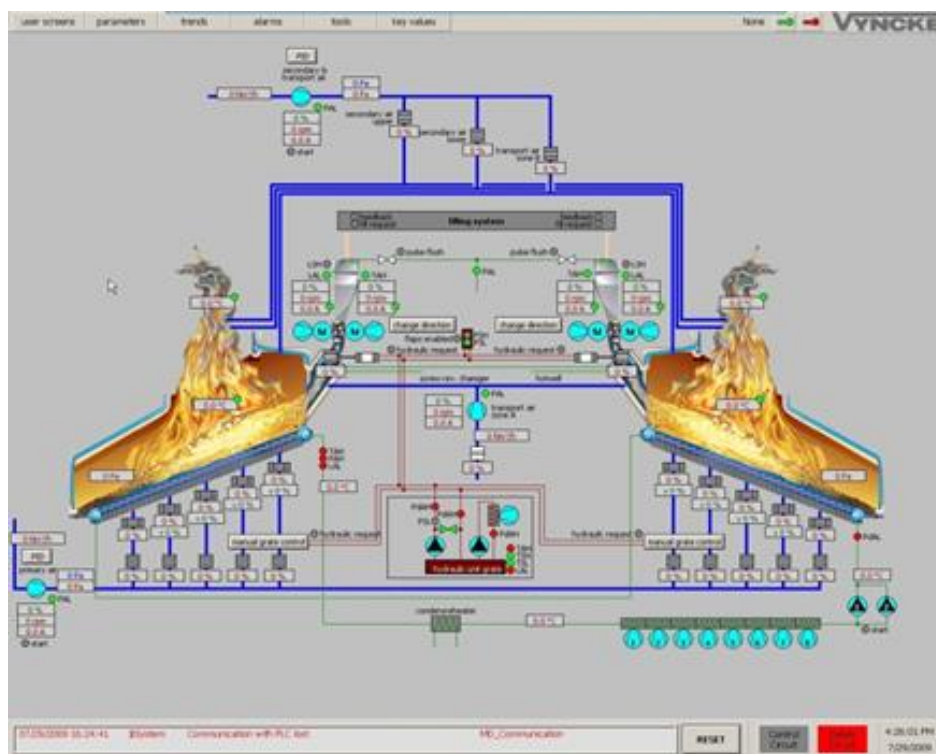


Рисунок 1.5 – Екранна форма контролю параметрів при спільній роботі двох котлів

1.4 Основні вимоги до насосних установок живильної води

Насосні агрегати для парових котлів не тільки підвищують ефективність процесу пароутворення, але й можливість самого процесу.

Це вимагає особливих вимог до насосних агрегатів для парових котлів.

Існують спеціальні вимоги, які визначені Правилами котлонагляду та Правилами безпеки для установок, що працюють під високим тиском.

Конструкція насосного агрегату повинна бути надійною, щоб гарантувати безперервну, постійну і безперебійну подачу необхідної кількості води до котла протягом усього терміну служби.

Надійність подачі води до котла забезпечується відповідними резервними насосами. Насосний агрегат оснащений двома ідентичними насосами.

Це забезпечує 100% резервування основного обладнання станції. Крім того, резерв продуктивності кожного насоса повинен становити не менше 20% від проектних параметрів.

Живильні насоси повинні бути регульованими, щоб забезпечувати необхідні витрати води при змінних параметрах роботи котла таких, як: паропроductивність в межах 40...100 %, тиск та температура пари, постійне та періодичне продування котла від солей, обдування від сажі тощо.

1.5 Розрахунок параметрів і вибір живильних насосів

Основою для проектування і дослідження живильної установки є експлуатаційний розрахунок насосів.

Метою і результатом розрахунку є вибір насоса та визначення його регульовальних параметрів. Вихідними даними для розрахунку та вибору насоса є необхідна номінальна витрата живильної води на котел Q_H і розрахунковий номінальний напір (тиск) насоса H_H . Згідно з завданням на магістерську кваліфікаційну роботу вихідними даними для розрахунку насоса є $Q_H = 44,1$ т/год - необхідна витрата живильної води на котел і необхідний напір (тиск) $H_H = 1006$ м.

Наведені дані практично задовольняються 7-ступінчастим відцентровим насосом НГМ 3/10 з максимальною частотою обертання 2975 об/хв (рисунки 1.6 і 1.7).

Зовнішній вигляд 7-ступінчастого відцентрового насоса НГМ 3/10 показано на рисунку 1.6.

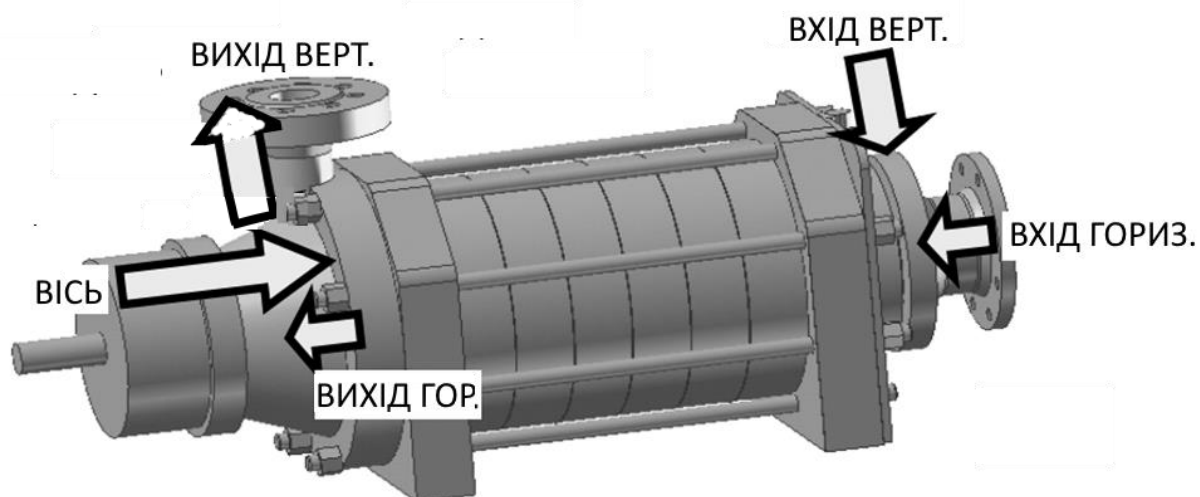


Рисунок 1.6 – Зовнішній вигляд відцентрового насоса типу НГМ 3/10

Насос складається з семи послідовно з'єднаних ступенів. Живильна вода поступає в осьовому напрямку в центр робочого колеса першого ступеня, де відбувається підвищення тиску на 1 МПа, а потім послідовно надходить до інших робочих коліс, встановлених на тому ж валу в тому ж корпусі, які разом підвищують тиск живильної води до 7... 10 МПа.

Зовнішній вигляд насосного агрегату показаний на рисунку 1.7. Основними компонентами насосного агрегату є: 1 – 7-ступінчастий відцентровий насос типу НГМ 3/10, з'єднаний з трифазним асинхронним електродвигуном 3 за допомогою еластичної муфти 2, та опорна рама 4.

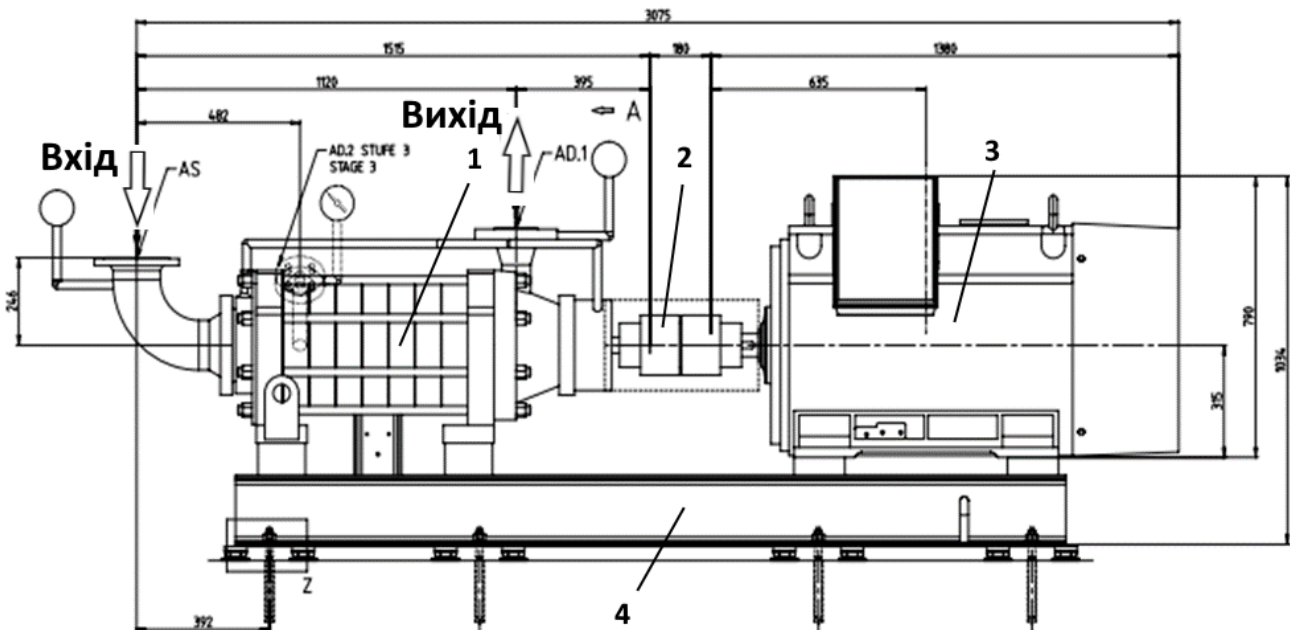


Рисунок 1.7 – Зовнішній вигляд живильної насосної установки

Технічні характеристики насосу типу НГМ 3/10 наведені в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 – Технічні характеристики насосу типу НГМ 3/10

Параметри	Значення
Продуктивність номінальна: т/год	44,1
м ³ /с	0,0123
Продуктивність в межах робочої зони роботи, т/год	22...44,1
м ³ /с	0,00614...0,0123
Статичний напір, м	260...1006
ККД статичний максимальний, не менше	0,63
Потужність електропривода, кВт, не більше	193,3
Частота обертання робочого колеса, об/хв	1500...2933
Кількість робочих коліс	7

Продуктивність, напір і ККД насоса визначаються гідравлічною характеристикою насоса [7] (рисунки 1.8 і 1.9). На графіку гідравлічної характеристики насоса показана робоча точка т.1 і координати робочих параметрів Q_p і N_p (рисунок 1.8).

Type - size	Speed [1/min]	Temperature [C]	Density [kg/m ³]
HGM 3/10	2982	105	954.5

Operating range diagram

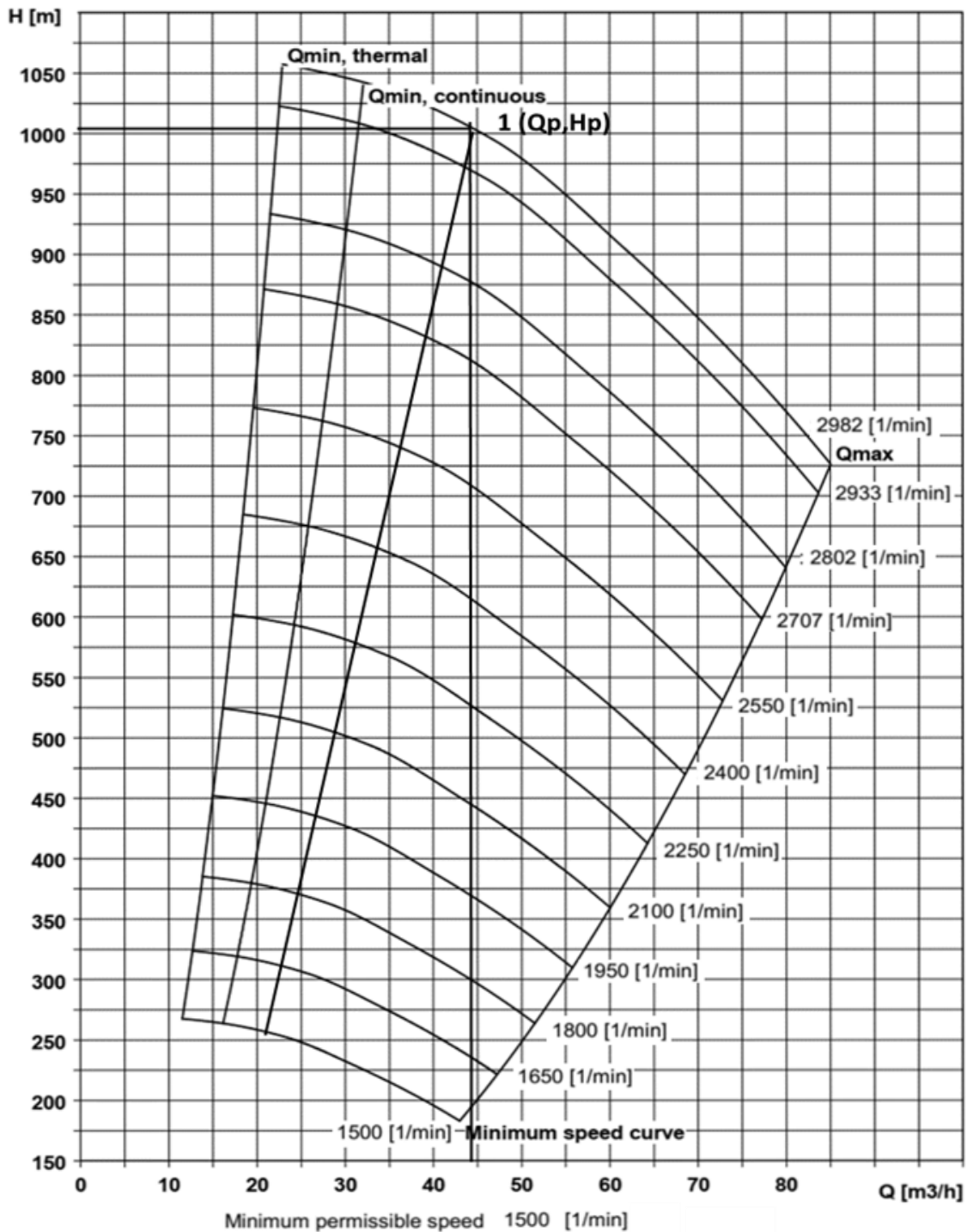


Рисунок 1.8 – Гідравлічні характеристики відцентрового насоса типу HGM 3/10

Type - size	Speed [1/min]	Temperature [C]	Density [kg/m ³]
HGM3/10 5.1 S 4.1 N	2982	105	954.5

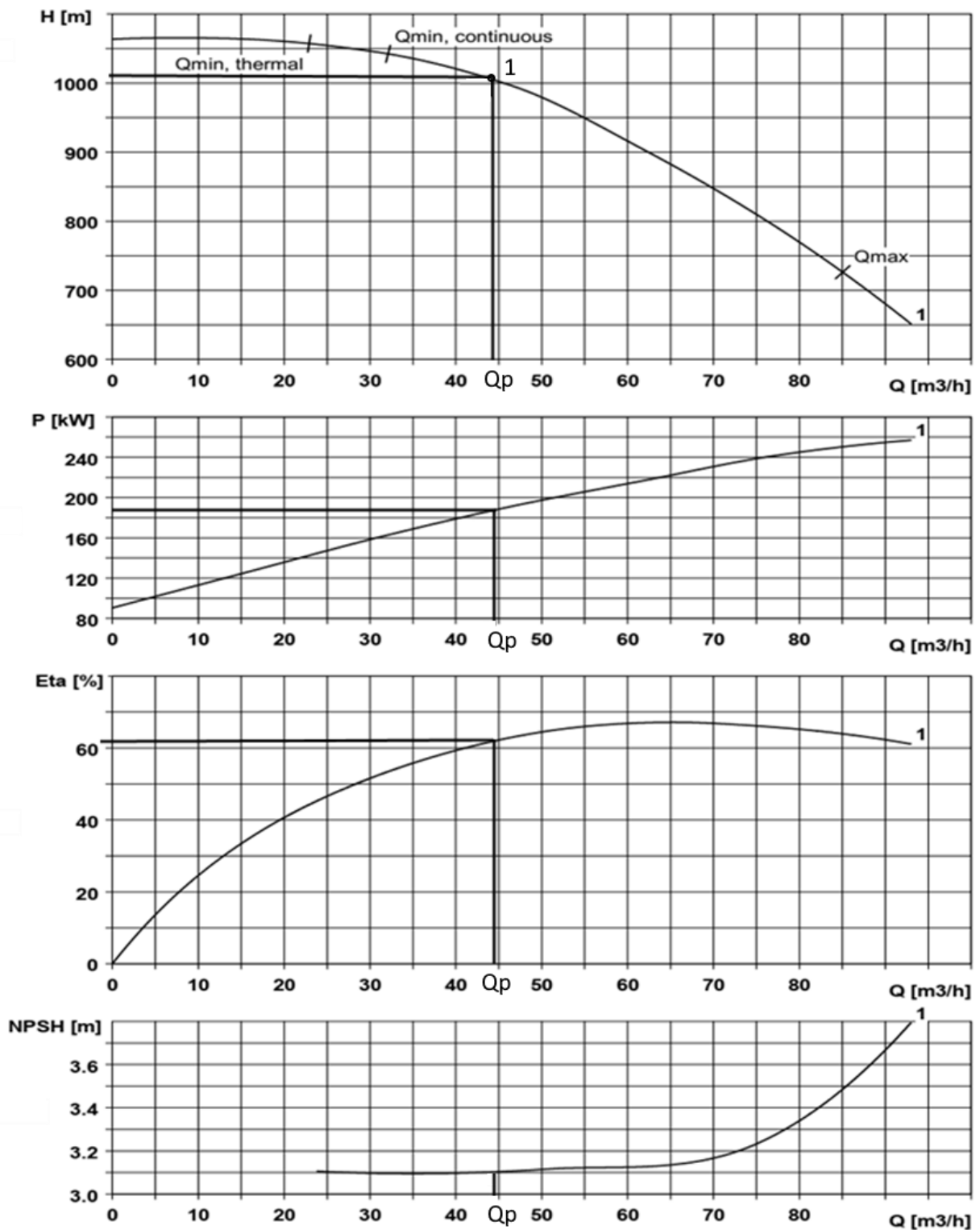


Рисунок 1.9 – Гідравлічні характеристики відцентрового насоса типу HGM 3/10

Повна і корисна потужність, повний і корисний крутний момент і частота обертання приводного двигуна вала насоса визначаються розрахунковим шляхом.

Розрахункові формули виглядають наступним чином [8, 9]

Повна потужність вала живильного насоса, кВт:

$$P = \frac{Q \cdot H \cdot \rho \cdot g}{1000 \cdot \eta \cdot 3600},$$

де Q – номінальна продуктивність насоса, м³/год;

H – номінальний напір насоса, м

ρ – густина води, кг/м³:

g – прискорення вільного падіння, м/с²:

η – номінальний ККД насоса, %.

Ефективна потужність на валу насоса, кВт:

$$N_{\text{кор}} = N_{\text{вал}} \cdot \eta.$$

Швидкість обертання приводного двигуна, рад/с:

$$\omega = \omega_{\text{баз}} \cdot \frac{Q}{Q_{\text{баз}}};$$

Загальний крутний момент навантаження на валу насоса, Н·м:

$$M_{\text{вал}} = \frac{N_{\text{вал}}}{\omega};$$

Корисний момент навантаження на валу насоса, Н·м:

$$M_{\text{кор}} = \frac{N_{\text{кор}}}{\omega}.$$

Точка 1 – це точка розрахункового режиму насоса (рисунок 1.8). Параметри точки 1 згідно з гідравлічною характеристикою насоса наступні:

$$\text{Масова подача } Q_{\text{мас}} = 44100 \frac{\text{кг}}{\text{год}} = 12,25 \frac{\text{кг}}{\text{с}} ;$$

$$\text{Об'ємна подача } Q_{\text{об}} = Q_{\text{мас}} / \rho = 12,25 / 995 = 0,0123 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}.$$

Температура живильної води після економайзера 105 °С; густина 995 кг/м³;
частота обертання насоса $n = 2933$ об/хв або $\omega = 306,98$ рад/с.

Розрахункові параметри в т.1:

$$N_{\text{вал}} = \frac{Q \cdot H \cdot \rho}{1000 \cdot \eta} = \frac{0,0123 \cdot 1006 \cdot 995}{1000 \cdot 0,63} = 191,7 \text{ кВт},$$

$$N_{\text{кор}} = N_{\text{вал}} \cdot \eta = 191,7 \cdot 0,62 = 118,9 \text{ кВт}$$

$$M_{\text{вал}} = \frac{N_{\text{вал}}}{\omega} = \frac{191,7 \cdot 10^3}{306,98} = 624,5 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

$$M_{\text{кор}} = \frac{N_{\text{кор}}}{\omega} = \frac{118900}{306,98} = 387,3 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

2 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ І ХАРАКТЕРИСТИК РЕГУЛЬОВАНОВОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА ЖИВИЛЬНОГО НАСОСУ

2.1 Вибір потужності електродвигуна

Номінальна потужність приводного електродвигуна повинна дорівнювати або перевищувати потужність на валу насоса у всіх можливих технічних режимах роботи. У режимі регулювання продуктивності насос споживає номінальну потужність на валу при роботі в точці т.1, де $N_{\text{вал}} = 191,7$ кВт.

В якості приводного двигуна обираємо найближчий більший за потужністю асинхронний двигун (АД) з короткозамкненим ротором SIEMENS 1LE15033AA034AB4-Z потужністю 250 кВт. Цей двигун задовольняє роботу насоса у всьому діапазоні гідравлічних характеристик при нормальних умовах. Технічні характеристики електродвигуна наведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Технічні дані електродвигуна SIEMENS 1LE55033AA034AB4-Z

n_0 , об/хв	U_{1H} , В	$P_{\text{дв.н.}}$ кВт	При номінальному навантаженні			$J_{\text{дв.н.}}$, кг·м ²
			S_H , %	$\cos\varphi_H$	η_H , %	
2986	380	250	2,3	0,87	95,8	2,7

Продовження таблиці 2.1

$m_n = \frac{M_{\text{пуск}}}{M_H}$	$m_k = \frac{M_{\text{макс}}}{M_H}$	$m_m = \frac{M_{\text{мін}}}{M_H}$	$k_{i.об} = \frac{I_{\text{пуск}}}{I_H}$	Ступінь захисту
3,0	4,0	1,0	9,1	IP 55

2.2 Визначення параметрів схеми заміщення АД

Математичне моделювання асинхронних двигунів вимагає визначення параметрів їхніх схем заміщення. Разом з різними експериментальними методами параметри кола опору можуть бути розраховані опосередковано на основі

довідкових даних. Однофазна Т-подібна схема заміщення асинхронного двигуна показана на рисунку 2.1.

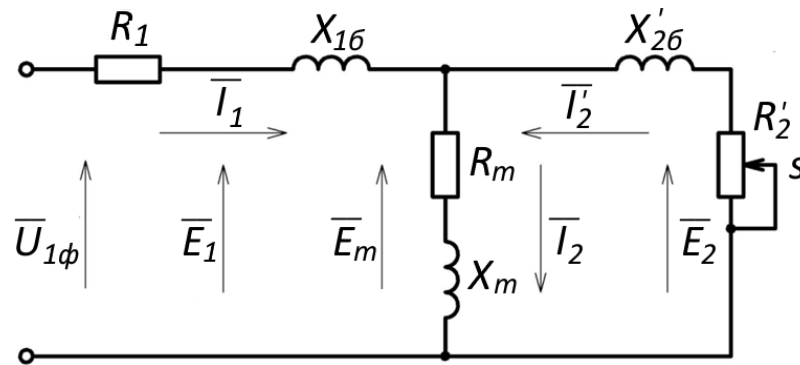


Рисунок 2.1 – Однофазна схема заміщення асинхронного двигуна

Основні рівняння асинхронного двигуна, що відповідають прийнятій схемі заміщення:

$$\overline{U}_{1\phi} - \overline{E}_m - j \cdot X_1 \cdot \overline{I}_1 + R_1 \cdot \overline{I}_1 = 0,$$

$$\overline{E}_m + j \cdot X_2' \cdot \overline{I}_2' + R_2' \cdot \frac{\overline{I}_2'}{s} = 0,$$

$$\overline{I}_1 + \overline{I}_2' - \overline{I}_2 = 0.$$

Векторні діаграми для струму, ЕРС і напруги, що відповідають наведеним вище рівнянням, показані на рисунку 2.2.

Параметри Т-подібної схеми заміщення асинхронного двигуна визначаємо за каталожними даними двигуна.

Синхронна кутова частота обертання поля статора двигуна:

$$\omega_0 = \frac{\pi \cdot n_0}{30} = \frac{3,14 \cdot 3000}{30} = 314,159 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

$$I_{1\phi H} = I_{1\phi H} = \frac{P_{\text{дв.н}}}{3 \cdot U_{1\phi H} \cdot \cos\varphi \cdot \eta} = \frac{250000}{3 \cdot 219,39 \cdot 0,87 \cdot 0,958} = 455,73 \text{ А.}$$

Струм фази статора при частковому завантаженні

$$I_{1p'} = \frac{p' \cdot P_{\text{дв.н}}}{3 \cdot U_{1\phi H} \cdot \cos\varphi_{p'} \cdot \eta_{p'}} = \frac{0,75 \cdot 250000}{3 \cdot 219,39 \cdot 0,86 \cdot 0,959} = 345,41 \text{ А}$$

де $\eta_{p'} = 0,86$ – ККД при частковому навантаженні;

$\cos\varphi_{p'} = 0,90$ – коефіцієнт потужності при частковому навантаженні;

$p' = P/P_H = 0,75$ – коефіцієнт завантаження двигуна;

Коефіцієнт потужності $p' = 0,75$ при частковому навантаженні значно відрізняється від коефіцієнта потужності при номінальному навантаженні, і ця різниця сильно залежить від потужності двигуна і відповідає залежностям, показаним на рисунку 2.3 для відомих серій асинхронних двигунів з достатньою точністю на практиці.

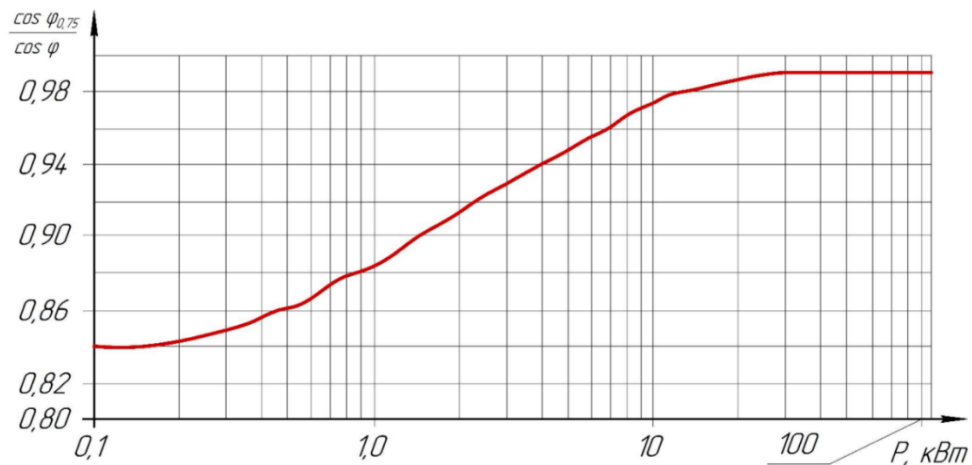


Рисунок 2.3 –Залежність $\cos\varphi_{0,75}/\cos\varphi_n$ від потужності асинхронного двигуна

Критичне ковзання

$$s_k = s_H \cdot \frac{m_k + \sqrt{m_k^2 - (1 - 2 \cdot s_H \cdot \beta \cdot (m_k - 1))}}{1 - 2 \cdot s_H \cdot \beta \cdot (m_k - 1)} =$$

$$= 0,0047 \cdot \frac{4,0 + \sqrt{4,0^2 - (1 - 2 \cdot 0,0047 \cdot 1,5 \cdot (4,0 - 1))}}{1 - 2 \cdot 0,0047 \cdot 1,5 \cdot (4,0 - 1)} = 0,0384$$

Струм холостого ходу асинхронного двигуна

$$I_0 = \sqrt{\frac{I_{1p'}^2 - (I_{1\phi H} \cdot p_* \cdot (1 - s_H) / (1 - p_* \cdot s_H))^2}{1 - (p_* \cdot (1 - s_H) / (1 - p_* \cdot s_H))^2}} =$$

$$= \sqrt{\frac{345,41^2 - (430,83 \cdot 0,75 \cdot (1 - 0,0047) / (1 - 0,75 \cdot 0,0047))^2}{1 - (0,75 \cdot (1 - 0,0047) / (1 - 0,75 \cdot 0,0047))^2}} = 79,26 \text{ A.}$$

Активний опір обмотки ротора R'_2 , наведений до обмотки статора.

Значення ряду проміжних коефіцієнтів:

$$C_1 = 1 + \frac{I_0}{2 \cdot k_i \cdot I_{1\phi H}} = 1 + \frac{79,26}{2 \cdot 9,1 \cdot 455,73} = 1,0096,$$

$$R'_2 = \frac{3 \cdot U_{1\phi H}^2 \cdot (1 - s_H)}{2 \cdot k_{\max} \cdot P_H \cdot C_1^2 \cdot \left(\beta + \frac{1}{s_K}\right)} =$$

$$= \frac{3 \cdot 219,39 \cdot (1 - 0,0047)}{2 \cdot 4 \cdot 250000 \cdot 1,0096^2 \cdot (1,5 + 1/0,0384)} = 0,002559 \text{ Ом}$$

Активний опір статора в номінальному режимі

$$R_1 = R'_2 \cdot \beta \cdot C_1 = 0,002559 \cdot 1,5 \cdot 1,0096 = 0,003875 \text{ Ом}$$

Параметр γ для визначення індуктивного опору короткого замикання в номінальному режимі:

$$\gamma = \sqrt{\frac{1}{S_K^2} - \beta^2} = \sqrt{1/0,03837^2 - 1,5^2} = 26,014$$

Опір короткого замикання:

$$X_{KH} = R'_2 \cdot \gamma \cdot C_1 = 0,002558 \cdot 26,014 \cdot 1,0096 = 0,06719 \text{ Ом}$$

Індуктивний опір розсіювання роторної обмотки, наведений до статорної:

$$X'_{2\sigma} = \frac{0,58 \cdot X_{KH}}{C_1} = \frac{0,58 \cdot 0,06719}{1,0096} = 0,02822 \text{ Ом}$$

Індуктивний опір розсіювання статорної обмотки:

$$X_{1\sigma} = 0,42 \cdot X_{KH} = 0,42 \cdot 0,06719 = 0,02822 \text{ Ом}$$

Індуктивність розсіювання обмотки статора:

$$L_{1\sigma} = \frac{X_{1\sigma}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1H}} = \frac{0,02822}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,00009 \text{ Гн}$$

Індуктивний опір розсіювання обмотки ротора, наведений до обмотки статора, в номінальному режимі

$$X'_{2\sigma} = 0,58 \cdot \frac{X_{KH}}{C_1} = 0,58 \cdot \frac{0,06719}{1,0096} = 0,03860 \text{ м}$$

Індуктивність розсіювання роторної обмотки, наведена до статорної:

$$L'_{2\sigma} = \frac{X'_{2\sigma}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1H}} = \frac{0,03860}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,00012 \text{ Гн}$$

Електрорушійна сила гілки намагнічування, індукована потоком повітряного зазору в обмотках статора під час номінальної роботи:

$$E_1 = \sqrt{(U_{1\phi H} \cdot \cos\varphi - R_1 \cdot I_{1\phi H})^2 + (U_{1\phi H} \cdot \sin\varphi - X_{1\sigma} \cdot I_{1\phi H})^2} =$$

$$= \sqrt{(219,39 \cdot 0,87 - 455,73 \cdot 0,003875)^2 + (219,39 \cdot 0,4930 - 455,73 \cdot 0,02822)^2} =$$

$$= 211,77 \text{ В}$$

Індуктивний опір намагнічування

$$X_\mu = \frac{E_1}{I_0} = \frac{211,77}{79,26} = 2,6717 \text{ Ом}$$

Результуюча індуктивність гілки намагнічування

$$L_\mu = \frac{X_\mu}{2 \cdot \pi \cdot f_{1H}} = \frac{2,6717}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,008504 \text{ Гн}$$

Значення номінального потокозчеплення

$$\Psi_{2H} = \sqrt{2} \cdot I_0 \cdot I_M = \sqrt{2} \cdot 79,2626 \cdot 0,008504 = 0,9532$$

Еквівалентна індуктивність обмотки статора

$$L_1 = L_{\sigma 1} + L_\mu = 0,00012 + 0,00850 = 0,00859 \text{ Гн}$$

Еквівалентна індуктивність обмотки ротора

$$L'_2 = L'_{\sigma 2} + L_{\mu} = 0,00012 + 0,00850 = 0,00863 \text{ Гн}$$

Коефіцієнт розсіювання

$$\sigma = 1 - \frac{L_{\mu}^2}{L_1 + L'_2} = 1 - \frac{0,008504^2}{0,00859 + 0,00863} = 0,9958 .$$

Розрахункові параметри схеми заміщення наведені в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Параметри схеми заміщення електродвигуна

R_l , Ом	$X_{1\sigma}$, Ом	$L_{1\sigma}$, Гн	X_{μ} , Ом	L_{μ} , Гн
0,003875	0,028223	0,00009	2,671705	0,008504
$R'_{2'}$, Ом	$X'_{2\sigma}$, Ом	$L'_{2\sigma}$, Гн	$X_{кн}$, Ом	η
0,002559	0,038605	0,000123	0,067197	0,958

2.3 Simulink-програма для розрахунку параметрів асинхронного двигуна

Порівняємо результати попередніх розрахунків у п.2.2 з результатами розрахунків параметрів асинхронного двигуна в модельній програмі Simulink, розробленій у [9] (рисунок 2.4).

Параметри двигуна, зазначені в каталозі, записуються в блок констант підсистеми параметрів Akz. Двічі клацніть зображення підсистеми, щоб відкрити схему підсистеми параметрів *AKZ Parameters*. Схема підсистеми параметрів *AKZ Parameters* показана на рисунку 2.5.

Параметри асинхронного двигуна SIEMENS 1LE55033AA034AB4-Z були введені в підсистему параметрів *AKZ Parameters* відповідно до таблиці 2.1. Враховуючи інерцію ротора насоса, з'єданого з валом двигуна, динамічний момент інерції був збільшений до $4,8 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$. На рисунку 1.51 показано результати розрахунку параметрів асинхронного двигуна, наведених у математичному описі асинхронного двигуна.

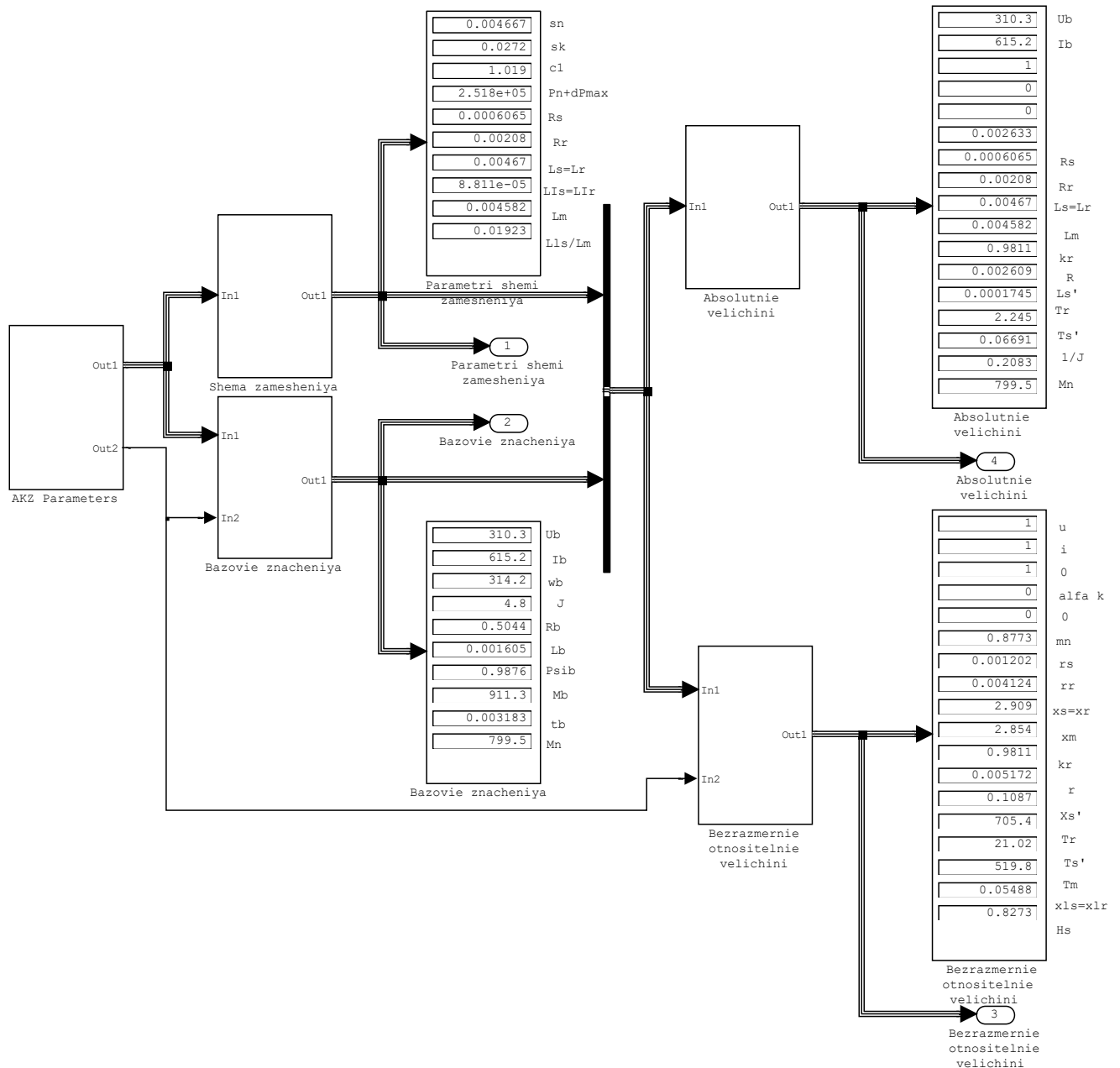


Рисунок 2.4 – Модель для розрахунку параметрів асинхронного двигуна у *Simulink*

2.4 Вибір перетворювача частоти

Перетворювачі частоти для асинхронних приводів перетворюють змінну напругу електромережі в трифазну змінну напругу з визначеною частотою. У більшості випадків перетворювачі частоти в даний час базуються на повністю керованих силових напівпровідникових перемикачах, таких, як силові транзистори або тиристри з затвором.

Типова функціональна схема сучасного електроприводу змінного струму на основі перетворювача частоти з ланкою постійного струму показана на рисунку

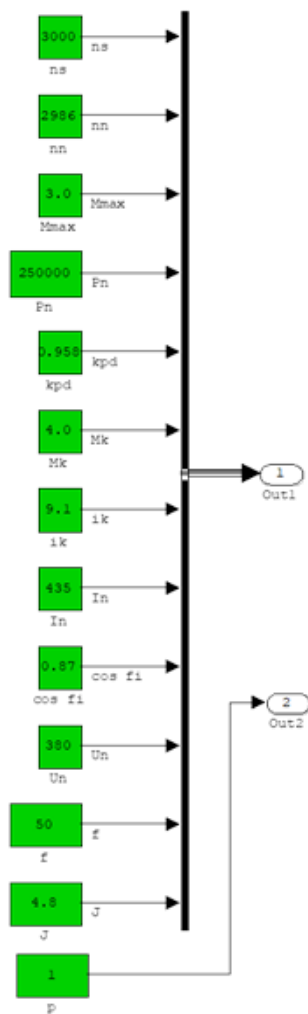


Рисунок 2.5 – Схема підсистеми AKZ
Parameters

2.6. Як видно з цієї схеми, основою асинхронного електроприводу є перетворювач частоти, який поєднує в собі перетворювач і контролер відповідно до класичного визначення електроприводу. З цієї причини часто перетворювачі частоти називають електроприводами, але це, як правило, невірно [16].

Стандартний перетворювач частоти складається з двох основних компонентів:

- блок живлення, що включає вхідний фільтр, некерований випрямляч, ланцюг зарядки, ємність фільтра випрямляча, клампер, датчик напруги ланки постійного струму, інвертор, датчик вихідного струму, схему драйвера, гальванічну розв'язку інвертора і сигналів керування клампером, а також блок живлення;
- контролер управління. Звичайно включає корпус цифрового контролера, який базується на цифровому сигнальному процесорі, і схему узгодження сигналів.

Призначення основних модулів та елементів показано на рисунку 2.6:

Фільтр – звичайно містить два основних компоненти. Варистор для запобігання перенапруг постійного струму через стрибки напруги в лінії електроживлення та фільтр радіоперешкод для запобігання поширенню високочастотних перешкод, спричинених перемиканнями інвертора, в лінію електроживлення.

Зарядний ланцюг (резистор R_z і реле $K1$) плавно заряджає ємність фільтра випрямляча C при подачі живлення на перетворювач. Після завершення зарядки контакти реле $K1.1$ замикаються.

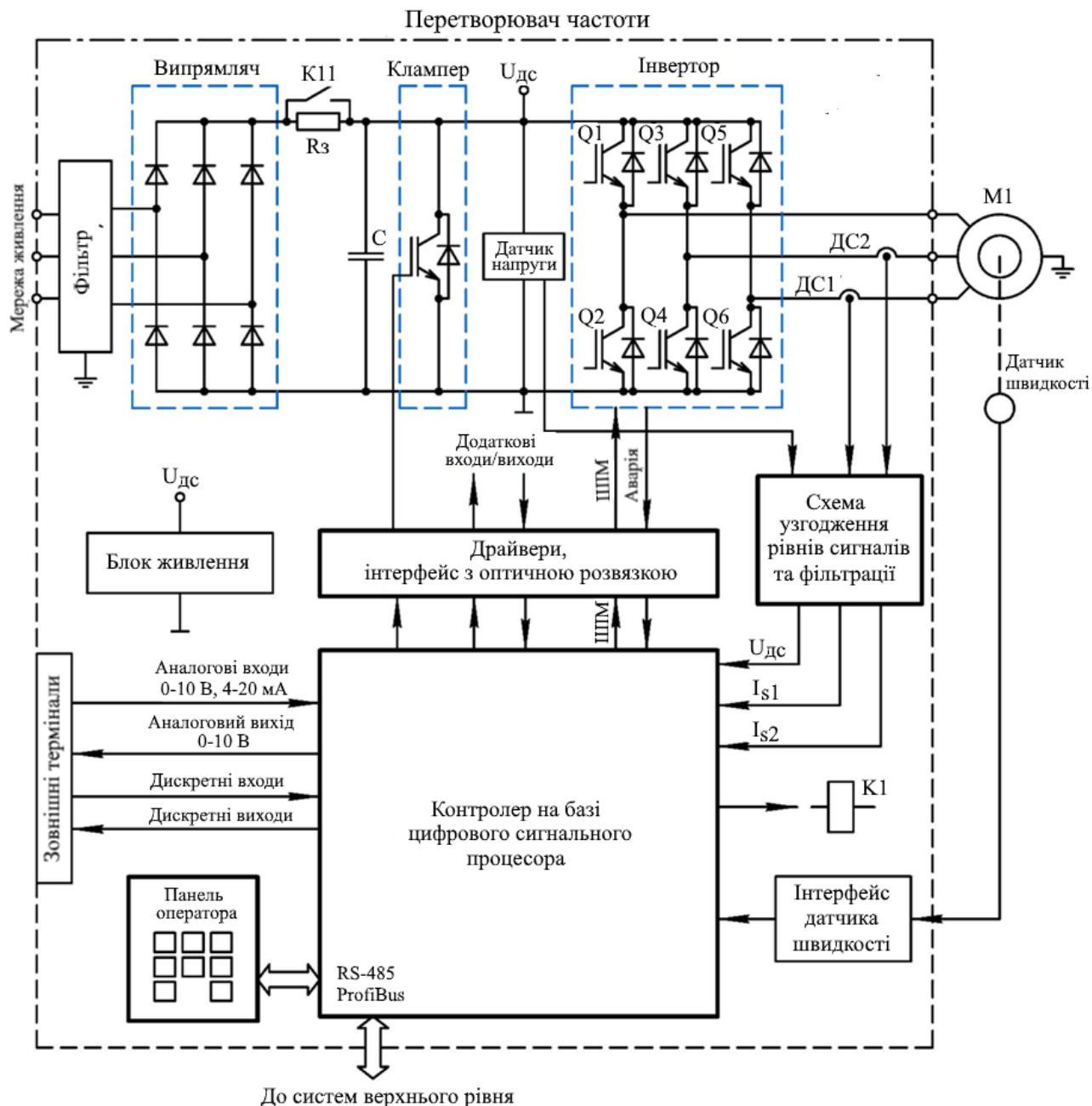


Рисунок 2.6 – Функціональна схема перетворювача частоти асинхронного електропривода

Клампер – пристрій, призначений для стабілізації напруги ланки постійного струму при генераторному режимі роботи двигуна з рекуперацією енергії ланки постійного струму.

Датчик напруги – призначений для передачі інформації про напругу ланки постійного струму U_{dc} на керуючий контролер, який використовується для забезпечення захисту, контролю заряду ємності фільтра випрямляча і формування

імпульсів для управління ключем інвертора за законом широтно-імпульсної модуляції (ШІМ).

Інвертор перетворює напругу ланки постійного струму в трифазну напругу, задану на виході перетворювача, і результуючий вектор (усереднений за період ШІМ) має заданий модуль, частоту і кутове положення.

Датчики струму DC1 і DC2 призначені для передачі інформації про фазні струми двигуна в керуючий контролер, який використовується для організації функцій захисту інвертора і двигуна, а також для організації зворотного зв'язку для системи векторного керування.

Датчики швидкості призначені для вимірювання кутової швидкості (положення) контролера з метою організації функцій зворотного зв'язку та захисту.

Драйвер перетворює параметри керуючих імпульсів силових ключів, що надходять від контролера, і забезпечує надійне відкривання та закривання IGBT-ключів. На практиці драйвер можна розглядати як підсилювач сигналу. У багатьох випадках драйвер також забезпечує захист від струмів короткого замикання в інверторі.

Оптична розв'язка – гальванічна ізоляція окремих сигналів керування для підвищення захисту контролера керування від перешкод і запобігання виходу з ладу в разі аварійної ситуації в силовій частині. У потужних перетворювачах це здійснюється за допомогою оптичних пар або волоконно-оптичних ліній зв'язку.

Контролер керування виконує всі функції автоматизації перетворювача, отримує завдання координат керування, розраховує алгоритми керування двигунами, формує ключові імпульси керування, реалізує функції захисту та здійснює зв'язок з системами верхнього рівня.

Схеми узгодження і фільтрації сигналів необхідні для узгодження рівнів сигналів, отриманих від датчиків струму і напруги, з допустимими рівнями вхідної напруги аналого-цифрового перетворювача контролера управління. За допомогою фільтрації можна підвищити завадостійкість системи керування.

Інтерфейс датчика швидкості – до контролера можна підключати датчики світлових імпульсів з різними типами апаратних інтерфейсів. Як правило, вони мають гальванічну розв'язку.

Блок живлення – це пристрій, який забезпечує власні потреби інвертора в енергії (наприклад, живлення контролера, драйвера, зовнішні +10 В і +24 В, живлення датчиків). У сучасних інверторах вхідна напруга блоку живлення береться з ланки постійного струму, що забезпечує безпечне вимкнення системи в разі збою живлення.

Зовнішні клеми використовуються для підключення до перетворювача дискретних входів/виходів (наприклад, сигналів керування перетворювачем «пуск», «стоп», «реверс») і аналогових входів/виходів (наприклад, уставки швидкості, зворотного зв'язку з параметрами процесу).



Рисунок 2.7 –
Зовнішній вигляд
перетворювача
частоти VACON
0100-3L-0590-5-
FLOW шафового
виконання MR10
(500×980×525 мм)

Панель оператора призначена для завдання параметрів системи, подачі команд на перетворювач, завдання керуючих величин в ручному режимі, моніторингу керуючих величин і діагностики.

Додаткові входи і виходи використовуються для управління додатковими системами, наприклад, для включення насосів системи охолодження і для управління роботою реле зарядки [16].

Перетворювачі частоти обираються відповідно до наступних рекомендацій

1. Параметри мережі електроживлення: 3-фазна 380 В, 50 Гц.
2. Вихідні параметри перетворювача частоти.
 - 3-фазний;
 - найбільша вихідна (мережева) напруга 380 В;
3. Частотний перетворювач вибирається за номінальним (довготривало допустимим) струмом $I_{1н}$ при дотриманні наступних умов:

$$I_{iH} \geq I_{1дн} \cdot 1,2 = 444,6 \cdot 1,2 = 533,3 \text{ A}$$

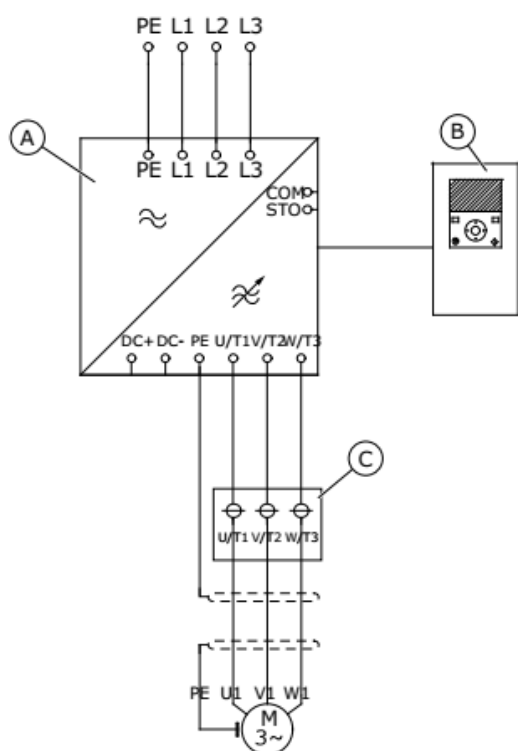


Рисунок 2.8 – Схема міжкомпонентних з'єднань перетворювача частоти VACON 0100-3L-0590-5-FLOW+IP00, MR10 з додатковим модулем і додатковими функціями А – блок живлення; В – блок управління; С – додатковий фільтр перешкод загального виду

Обираю перетворювач частоти Danfoss серії VACON-100-FLOW типу VACON0100-3L-0590-5-FLOW, основні параметри якого наведені в таблиці 2.3. Зовнішній вигляд перетворювача показаний на рисунку 2.7, а схема з'єднання перетворювача показана на рисунку 2.8.

Основні характеристики перетворювача:

- незалежні канали повітряного охолодження
- загальномодовий фільтр і фільтр dU/dt інтегровані в канал повітряного охолодження;
- задні канали охолодження доступні за запитом;
- швидкодіючий вхідний запобіжник aR в стандартній комплектації;
- інтегрований вихідний фільтр і плавкий вимикач за запитом.

Переваги даного перетворювача частоти:

- IP54/UL без зниження номінальної продуктивності;
- зменшення монтажного простору та витрат;
- підвищена надійність у важких умовах експлуатації;
- безпечне та комплексне інтегроване рішення.

В якості базової частоти ШІМ передбачається робота інвертора на частоті $f_{шім} = 2500$ Гц, що є оптимальним співвідношенням між величиною втрат на

комутацію і точністю відтворення заданої форми напруги на виході. Розрахункові параметри інвертора:

Таблиця 2.3 – Номінальні параметри перетворювача частоти VACON 0100-3L-0590-5-FLOW

Параметри мережі живлення	Допустиме навантаження	Потужність на валу двигуна		Макс. струм I_s (2 с), А	Типо-розмір корпусу
	Безперервний струм I_{Lout} у 40°C, А	Потужність живлення 400 В при 40 °С (низьке навантаження), кВт	Живлення 480 В NEMA/NEC при 40 °С (низьке навантаження), л. с.		
3×380 В, 50 Гц	590	315	500	1040	MR10

Таблиця 2.4 – Технічні характеристики VACON® 100 INDUSTRIAL, VACON® 100 FLOW

Підключення до мережі	Вхідна напруга	208–240 В; 380–500 В; 525–690 В; 3 фази
	Вхідна частота	50–60 Гц
Підключення двигуна	Вихідна напруга	0 – вхідна напруга
	Вихідна частота	0–320 Гц
Ланцюги управління	Входи та виходи	2 аналог. входи, 6 цифр. входів, 1 аналог. вихід, 10 В опорн., 24 В вх., 2×24 В вих., 3 рел. виходу або 2 рел. виходи + вхід термістора
	Ethernet	Modbus TCP/IP, ВАСnet IP, PROFINET, EtherNet/IP
	RS485	Modbus RTU, Metasys N2, ВАСnet MSTP
Умови навколишнього середовища	Робоча температура навколишнього повітря	-10...+50 °С, зниження номінальних характеристик 1,5 %/1 °С за температури вище 40 °С
	Ступінь захисту корпусу	IP21/UL Type 1 у стандартній версії IP54/UL Type 12 за замовленням IP00 для типорозмірів MR8–MR12
EMC	Завододостійкість	IEC 61800-3, перші та другі умови експлуатації
	Випромінювання перешкод	IEC 61800-3, категорія С2 IEC 61800-3, категорія С3 для модулів IP00 та корпусних перетворювачів частоти
Функціональна	Safe Torque Off	Додаткова плата OPT-VJ

Максимальне значення коефіцієнта підсилення інвертора:

$$k_{\text{інв}} = \frac{\sqrt{2} \cdot U_{1\text{фн}}}{U_{\text{кер.макс}}} = \frac{\sqrt{2} \cdot 220}{10} = 31,11 \frac{\text{В}}{\text{В}}$$

де $U_{\text{кер.макс}} = 10 \text{ В}$ – максимально допустиме значення напруги керування на вході перетворювача.

Еквівалентна стала часу інвертора:

$$T_{\text{інв}} = \frac{0,5}{f_{\text{ШІМ}}} = \frac{0,5}{2500} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ с.}$$

Особливості приводів змінного струму VACON 100 FLOW:

– майстер налаштування для спрощення введення в експлуатацію з широким спектром опцій, включаючи запуск, стандартні плати вводу/виводу, HVAC, PID-регулювання, багатонасосні системи (з одним або декількома приводами) та протипожежний захист;

– кнопка FUNCT для легкого перемикання між локальним (клавіатура) і дистанційним керуванням. Джерело дистанційного керування визначається параметрами (сигнали вводу/виводу або польова шина);

– 8 попередньо встановлених частот;

– функція потенціометра двигуна;

– функція промивання;

– два програмованих значення часу зміни лінійної швидкості, два параметри керування, три заборонених діапазони частот;

– швидка зупинка;

– відображення даних польової шини;

– автоматичне скидання;

– різні режими попереднього нагрівання для запобігання конденсації;

- максимальна вихідна частота 320 Гц ;
- функції годинника і таймера в реальному часі (потрібна додаткова батарея). Три часові канали можуть бути запрограмовані для отримання різних функцій приводу (наприклад, пуск/зупинка або попереднє налаштування частоти);
- зовнішній ПІД-регулятор, наприклад, для керування клапанами за допомогою карт вводу/виводу приводу постійного струму;
- сплячий режим для енергозбереження.
- автоматичне ввімкнення/вимкнення приводу з заданою користувачем швидкістю;
- двозонний ПІД-регулятор (два різних сигнали зворотного зв'язку, мінімальне та максимальне регулювання);
- два джерела уставки для PID-регулятора. Вибір через цифровий вхід;
- функція підвищення уставки ПІД-регулятора;
- функція прямого зворотного зв'язку (контроль збурень);
- контроль параметрів процесу;
- керування декількома насосами в одному або декількох приводах;
- кілька режимів ведучого і веденого насоса в системах з декількома приводами;
- годинник реального часу, синхронізований зі зміною насосів;
- лічильники технічного обслуговування;
- функції керування насосами: автоматичне перемикання; керування заливним насосом; керування підкачувальним насосом; автоматичне очищення робочого колеса насоса; антиблокування; контроль тиску на вході насоса; захист від замерзання.

Схема керування перетворювачем частоти показана на рисунку 2.9.

2.5 Вибір типу системи керування електроприводом на основі ПЧ

Системи керування електроприводом на основі ПЧ можуть бути налаштовані на скалярний і векторний закони керування.

2.4.1 Принцип роботи скалярних систем керування електроприводом. Скалярне керування (U/f керування асинхронними двигунами) – це зміна швидкості обертання електродвигуна шляхом впливу на частоту напруги статора при одночасній зміні коефіцієнта цієї напруги.

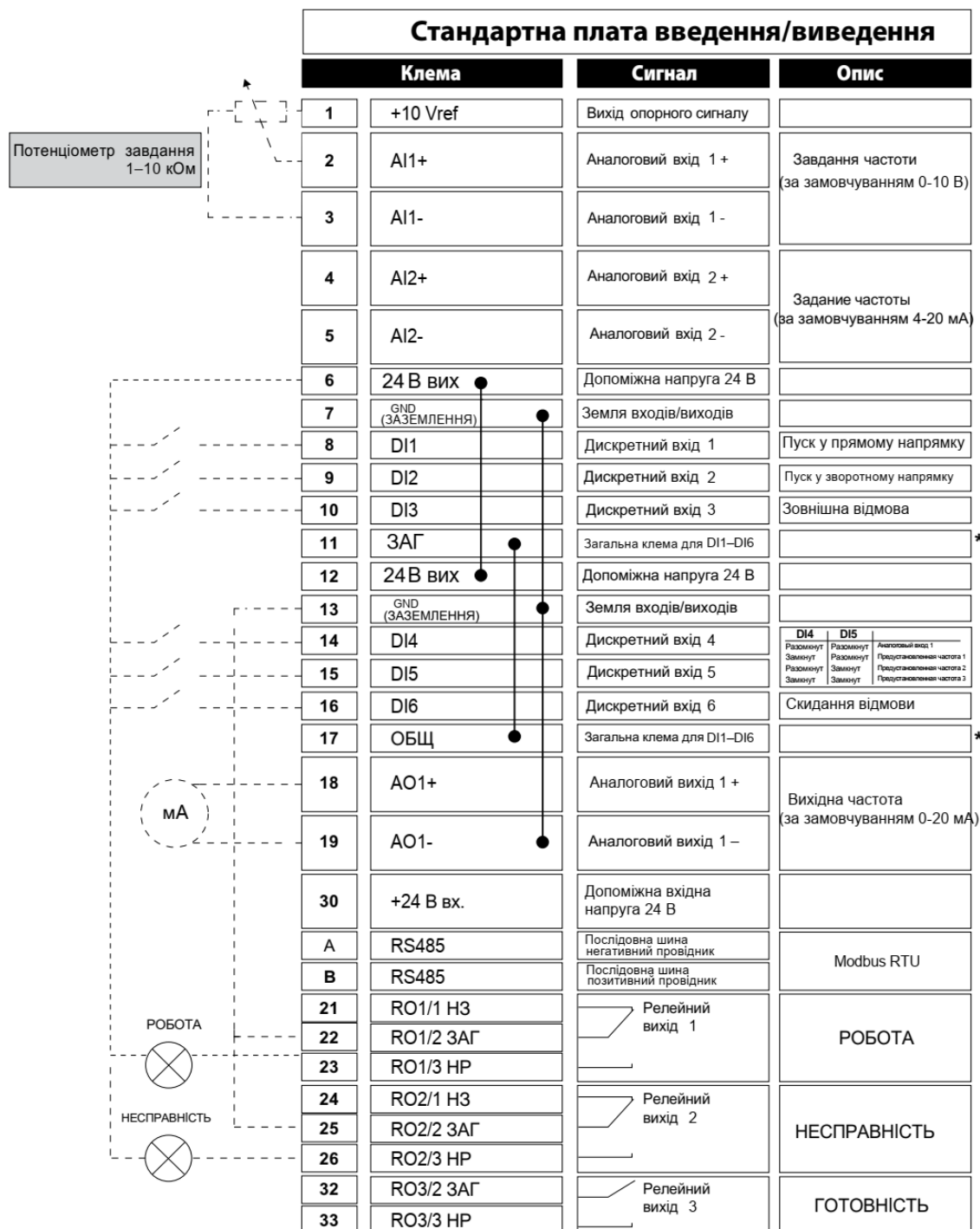


Рисунок 2.9 – Ланцюги керування, що використовуються за замовчуванням у стандартній програмі керування та програмі керування опаленням, вентиляції та кондиціонування повітря

При U/f керуванні частота і напруга є двома керуючими впливами, які звичайно контролюються разом, діють як два керуючих впливи, які звичайно регулюються разом. У цьому випадку частота розглядається як незалежний вплив, а значення напруги на заданій частоті визначається на основі того, як повинні змінюватися механічні властивості приводу з частотою, тобто як повинен змінюватися граничний момент двигуна з частотою.

Для досягнення такого закону керування необхідно забезпечити співвідношення $U/f = \text{const}$ (U – напруга статора, f – частота напруги статора). Якщо перевантажувальна здатність постійна, то номінальна потужність і коефіцієнт корисної дії двигуна залишаються практично незмінними у всьому діапазоні регулювання швидкості.

Деякі закони регулювання U/f пов'язують величину напруги живлення двигуна з частотою (наприклад, $U/f = \text{const}$, $U/f^2 = \text{const}$ та інші).

Перевага полягає в тому, що можна керувати кількома двигунами одночасно. Скалярне керування використовується для більшості практичних застосувань частотних приводів з діапазонами регулювання швидкості двигуна до 1:40 без використання датчиків зворотного зв'язку.

Скалярні алгоритми керування не дозволяють керувати моментом і позиціонуванням двигунів. Найбільш ефективним застосуванням цього методу керування є вентилятори, насоси та конвеєри.

2.4.2 Принцип роботи систем керування двигунами з векторним керуванням. Векторне керування – це метод керування асинхронними двигунами, який не тільки генерує гармонійні струми і фазні напруги (скалярне керування), а й керує магнітним потоком двигуна. Векторне керування базується на концепції напруги, струму та магнітного потоку як просторових векторів.

На відміну від скалярного керування, векторне керування в асинхронних електроприводах дозволяє підтримувати потік ротора постійним під час перехідних процесів. При скалярному керуванні зміни струмів статора і ротора під час перехідних процесів призводять до зміни потокозчеплення ротора і

зниження швидкості зміни електромагнітного моменту. У приводах з векторним керуванням, де потік ротора можна підтримувати постійним, електромагнітний момент змінюється з тією ж швидкістю, з якою змінюється складова струму статора (подібно до зміни моменту при зміні струму якоря в машинах постійного струму).

Векторне керування означає, що в ланці керування є узгоджена математична модель електроприводу.

Режими векторного керування можна класифікувати наступним чином:

1. За точністю математичної моделі електроприводу, що використовується в ланці керування:

– використання математичної моделі без додаткових уточнюючих вимірювань контролером параметрів двигуна (використовуються тільки типові дані двигуна, введені користувачем)

– використання математичної моделі з додатковими уточнюючими вимірюваннями контролером параметрів двигуна (наприклад, активний і реактивний опір статора і ротора, напруга і струм двигуна).

2. В залежності від наявності або відсутності зворотного зв'язку по швидкості (датчика швидкості), векторне керування можна розділити на

– керування двигуном без зворотного зв'язку за швидкістю - в цьому випадку контролер використовує дані математичної моделі двигуна і значення, отримані шляхом вимірювання струмів статора і/або ротора.

– керування двигуном зі зворотним зв'язком за швидкістю - в цьому випадку контролер використовує значення, отримані шляхом вимірювання струмів статора і/або ротора двигуна (як і в попередньому випадку), а також дані про швидкість (положення) ротора від датчиків.

Основні закони векторного керування такі:

а). Закони, що гарантують незмінність потокозчеплення статора Ψ_1 (що відповідає $E_{зобн}/f = \text{const}$).

б). Закони, що гарантують сталість коерцитивної сили потоку повітряного

зазору Ψ_0 (що відповідає $E/f = \text{const}$).

в). Закон, що гарантує сталість потоку ротора Ψ_2 (що відповідає $E/f = \text{const}$). Закон, що забезпечує сталість потоку статора, досягається підтриманням постійного відношення електрорушійної сили статора до кутової частоти поля. Основним недоліком цього закону є те, що при роботі на високих частотах знижується перевантажувальна здатність двигуна. Це пов'язано зі збільшенням індуктивного опору статора i , як наслідок, зменшенням магнітного потоку в повітряному зазорі між статором і ротором при збільшенні навантаження.

При збереженні основного потоку постійна перевантажувальна здатність двигуна підвищується, але апаратна реалізація системи керування ускладнюється і вимагає внесення змін в конструкцію машини або використання спеціальних датчиків. Коли потік ротора підтримується постійним, крутний момент двигуна не максимізується, але зі збільшенням навантаження збільшується основний потік, що призводить до насичення магнітопроводу i , як наслідок, потік ротора не може підтримуватися постійним.

Використання скалярних законів керування для електродвигунів насосів живильної води з розімкненими системами керування дозволяє підтримувати частоту обертання двигуна з точністю до 5%, що відповідає технічним вимогам до живильної води для виробництва теплової енергії.

3 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА НАСОСА

3.1 Побудова механічних характеристик насоса

Номінальний режим роботи насоса відповідає максимальному значенню повного ККД і характеризується наступними параметрами

- номінальний ККД $\eta_n = 62 \%$;
- номінальна частота обертання $n_n = 2986$ об/хв, тобто $\omega_n = 312,5$ рад/с;
- номінальна подача $Q_n = 44,1$ т/год $= 0,0123$ м³/с;
- номінальний напір $H_n = 1006$ м.

Рівняння для механічних характеристик живильного насоса при постійному значенні ККД η_i має наступний вигляд:

$$M_{\text{нас}}(n) = a \cdot n + c,$$

де a і c – коефіцієнти постійних і змінних втрат насоса в режимі роботи з постійним ККД.

Коефіцієнт змінних втрат насоса по відношенню до навантаження становить 85%:

$$a = \frac{0,85 \cdot M_n}{n_{\text{ном}}^2} = \frac{0,85 \cdot 803,8}{2986^2} = 0,0000766.$$

Коефіцієнт постійних втрат насоса:

$$c = 0,15 \cdot 803,8 = 120,57.$$

Підставляючи числові значення коефіцієнтів, рівняння для механічних характеристик насоса в режимі роботи з номінальним ККД має наступний вигляд

$$M(n) = 0,0000775 \cdot n^2 + 120,57 \text{ Н} \cdot \text{м} . \quad (3.1)$$

Механічна характеристика насоса, розрахована за рівнянням (3.1), показана на рисунку 3.1 червоною лінією.

3.2 Побудова сімейства механічних характеристик двигуна

Природна механічна характеристика асинхронного двигуна (при частоті 50 Гц) будується відповідно до наступного рівняння, з діапазоном ковзання s з кроком 0,01 в діапазоні від 1 до 0,00001, $n(s) = n_0 \cdot (1 - s) \therefore$

$$M_{\text{ем}}(s) = \frac{3 \cdot U_{1\phi\text{H}}^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot s \cdot \left[X_{\text{KH}}^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_{\mu}} \right)^2 \right]}$$

Номінальна частота обертання двигуна

$$\omega_{\text{H}} = \frac{\pi \cdot n_{\text{H}}}{30} = 311,5 \frac{\text{рад}}{\text{с}} .$$

Номінальний момент за паспортними даними

$$M_{\text{H(паспорт)}} = \frac{P_{\text{H}}}{\omega_{\text{H}}} = \frac{250000}{311,5} = 802,5 \text{ Н} \cdot \text{м} .$$

Критичний момент за паспортними даними

$$M_{\text{к(паспорт)}} = m_{\text{к}} \cdot M_{\text{H(паспорт)}} = 2,2 \cdot 802,5 = 1765,4 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Пусковий момент за паспортними даними

$$M_{\text{п(паспорт)}} = m_{\text{п}} \cdot M_{\text{H(паспорт)}} = 1,8 \cdot 802,5 = 1444,4 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Критичний момент за формулою Клосса

$$M_K = \frac{3 \cdot U_{1\Phi H}^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot C_1 \cdot (R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_{KH}^2})} =$$
$$= \frac{3 \cdot 220^2}{2 \cdot 314.15 \cdot 1.01631 \cdot (0.00652 + \sqrt{0.00652^2 + 0.12138^2})} = 1765,4 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Номинальний момент за формулою Клосса

$$M_H = \frac{2 \cdot M_K \cdot (1 + a \cdot s_K)}{\frac{s_K}{s_H} + \frac{s_H}{s_K} + 2 \cdot a \cdot s_K} = \frac{2 \cdot 1765,4 \cdot (1 + 1,524 \cdot 0,0358)}{\frac{0,0358}{0,0083} + \frac{0,0083}{0,0358} + 2 \cdot 1,524 \cdot 0,0358} = 802,8 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

де $a = \frac{R_1}{R'_2} = \frac{0,00652}{0,004282} = 1,524.$

Пусковий момент за формулою Клосса

$$M_{\Pi} = \frac{2 \cdot M_K \cdot (1 + a \cdot s_K)}{\frac{s_K}{s_{\Pi}} + \frac{s_{\Pi}}{s_K} + 2 \cdot a \cdot s_K} =$$
$$= \frac{2 \cdot 1765,4 \cdot (1 + 1,524 \cdot 0,0358)}{\frac{0,0358}{1} + \frac{1}{0,0358} + 2 \cdot 1,524 \cdot 0,0358} = 132,618 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Побудова сімейства механічних характеристик здійснюється за наступними рівняннями для частот обертання живильного насоса в робочому діапазоні 1500.... 3000 об/хв.

$$M_{\text{ем}}(s, f_1) = \frac{3 \cdot (U_{1\Phi\text{н}} \cdot \frac{f_1}{f_{1\text{н}}})^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot \frac{f_1}{f_{1\text{н}}} \cdot s \cdot \left[(X_{\text{кн}} \cdot \frac{f_1}{f_{1\text{н}}})^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_{\mu}} \cdot \frac{f_1}{f_{1\text{н}}} \right)^2 \right]}$$

Для побудови графіків сімейства механічних характеристик в пакеті *Mathcad* залежність швидкості двигуна від частоти та ковзання показана нижче, де

$$n_1(s, f_1) = n_0 \cdot \frac{f_1}{f_{1\text{н}}} \cdot (1 - s) .$$

Сімейство механічних характеристик електродвигуна SIEMENS 1LE15033AA034AB4-Z наведено на рисунку 3.1.

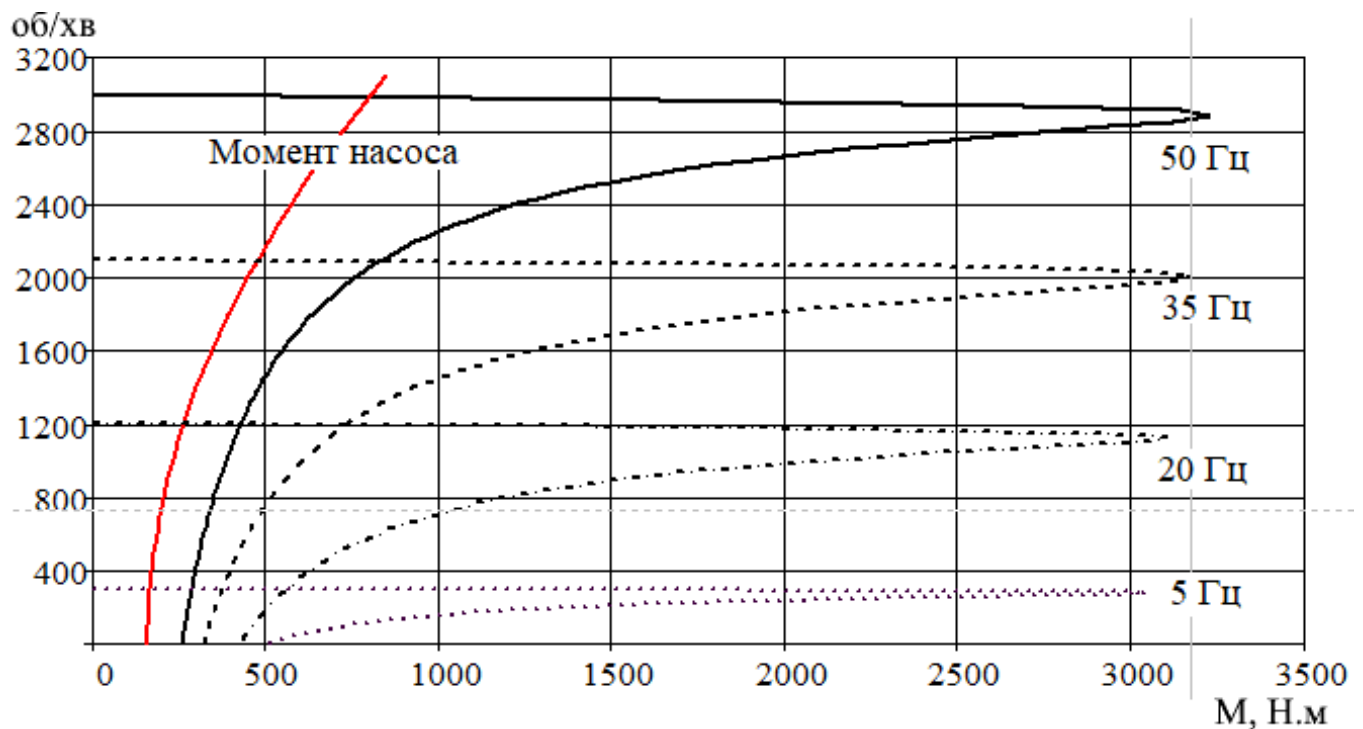


Рисунок 3.1– Сімейство механічних характеристик електродвигуна SIEMENS 1LE15033AA034AB4-Z

Отримані результати показують, що розраховані механічні властивості двигуна справедливі лише на робочій гілці механічної характеристики. Це можна пояснити тим, що значення критичного та номінального крутного моменту практично збігаються зі значеннями, розрахованими за паспортними даними. Однак значення пускового моменту, розраховане за паспортними даними, значно

перевищують розрахованих значень пускового моменту. Це пов'язано з тим, що в розрахунках не враховується вплив витіснення струму в обмотках ротора.

3.3 Дослідження динамічних характеристик асинхронного двигуна при прямому пуску

Прямий пуск асинхронних двигунів здійснюється за простою схемою з'єднання зі звичайним релейним контактним пристроєм комутації (рисунок 3.2). Такі електроприводи є некерованими і підтримують швидкість, що відповідає точці перетину механічних характеристик двигуна і навантаження при частоті мережі 50 Гц.

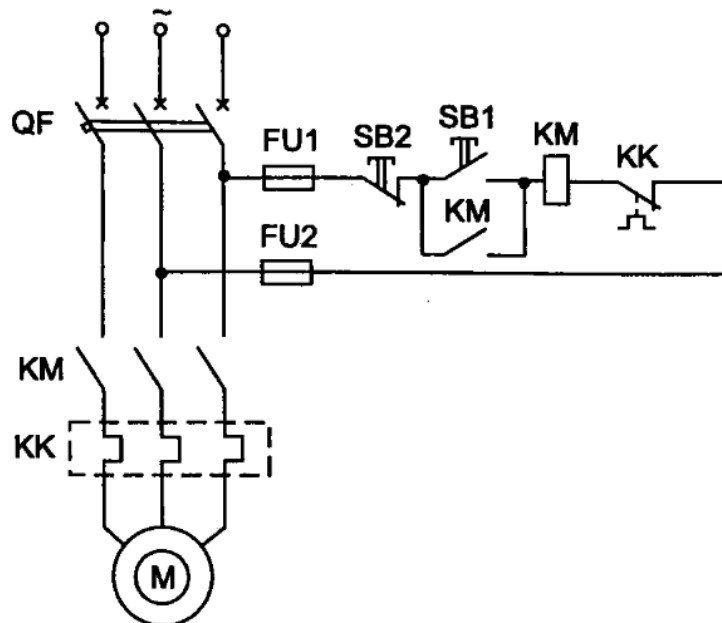


Рисунок 3.2 – Електрична схема некерованого електроприводу

Такі електроприводи застосовуються в схемах з дросельним принципом регулювання для управління технологічними параметрами, наприклад, регулюючим клапаном, підключеним послідовно з насосом живильної води для підтримки заданого значення тиску живильної води в котлі.

Перевагою таких електроприводів є простота схеми підключення електроприводу насоса, але недоліком є великі пускові струми і моменти, що

перевищують в 5...8 разів номінальне значення струму, що може викликати механічні та гідравлічні удари в електричній і гідравлічній мережах.

Схема моделі прямого пуску електроприводу живильного насоса в пакеті моделювання Matlab-Simulink з використанням бібліотеки *SimPowerSystem* наведена на рисунку 3.7.

Параметри схеми заміщення асинхронного двигуна SIEMENS 1LE15033AA034AB4-Z, взяті з таблиці 2.2 конструктивних параметрів двигуна, наведені на рисунку 3.3. До розрахункового моменту інерції насоса $1,8 \text{ кг/м}^2$ додається приведений паспортний момент інерції двигуна $2,9 \text{ кг/м}^2$. На рисунку 3.4 показані параметри для трифазного джерела живлення *Three-Phase Source* і блоку двокоординатного будувача *XY-scope*.

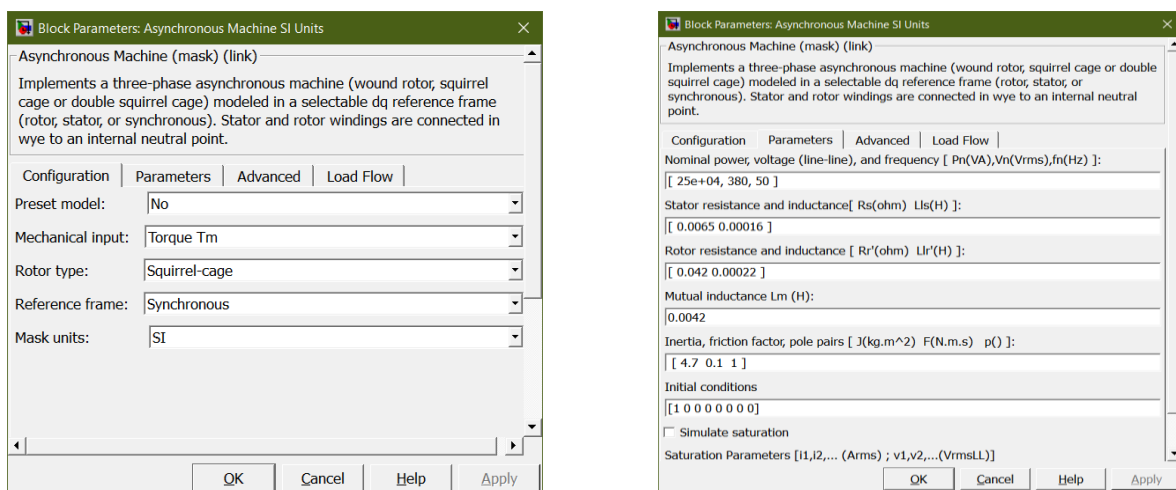


Рисунок 3.3 – Параметри асинхронного двигуна потужністю 250 кВт з таблиці 2.2

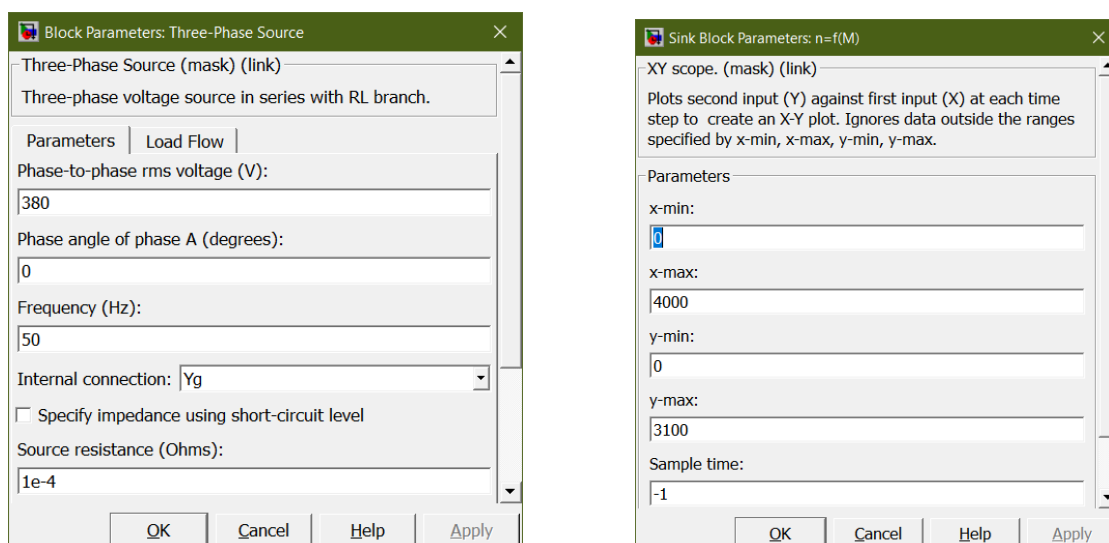


Рисунок 3.4 – Параметри трифазного блоку живлення *Three-Phase Source* і блоку двокоординатного будувача *XY-scope*

На рисунку 3.5 показано схему моделі прямого пуску електропривода живильного насоса. Момент навантаження двигуна – це вентиляторний момент, який описується рівнянням (3.1).

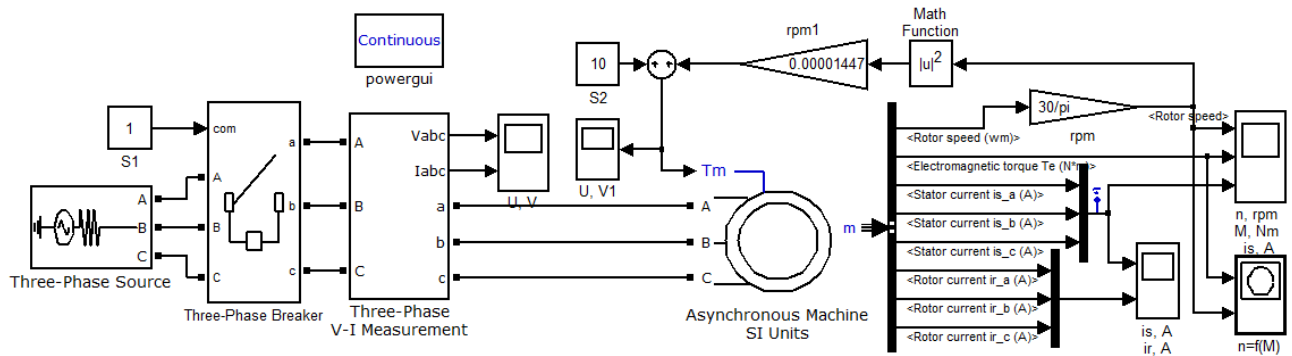


Рисунок 3.5 – Схема моделі прямого пуску електропривода живильного насоса

Результати моделювання пуску електроприводу на основі трифазного асинхронного приводу показані на рисунку 3.6.

Як видно з графіка на рисунку 3.6, час встановлення швидкості та моменту при прямому пуску електроприводу становить 1,4 с, електромагнітний момент при пуску досягає приблизно 4000 Н·м, що майже в п'ять разів перевищує номінальне значення, а струм статора при пуску досягає 3300 А, що майже в сім разів перевищує номінальне значення.

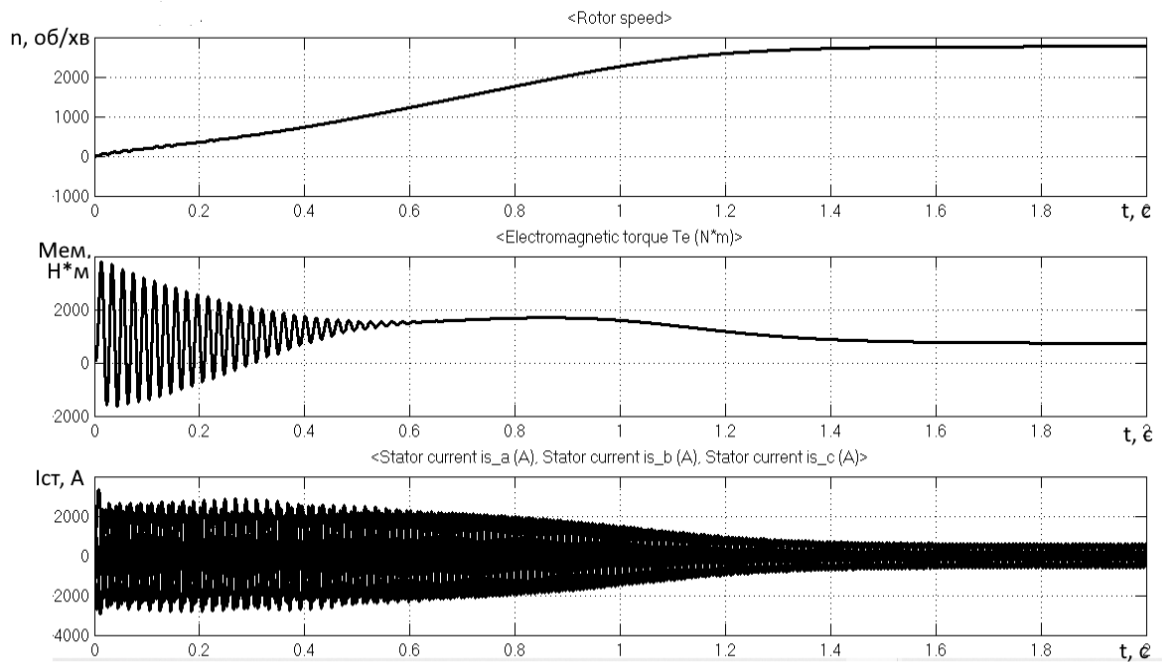


Рисунок 3.6 – Перехідні процеси зміни швидкості, електромагнітного моменту та струму статора при прямому пуску електропривода

3.4 Дослідження динамічних характеристик асинхронного електропривода з широтно-імпульсним перетворювачем

Схема електроприводу насоса з перетворювачем частоти наведена на рисунку 3.7.

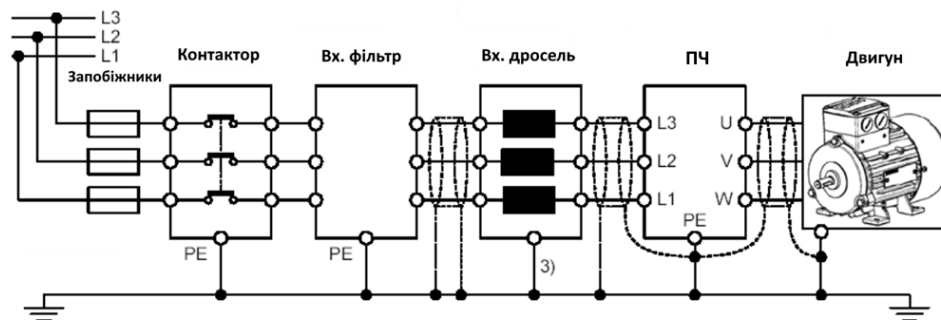


Рисунок 3.7 – Схема електропривода насосу з ПЧ

Схема моделі електропривода живильного насоса з ПЧ наведена на рисунку 3.8. Момент навантаження двигуна – вентиляторний, з параметрами з виразу (3.1). Параметри двигуна подані на рисунку 3.3.

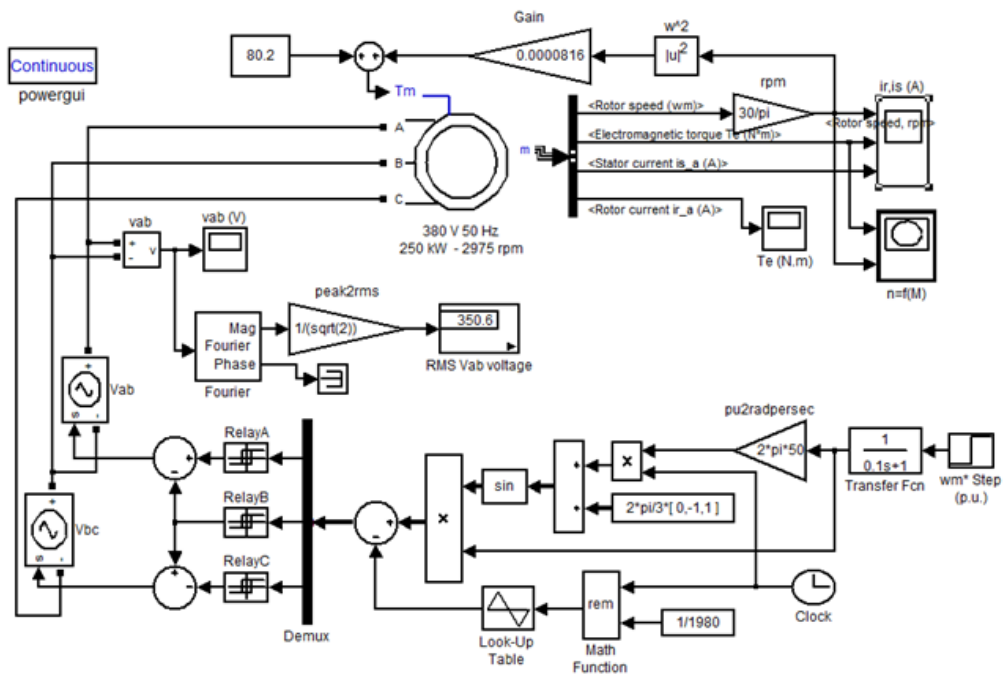


Рисунок 3.8 – Схема моделі електропривода живильного насоса з широтно-імпульсним перетворювачем частоти

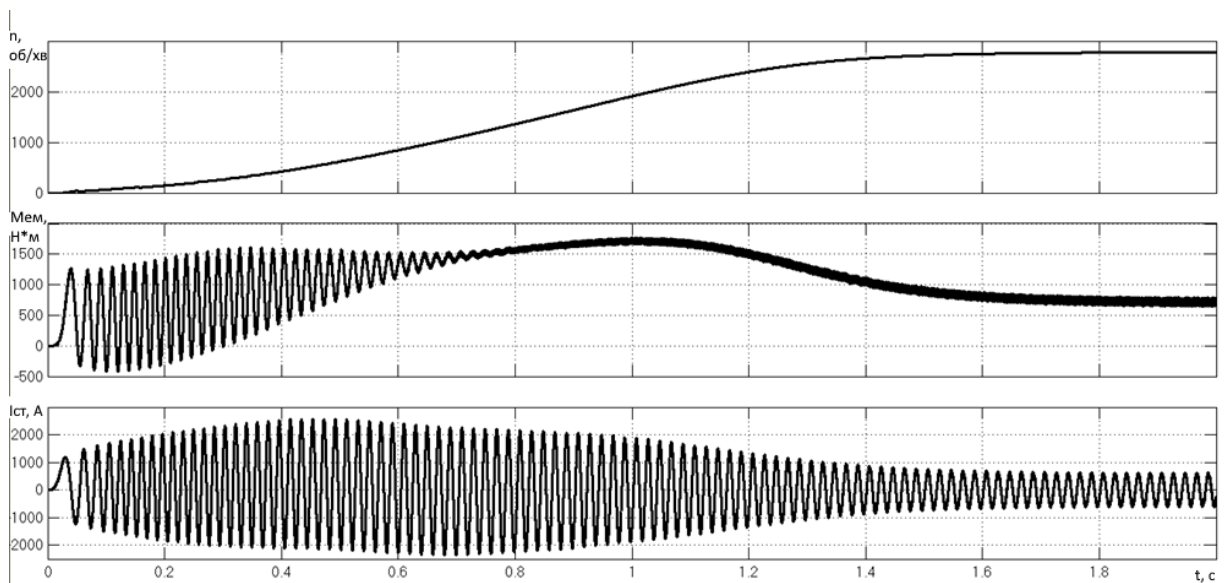


Рисунок 3.9 – Перехідні процеси зміни швидкості, електромагнітного моменту та струму статора при пуску електропривода з ПЧ

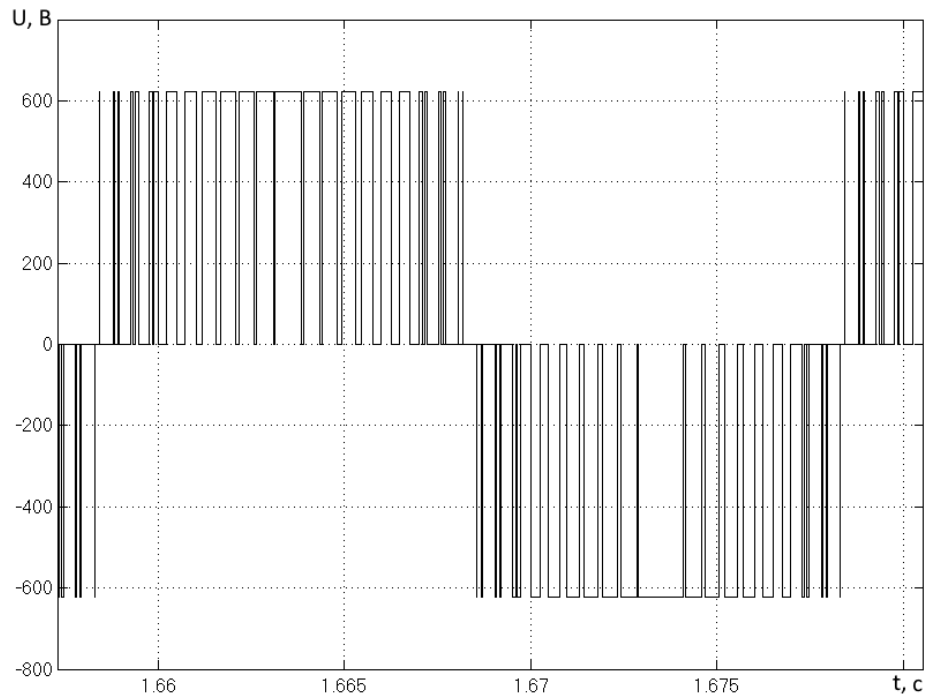


Рисунок 3.10 – Осцилограма формування синусоїдального струму статора широтно-імпульсним перетворювачем

З графіка перехідного процесу під час пуску електропривода з ПЧ (рисунок 3.12) видно, що час набору швидкості та моменту для прямого пуску електропривода становить 1,5 с, пусковий електромагнітний момент зменшився до 1700 Н·м, що майже втричі перевищує номінальне значення, а пусковий струм статора зменшився до 2500 А, що майже в п'ять разів перевищує номінальне значення.

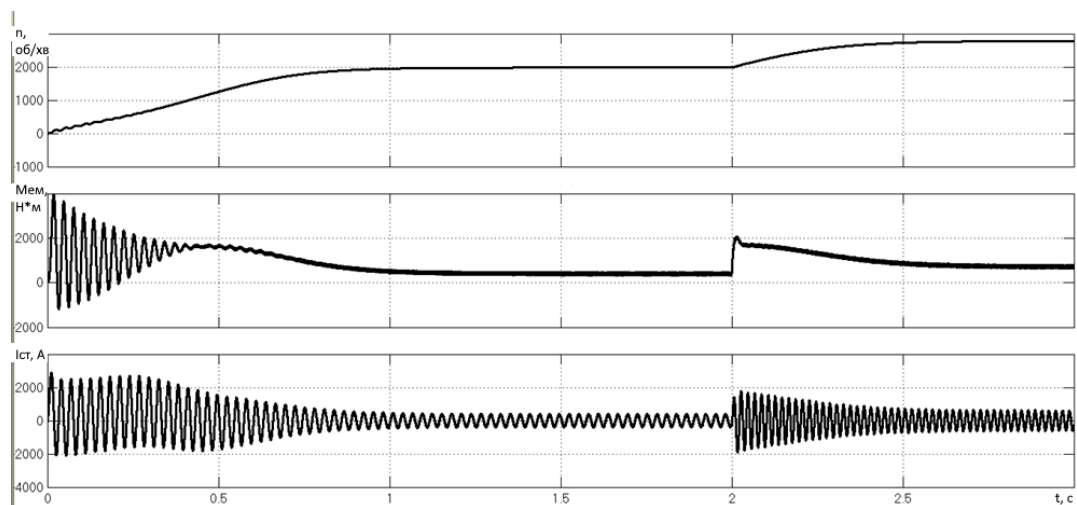


Рисунок 3.11 – Перехідні процеси зміни швидкості, електромагнітного моменту та струму статора при зміні завдання по частоті електропривода з 35 Гц до 50 Гц

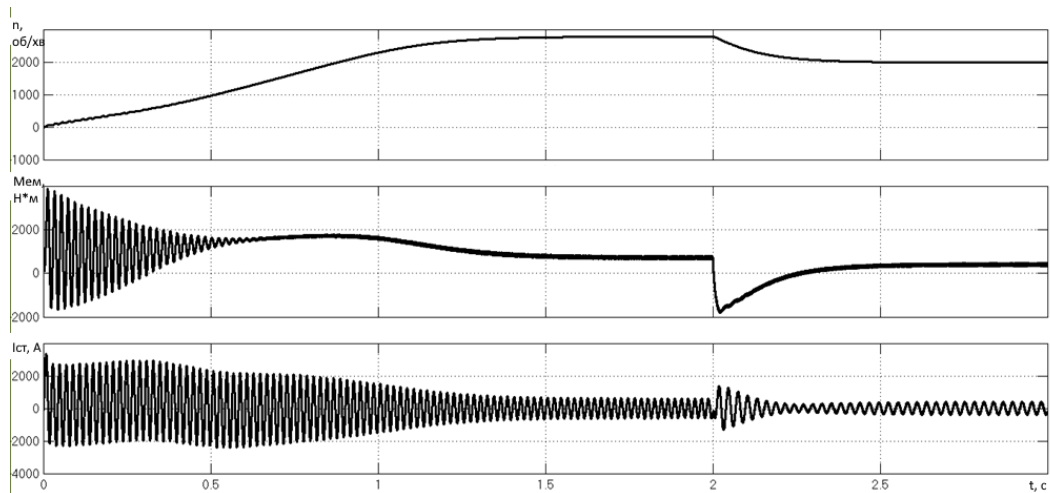


Рисунок 3.12 – Перехідні процеси зміни швидкості, електромагнітного моменту та струму статора при зміні завдання по частоті електропривода з 50 Гц до 35 Гц

Пусковий струм статора зменшився до 2500 А, що майже в п'ять разів перевищує номінальне значення. Перехідні процеси (рисунки 3.11 і 3.12) при збільшенні і зменшенні частоти на 15 Гц мають плавний характер і закінчуються через 0,5 с.

3.5 Дослідження динамічних характеристик асинхронного електроприводу з векторним керуванням та мережевим інвертором

3.5.1 Рекуперація енергії мережевими інверторами

При гальмуванні потужних двигунів енергію, накопичену в двигуні, необхідно десь приймати. В цьому випадку використанні гальмівних резисторів неможливе. Розглянемо використання мережевого інвертора для рекуперації енергії гальмування в режиму живлення при зниженні обертів асинхронного електропривода живильного насоса.

Мережеві інвертори – це трифазні автономні інвертори напруги, що працюють в режимі струму. Такі інвертори використовуються для частотно-

струмового регулювання швидкості асинхронного двигуна. Вихід по постійному струму мережевого інвертора разом з конденсаторами фільтра утворює вторинне джерело живлення (рисунок 3.13). Основна роль мережевого інвертора полягає в забезпеченні заданого значення напруги на конденсаторі фільтра U_d , яке використовується для живлення ШІМ або АІН імпульсного силового перетворювача при регулюванні швидкості двигунів змінного або постійного струму.

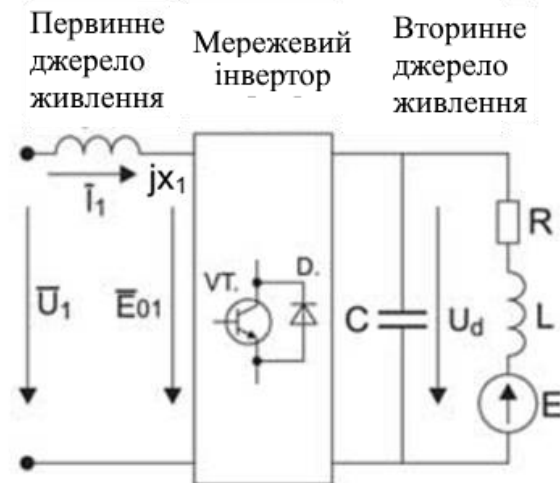


Рисунок 3.13 – Система «мережа – вторинне джерело живлення – силовий напівпровідниковий перетворювач – електрична машина»

Крім того, сам інвертор представлений перетворювачем, який генерує просторовий вектор ЕРС \vec{E}_{01} по відношенню до мережі змінного струму. Це другий вихід мережевого інвертора змінного струму (рисунок 3.14).

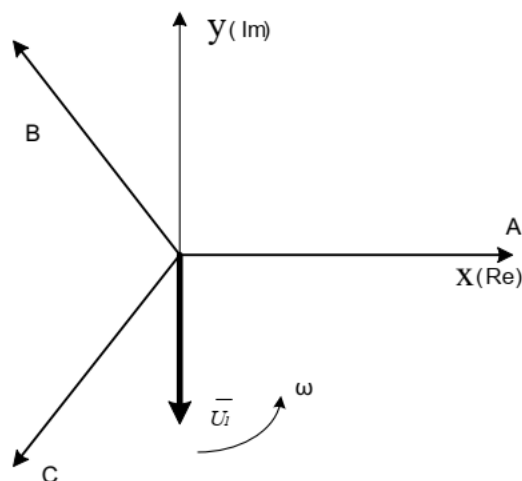


Рисунок 3.14 – Результируючий просторовий вектор мережевої напруги \vec{U}_1

Перша гармоніка цієї ЕРС \vec{E}_{01} дорівнює [9]

$$\vec{E}_{01} = \mu_1 \cdot U_d \cdot e^{j\varphi_{1mod}}, \quad (3.1)$$

де μ_1 – коефіцієнт модуляції,

φ_{1mod} – фаза напруги модуляції по відношенню до напруги мережі.

Рівняння схеми на рисунку 3.14, що базується на другому законі Кірхгофа, виглядає наступним чином:

$$\vec{U}_1 = \vec{E}_{01} + j \cdot x_1 \cdot \vec{I}_1, \quad (3.2)$$

де \vec{E}_{01} , \vec{U}_1 , \vec{I}_1 – просторовий вектор електрорушійної сили, напруги мережі та струму мережі на виході мережевого інвертора.

Для мереж змінного струму інвертори можуть працювати або як генератори активної потужності (інвертори), або як споживачі активної потужності (активні випрямлячі). У цьому випадку активна потужність в мережі визначається за формулою [9]

$$P_1 = -\left((m_1 U_1 E_{01}) / 2x_1\right) \cdot \sin \varphi_{1mod} = -\left((m_1 U_1 \mu_1 U_d) / 2x_1\right) \cdot \sin \varphi_{1mod}, \quad (3.3)$$

де $x_1 = 2\pi f_1 L_1$, L_1 – індуктивність на вході-виході інвертора;

m_1 – число фаз.

Рівняння (3.3) показує, що інвертор генерує активну потужність в мережу при $\varphi_{1mod} \geq 0$. Інвертор споживає активну потужність з мережі при $\varphi_{1mod} \leq 0$. При $\varphi_{1mod} = 0$ вся система знаходиться в режимі холостого ходу.

Реактивна потужність, яку споживає інвертор, визначається за формулою [9]:

$$\begin{aligned}
 Q_1 &= -(m_1 U_1 E_{01} / 2x) \cdot (\cos \varphi_{1,mod} - U_1 / E_{01}) = \\
 &= -(m_1 U_1 \mu_1 U_d / 2x) \cdot (\cos \varphi_{1,mod} - U_1 / \mu_1 U_d).
 \end{aligned}
 \tag{3.4}$$

Залежно від знака в дужках (5.4), інвертор може споживати реактивну потужність (індуктивну) або реактивну потужність (ємнісну) і діяти як компенсатор.

Універсальний мостовий некерований напівпровідниковий підсилювач живиться від трифазної напруги живлення і забезпечує напругу близько 550 В. Роль конденсатора двояка: по-перше, зменшити пульсації напруги випрямляча, а по-друге, зменшити внутрішній опір джерела при імпульсному навантаженні.

На рисунку 3.2 показані розрахункові параметри асинхронного двигуна і схема перемикачів трифазного інвертора. Напруга живлення інвертора становить 560 В, яке забезпечується елементом постійного струму. Завдання швидкості забезпечується двома блоками *Speed* і *Speed1*, а регулювання навантаження також виконується двома блоками *Torque* і *Torque1*. Два блоки використовуються для розширення можливості комбінування швидкості і навантаження.

Параметри ланцюгів зворотних зв'язків за частотою обертання та струму прийняті розрахунковими.

Процес моделювання цієї моделі виконується на фіксованому етапі з використанням програми дискретного рішення. Крок моделювання *Ts* налаштовується в спеціальному вікні, доступ до якого можна отримати, перейшовши в головне меню *File Model Properties Callbacks*. У зв'язку з цим формат відображення налаштувань модельного блоку специфічний, і символ *Ts* повинен бути вказаний у *Sample (Sampling) Time*. Відповідні перебудови завершені. Крім того, для прискорення рішення використовується процедура *Accelerator*. Перед початком моделювання *Simulink* створює додаткові файли, на які витрачається час. Для візуалізації результатів моделювання використовуються осцилографи *Scope*.

Модель електропривода з частотним керуванням за векторним законом показана на рисунку 3.15.

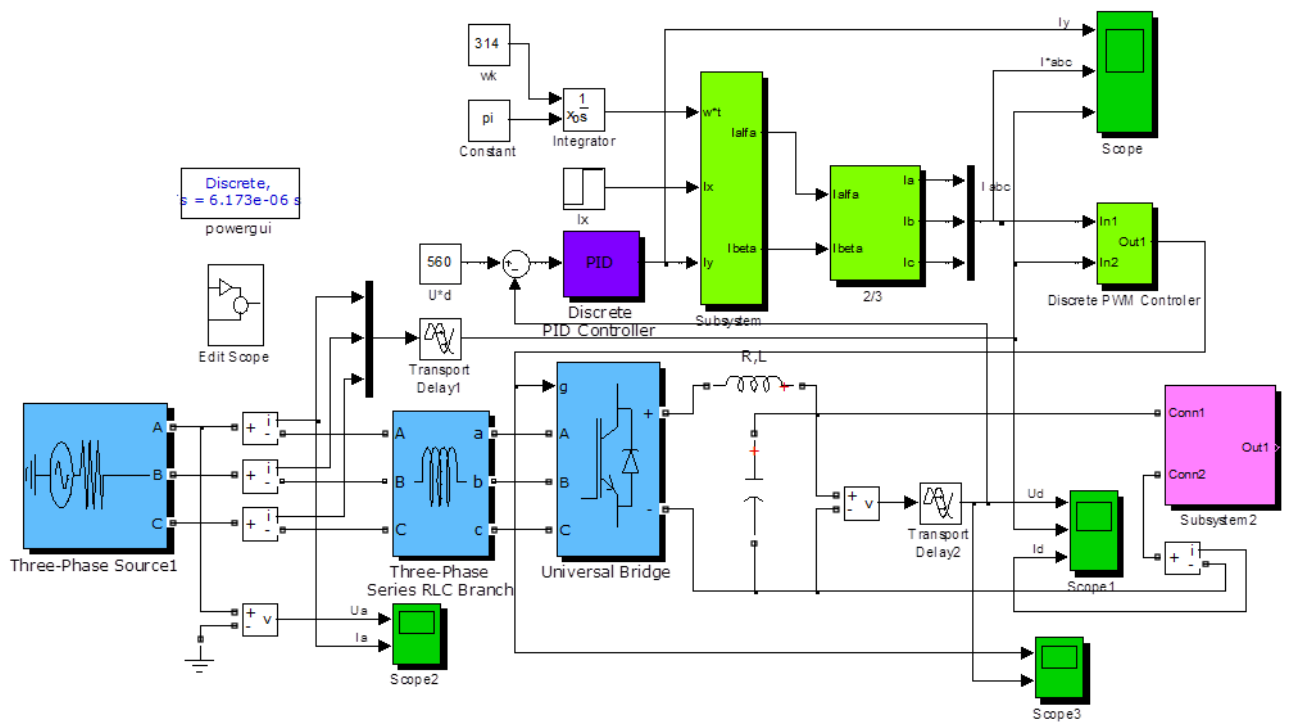


Рисунок 3.16 – Модель електропривода з частотним керуванням за векторним законом

Електропривод упакований у підсистему *Subsystem 2* схема його моделі продемонстрована на рисунку 3.17. Вентиляторне навантаження від відцентрового насосі розраховується за виразом (3.1) і надходить на вхід T_m двигуна.

Центральною ланкою електроприводу є схема векторного управління приводом *Vektor control*, модель якого показана на рисунку 3.18.

Деякі елементи схеми є стандартними: це регулятори струму, потоку і швидкості. Різниця між цими моделями контролерів і раніше використовуваними моделями полягає в тому, що в них використовуються дискретні інтегратори і часове вікно *Sampling time* заповнюється символами T_s .

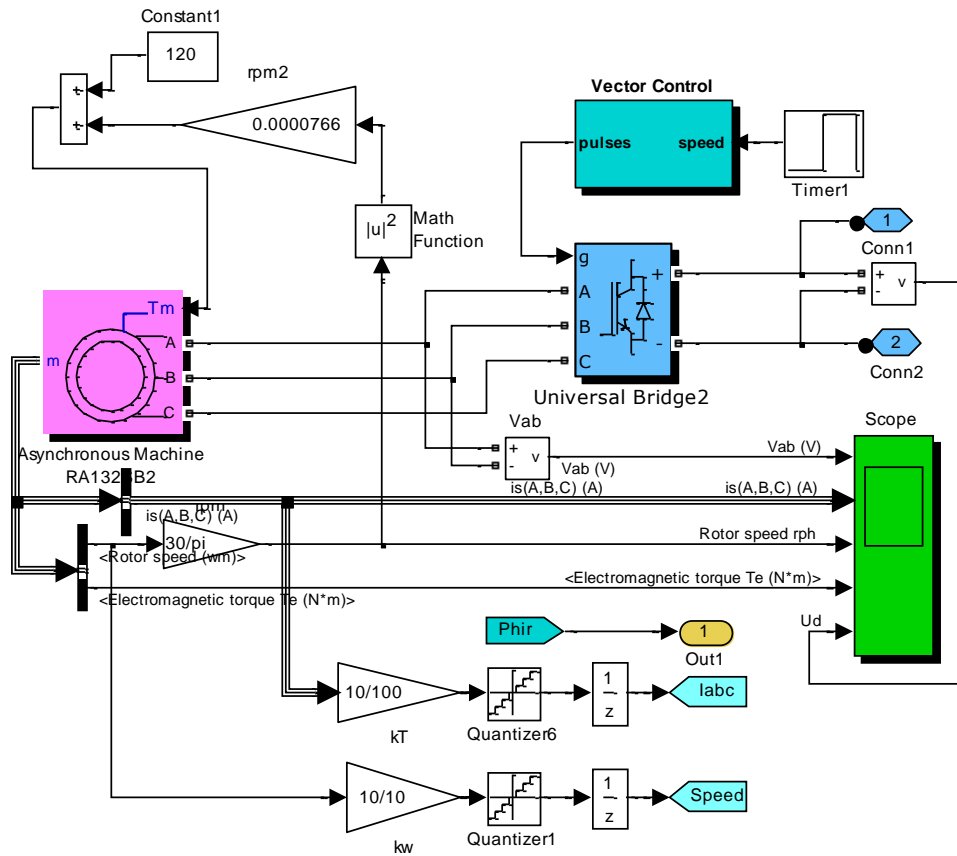


Рисунок 3.17 – Модель електроприводу в підсистемі *Subsystem 2*

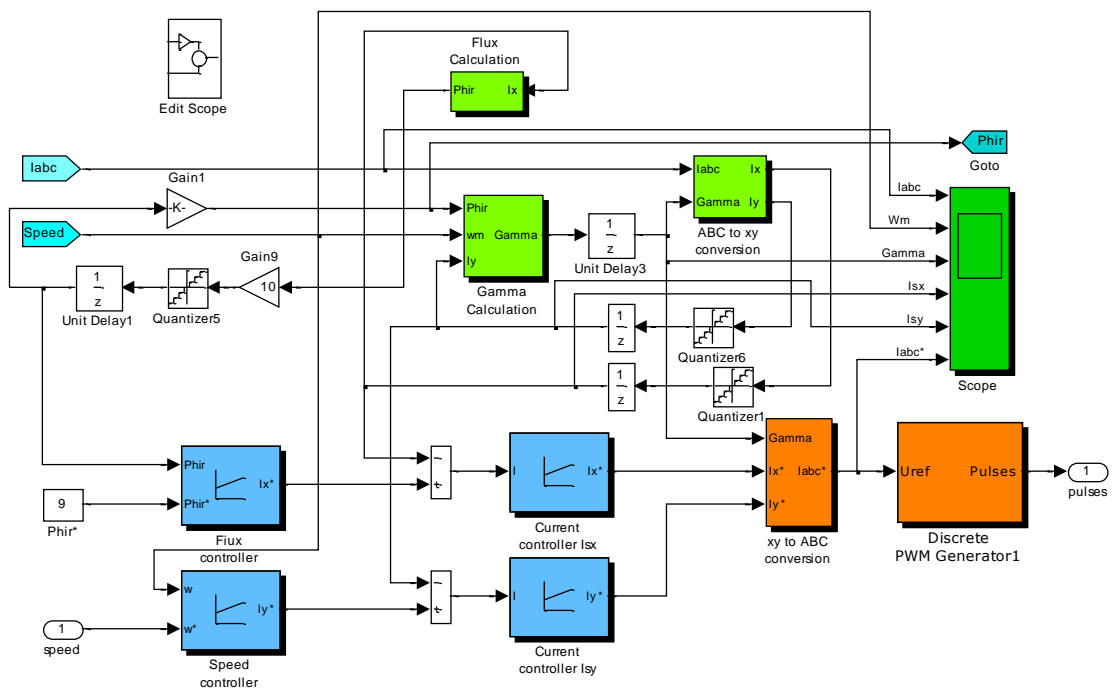


Рисунок 3.18 – Модель схеми векторного керування приводом *Vektor Control*

Розрахуємо оптимальні налаштування для цих регуляторів розраховуються для отримання оптимальних за модулем перехідних процесів для відповідних ланцюгів.

3.5.2 Розрахунок оптимальних параметрів налаштування регуляторів струмом для ідеального джерела струму

Розрахункова схема контуру струму подана на рисунку 3.19.

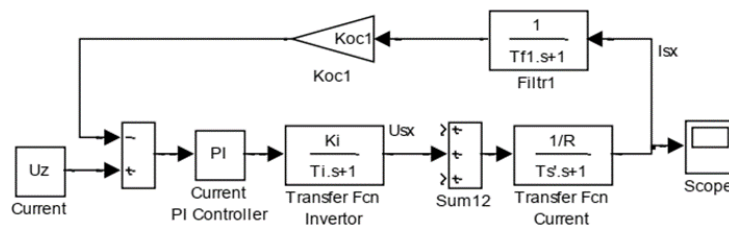


Рисунок 3.19 – Структурна схема контуру струму

Ця схема включає в себе ідеальний інвертор з передавальною функцією

$$W_{TFI}(s) = \frac{K_I}{T_I \cdot s + 1},$$

де $K_I = \frac{U_{\phi \max}}{U_{y \max}} = \frac{220 \cdot \sqrt{2}}{10} = 31,11 \text{ В/В}$ – коефіцієнт передачі інвертора;

$U_S = U_{\phi \max} = U_{\phi} \cdot \sqrt{2} = 220 \cdot 1,414 = 311,08 \text{ В}$ – модуль просторового вектора фазної напруги статора;

$U_{y \max} = 10 \text{ В}$ – максимальна напруга керування інвертором;

$T_I = 0,5 \cdot \frac{1}{f_i} = \frac{0,5}{2500} = 0,0002 \text{ с}$ – постійна часу інвертора;

$f_i = 2500 \text{ Гц}$ – несуча частота (комутації) інвертора.

$$W_{TFI}(s) = \frac{31,11}{0,0002 \cdot s + 1}. \quad (3.2)$$

Навантаження інвертора представлено еквівалентним опором статорної обмотки $R = 0,002609$ Ом і еквівалентною постійною часу $T'_s = 0,06691$ с (див. рисунок).

Передавальна функція навантаження (ланцюги обмотки статора)

$$W_{TFC}(s) = \frac{1/R}{T'_s \cdot s + 1} = \frac{1/0,002609}{0,06691 \cdot s + 1}. \quad (3.3)$$

Передавальна функція фільтра *Filtr1*

$$W_{F1}(s) = \frac{1}{T_{f1} \cdot s + 1} = \frac{1}{0,00002 \cdot s + 1}, \quad (3.4)$$

де $T_{f1} = 0,00002$ с – постійна часу фільтра, що відповідає фактичному поточному періоду дискретизації даних 40 мкс.

Коефіцієнт зворотного зв'язку за струмом

$$K_{oc1} = \frac{10}{I_{нік.ПЧ} \cdot \sqrt{2}} = \frac{10}{3092,1 \cdot \sqrt{2}} = 0,002287 \text{ В/А}, \quad (3.5)$$

де $I_{нік.ПЧ} = I_n \cdot k_I = 435,5 \cdot 7,2 = 3092,1$ А – піковий струм двигуна, який повинен підтримувати перетворювач частоти при пуску.

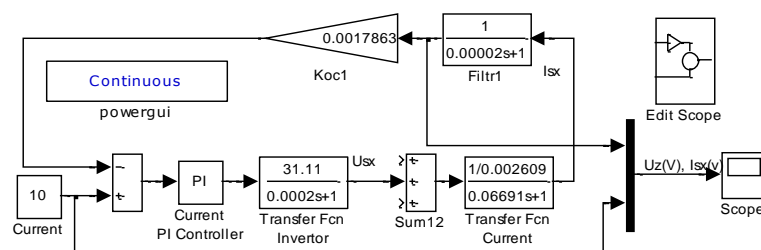


Рисунок 3.20 – Розрахункова схема моделі контуру струму

Розрахунок параметрів регулятора струму (рисунок 3.20) виконаємо за **модульним оптимумом** [8]. Усі необхідні умови виконані.

За однієї великої постійної часу рекомендується застосування пропорційно-інтегрального регулятора з функцією виду

$$W_{pez}(s) = K_{pez} \cdot \frac{T_{uz} \cdot s + 1}{T_{uz}} = 7,213 \cdot \frac{0,06691 \cdot s + 1}{0,06691 \cdot s}, \quad (3.6)$$

де
$$K_{pez} = \frac{T'_s \cdot R}{T_{\mu 1} \cdot a_k \cdot K_I \cdot K_{oc1}} = \frac{0,06691 \cdot 0,002609}{0,00022 \cdot 2 \cdot 31,11 \cdot 0,002287} = 5,576$$

$T_{uz} = T'_s = 0,06691$ с – час ізодрому T_{uz} , рівний більшій постійній часу;

$T_{\mu 1} = T_I + T_{f1} = 0,0002 + 0,00002 = 0,00022$ с – еквівалентна менша постійна

часу контуру струму;

$a_k = 2$ – коефіцієнт оптимізації.

Схема моделі ПІ-регулятора струму *Current PI Controller* відкривається за командою *Look Under Mask* і показана на рисунку 3.21.

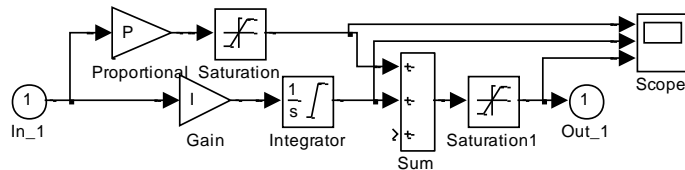


Рисунок 3.21 – Схема моделі ПІ-регулятора

Параметри регулятора вводяться у діалоговому вікні, яке відкривається при подвійному натисканні на зображенні регулятора (рисунок 3.22).

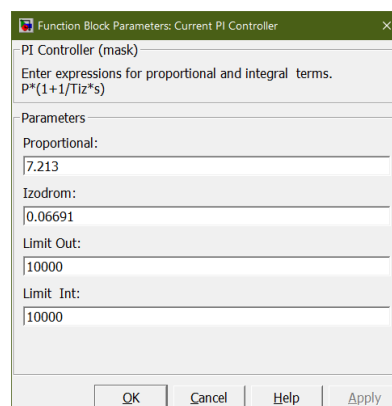


Рисунок 3.22 – Вікно введення параметрів ПІ-регулятора

Коефіцієнт передачі регулятора $K_{\text{рег}}$ вводиться в рядку *Proportional*, час

ізодрому $T_{\text{из}}$ в рядку *Izodrom*, а коефіцієнт передачі інтегратора

$$I = \frac{K_{\text{рег}}}{T_{\text{из}}}$$

обчислюється під час ініціалізації регулятора; *Limit Out*, *Limit Int* – параметри, що задають вихідну напругу контролера та граничний рівень інтегратора. Параметри встановлюються на великі значення, щоб запобігти насиченню і дозволити контролеру працювати в лінійному режимі.

Блок *Current* визначає струм перетворювача (інвертора). Струм задається у вигляді напруги. При заданому параметрі задання напруги струм статора по осі відповідає ± 10 В.

Для спрощення процедури обробки результатів моделювання перехідний процес можна виразити в машинних одиницях (вольтах). У цьому випадку експериментальна діаграма має вигляд, наведений на рисунку 3.23.

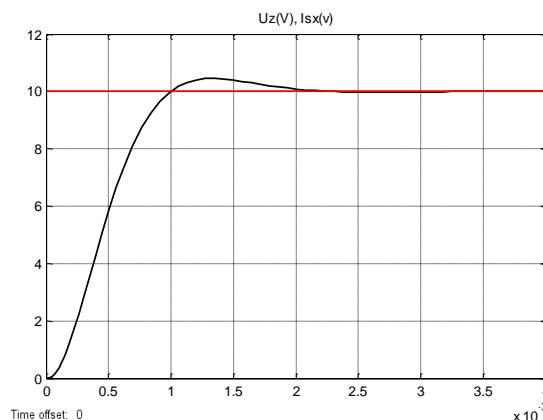


Рисунок 3.23 – Перехідний процес у контурі струму у вольтах

3.5.3 Розрахунок оптимальних параметрів налаштування регулятора потоку при ідеальному джерелі струму

Розрахункова схема контуру потоку показана на рисунку 3.24.

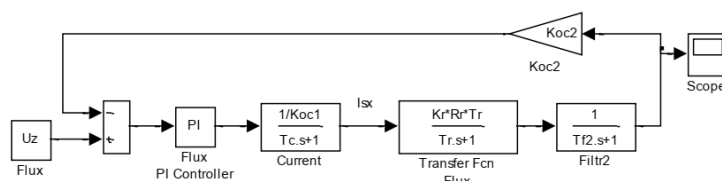


Рисунок 3.24 – Структурна схема контуру потоку

Контур містить еквівалентний підпорядкований контур струму з функцією передачі *Current*:

$$W_C(s) = \frac{1/K_{oc1}}{T_C \cdot s + 1} = \frac{1/0,002287}{0,00044 \cdot s + 1}, \quad (3.7)$$

де $T_C = a_k \cdot T_{\mu 1} = 2 \cdot 0,00022 = 0,00044$ с – еквівалентна постійна контуру струму.

Передатна функція блоку потоку *Transfer Fcn Flux*:

$$W_{TFF}(s) = \frac{K_r \cdot R_r \cdot T_r}{T_r \cdot s + 1} = \frac{0,9811 \cdot 0,00208 \cdot 2,245}{2,245 \cdot s + 1} = \frac{0,00458}{2,245 \cdot s + 1}. \quad (3.8)$$

Передатна функція фільтра *Filtr2*:

$$W_{F2}(s) = \frac{1}{T_{f2} \cdot s + 1} = \frac{1}{0,0002 \cdot s + 1}, \quad (3.9)$$

де $T_{f2} = 0,0002$ с – постійна часу фільтра, що відповідає періоду дискретизації даних потоку 400 мкс.

Коефіцієнт зворотного зв'язку за потоком

$$K_{oc2} = \frac{10}{\Psi_{Rx \max}} = \frac{10}{1} = 10 \frac{\text{В}}{\text{Вб}}. \quad (3.10)$$

Розрахунок параметрів регулятора потоку виконаємо за **модульним оптимумом** [8]. Усі необхідні умови виконані.

За однієї великої постійної часу застосуємо пропорційно-інтегральний регулятор з функцією виду

$$W_{pez}(s) = K_{pez} \frac{T_{uz} \cdot s + 1}{T_{uz} \cdot s} = 68,375 \cdot \frac{2,245 \cdot s + 1}{2,245 \cdot s}, \quad (3.11)$$

$$K_{pez} = \frac{T_r \cdot K_{oc1}}{T_{\mu 2} \cdot a_k \cdot K_r \cdot R_r \cdot T_r \cdot K_{oc2}} = \frac{2,245 \cdot 0,002287}{0,00064 \cdot 2 \cdot 0,9811 \cdot 0,00208 \cdot 2,245 \cdot 10} = 87,547,$$

де

$$T_{uz} = T_r = 2,245 \text{ с} \quad \text{– час ізодрому } T_{uz}, \text{ рівний більшій постійній часу};$$

$$T_{\mu 2} = T_C + T_{f2} = 0,00044 + 0,0002 = 0,00064 \text{ с} \quad \text{– еквівалентна менша постійна}$$

часу контуру потоку;

$a_k = 2$ – коефіцієнт оптимізації.

Параметри регулятора вводяться у діалоговому вікні, яке відкривається при подвійному натисканні на зображенні регулятора (рисунок 3.25).

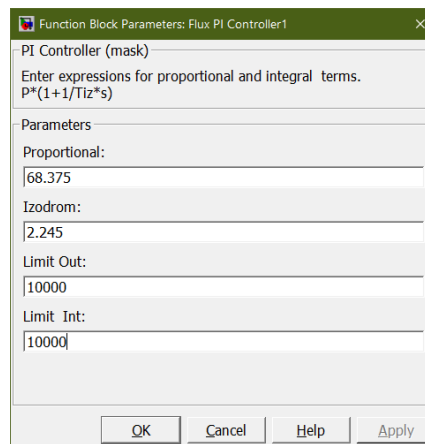


Рисунок 3.25 – Вікно введення параметрів ПІ-регулятора потоку

Блок *Flux* визначає потік ротора. Магнітний потік задається у вигляді напруги. Для заданих параметрів напруги завдання 10 В відповідає потоку ротора 1 Вб вздовж осі x . Номінальне значення потоку відповідає завданню 8 В. Дослідимо спроектовану схему в лінійному режимі без обмеження вихідної напруги регулятора (рисунок 3.26). Для цього змодуємо сигнал завдання на рівні 8 В.

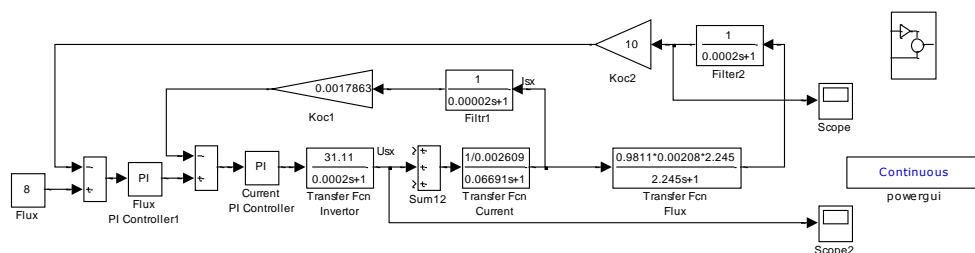


Рисунок 3.26 – Схема моделі контуру потоку

На рисунку 3.27 представлені результати моделювання у машинних одиницях (вольтах).

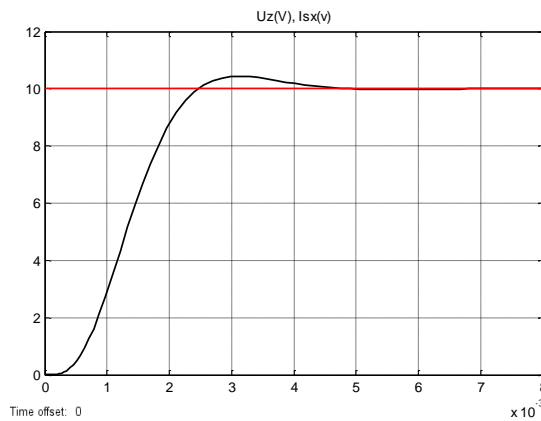


Рисунок 3.27 – Перехідний процес у контурі потоку у вольтах

3.5.4 Розрахунок оптимальних параметрів налаштування регулятора швидкості при ідеальному джерелі струму

Структурна схема контуру швидкості показана на рисунку 3.28.

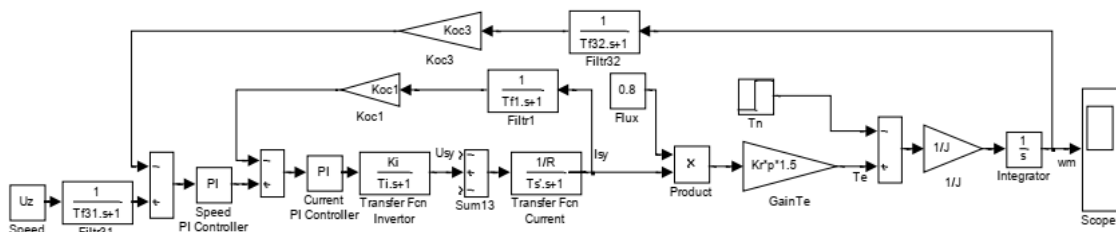


Рисунок 3.28 – Структурна схема контуру швидкості

До складу цієї схеми входять:

- контур струму з регулятором струму *Current PI Controller*, передавальною функцією інвертора *Transfer Fcn Invertor*, вузлом введення збурень *Sum13*, ланцюгом струму *Transfer Fcn Current* та ланцюгом зворотного зв'язку за струмом;
- контур швидкості з регулятором швидкості *Speed PI Controller*, схемою формування моменту T_e (блок *Flux*, блок множення *Product*, підсилювач *Gain Te*), двигуном (*Integrator* та підсилювачем $1/J$).

$$K_{int} = \frac{1}{J} = \frac{1}{4,8} = 0,208. \quad (3.15)$$

Коефіцієнт зворотного зв'язку за швидкістю

$$K_{oc3} = \frac{10}{314,2} = 0,03183 \frac{B}{c^{-1}}. \quad (3.16)$$

Розрахунок параметрів ПІ-регулятора швидкості здійснюється відповідно до **симетричного оптимуму** [8]. Виконано всі необхідні умови.

Застосуємо рекомендований ПІ-регулятор з передавальною функцією наступного виду

$$W_{pez}(s) = K_{pez} \frac{T_{uz} \cdot s + 1}{T_{uz} \cdot s} = 56,898 \cdot \frac{0,00256 \cdot s + 1}{0,00256 \cdot s}, \quad (3.17)$$

де
$$K_{pez} = \frac{T_{int} \cdot K_{oc1} \cdot J}{T_{\mu3} \cdot a_k \cdot K_{T\theta} \cdot K_{oc3}} = \frac{1 \cdot 0,002287 \cdot 4,8}{0,00064 \cdot 2 \cdot 1,411 \cdot 0,03185} = 190,84;$$

$T_{\mu3} = T_C + T_{f32} = 0,00044 + 0,0002 = 0,00064$ с – менша постійна часу контуру швидкості;

$T_{uz} = a_k \cdot b_k \cdot T_{\mu3} = 2 \cdot 2 \cdot 0,00064 = 0,00256$ с – час ізодрому регулятора, рівний еквівалентній постійній часу оптимізованого контуру швидкості;

$a_k = b_k = 2$ – коефіцієнти оптимізації.

Перехідний процес за симетричним оптимумом характеризується великими перерегулюваннями та коливаннями, спричиненими форсуючою ланкою в чисельнику передавальної функції регулятора. Компенсація ефекту підсилення форсування досягається встановленням інерційної ланки (фільтра) *Filtr31* в каналі завдання з передавальною функцією

$$W_{F31}(s) = \frac{1}{T_{uz} \cdot s + 1} = \frac{1}{0,00256 \cdot s + 1}. \quad (3.18)$$

Параметри регулятора швидкості вводяться через діалогове вікно, яке відкривається при подвійному натисканні на зображенні регулятора (рисунок 3.30).

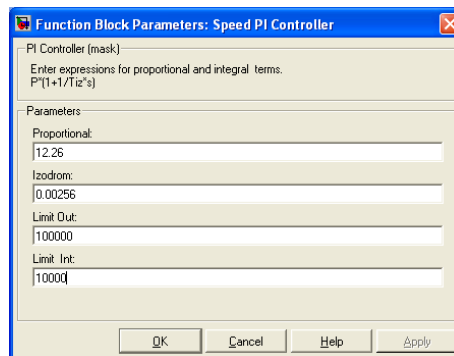


Рисунок 3.30 – Вікно введення параметрів ПІ-регулятора швидкості

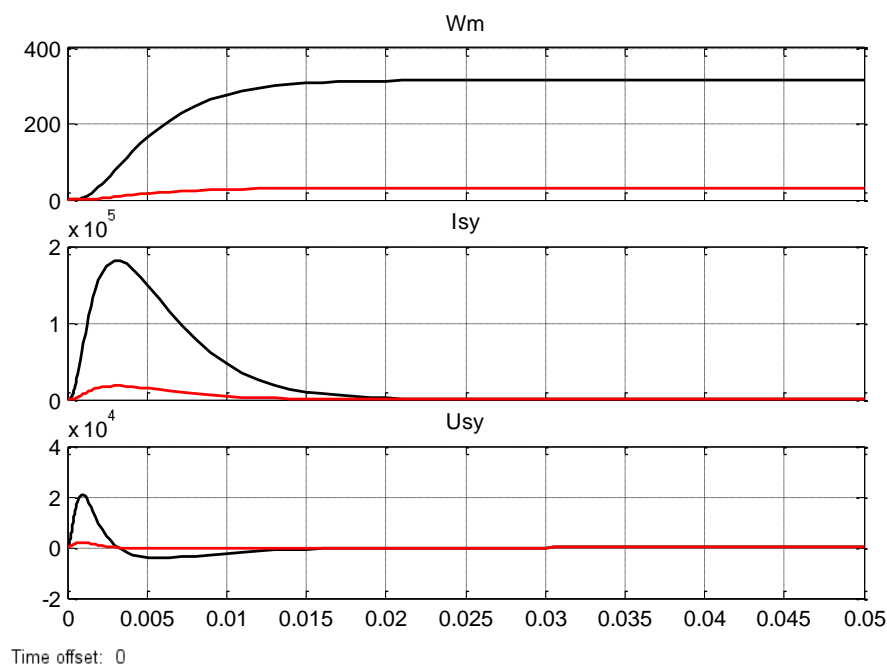


Рисунок 3.31 – Оптимізований перехідний процес у контурі швидкості при управлінні по входу +10 В (чорна лінія) та +1 В (червона лінія)

Блок *Speed* задає швидкість обертання ротора. Швидкість задається у вигляді напруги. Оскільки регулятор швидкості є необмеженим, а джерело струму (інвертор) – ідеальним, то має бути сформований оптимальний режим керування (рисунок 3.31).

При управлінні «у великому» (з входом +10 В) двигун запускається зі швидкістю 314,1 1/с з оптимальними параметрами. Щоб досягти цього, джерело струму повинно генерувати максимальну напругу 4689 В і максимальний струм навантаження, що значно перевищує паспортний струм статора. В реальності максимальна вихідна напруга інвертора становить лише 311,1 В, а граничний струм статора – паспортний. Тому в реальності оптимальна швидкість не може бути досягнута при регулюванні «у великому».

При подачі на вхід напруги +1 В (управління «у малому») стан вихідних параметрів джерела струму наближається до реального (див. червону перехідну криву на рисунку 3.31), а перехідні параметри фактично наближаються до оптимальних.

3.5.5 Налаштування блоку векторного керування *Vector Control* та результати моделювання

Блок *Vector Control* (рисунок 3.18) отримує від двигуна два вимірюваних сигналів (трифазний струм статора і частоту обертання ротора). Решта сигнали обчислюються схемою векторного управління. Спочатку нам потрібно обчислити частоту обертання координати ω_k (частоту інвертора) і поточний кут повороту координати γ . Ця функція виконується блоком обчислення *Gamma Calculation*, модельна схема якого показана на рисунку 3.32.

Блок реалізує два рівняння
$$\gamma = \frac{1}{s} \omega_k \quad \text{та} \quad \omega_u = \omega_k = p\omega_m + k_R R_R \frac{i_{Sy}}{\psi_{Rx}}.$$

Рівняння записано в абсолютних одиницях, а ω_m в схемі працює в машинних одиницях, тому на вході з'явився підсилювач з коефіцієнтом підсилення ω_m (рисунок 3.32). З тієї ж причини на вході I_y з'явився підсилювач з коефіцієнтом підсилення 1/0,66. Кут повороту системи координат формує дискретний інтегратор, в схемі управління інтегратором забезпечується скидання, і вихідна напруга інтегратора досягає нуля, коли воно досягає значення 2π .

Крім того, регулятори струму контурів потоку і швидкості виробляють завдання в двофазній і обертальній системах координат на струм статора двигуна. Необхідно перевести завдання в нерухому систему і відправити трифазний сигнал. Це завдання виконується блоком *xy to ABC conversion*. Вищевказані два перетворювача об'єднані в один блок (рисунок 3.33).

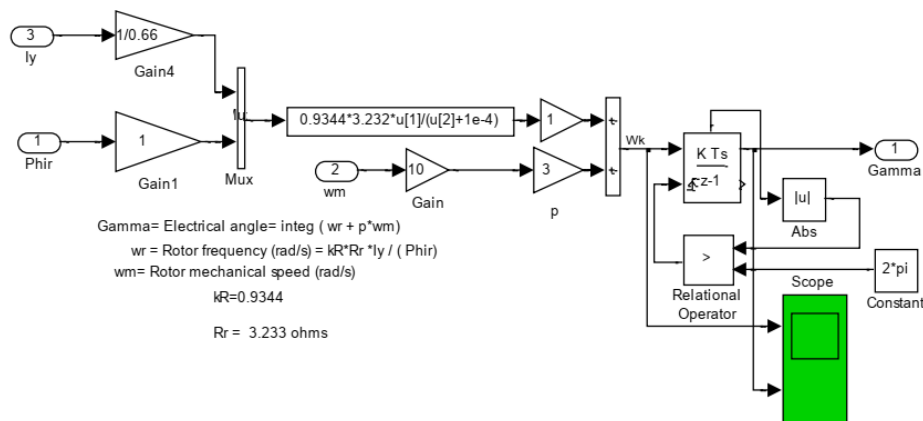


Рисунок 3.32 – Схема моделі блоку *Gamma Calculation*

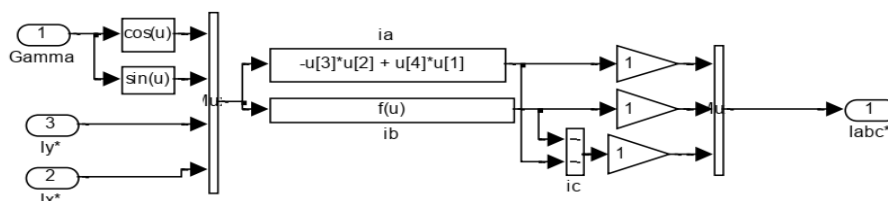


Рисунок 3.33 – Схема моделі блоку *xy to ABC conversion*

Оскільки перетворення здійснюється у машинних одиницях, масштабні коефіцієнти не вводяться. На виході пристрою є трифазне завдання на необхідній частоті струму інвертора.

Трифазний сигнал завдання, необхідної частоти і амплітуди струму статора надходять в блок управління інвертора *Discrete PWM Generator*. Вікно налаштування параметрів блоку управління інвертором показано на рисунку 3.34.

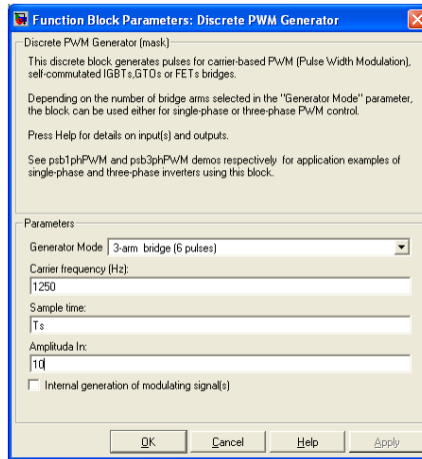


Рисунок 3.34 – Вікно введення параметрів блоку *Discrete PWM Generator*

Відмінною особливістю схеми управління інвертором є завдання несучої частоти 1250 Гц, що становить половину значення частоти перемикання (пульсації). Максимальна амплітуда вхідного сигналу для будь-якої полярності становить 10 В.

Вихідний сигнал блоку *Discrete PWM Generator* надходить на мікропроцесорну шину, забезпечуючи управління шістьма транзисторами інвертора.

Інвертор виконує поставлене завдання: напруга і струм надходять на обмотки двигуна. Регулятор струму керує струмом статора вздовж осі x таким чином, що швидше виконати завдання при обмеженні струму на прийнятному рівні.

Сигнал зворотного зв'язку для фактичного струму статора квантується і затримується після обробки до заздальгідь узгодженого значення і відправляється в блок *ABC to xy conversion*, в якому перетворюється в двофазний і перетворюється в обертову систему координат. Схема моделі блоку показана на рисунку 3.35.

Сигнали зворотного зв'язку, отримані (по своїм осям), квантовані за рівнями і затримані під час обробки, надходять в схему порівняння зі заданими значеннями, встановленими в регуляторах струму.

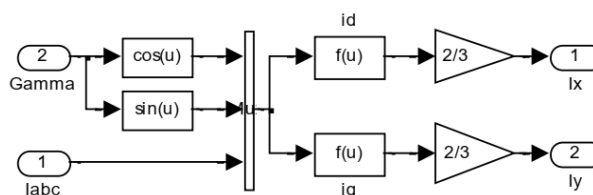


Рисунок 3.35 – Схема моделі блоку *ABC to xy conversion*

Оскільки елемент зворотного зв'язку по магнітному потоку відсутній, схема намагнічування двигуна повинна бути змодельована відповідно до розрахунку схеми заміщення. Модель схеми намагнічування двигуна показана на рисунку 3.36.

Модель розрахунку потоку складається відповідно до наступної формули

$$\psi_{rx} = \frac{1}{1 + T_r s} \cdot T_r k_r R_r \cdot i_{sx}$$

Єдина відмінність полягає в тому, що вона має коефіцієнт зворотного зв'язку для перетворення струму в машині i_{sx} в абсолютне значення. Сигнал, що генерується на виході цього блоку, використовується в якості зворотного зв'язку за потоком в контурі потоку.

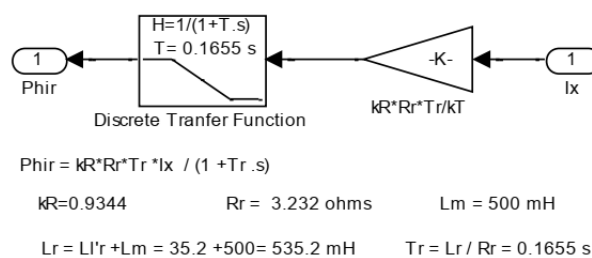


Рисунок 3.36 – Схема моделі ланцюга намагнічування двигуна

Квантування та запізнення, введені в контур зворотного зв'язку, характеризують час, витрачений на обчислення моделі з певною точністю.

Останній блок *Edit Scope*, який включений в схему управління приводом *Vector Control*, дозволяє відкрити головне меню графічних діаграм, створених в процесі моделювання.

У головному меню відображаються всі функції редагування та обробки, які *Simulink* надає для створеної діаграми. Щоб відкрити меню, необхідно відкрити порожній екран *Scope* і запустити моделювання. Результати моделювання та головне меню відображаються на екрані.

Найбільш напруженим режимом роботи приводу є генераторний (рекуперативний). Ємність конденсатора *C1* встановлена рівною 300 мкФ. Програма для управління частотою обертання і активним моментом вводиться в таймери *Timer1* і *Timer Timer*, як показано на рисунку 3.37.

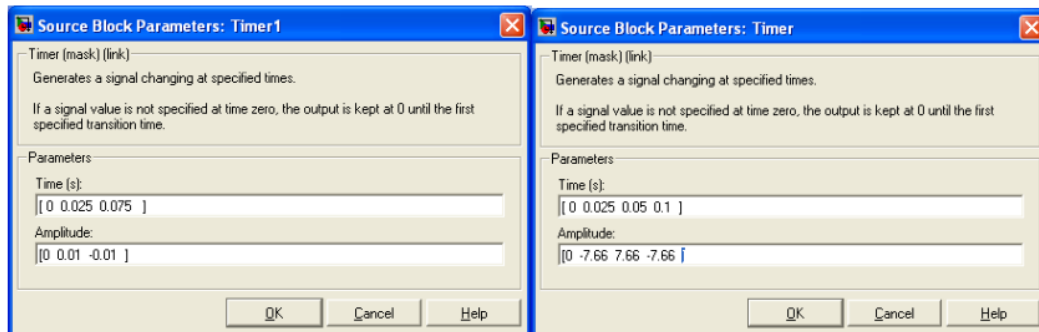


Рисунок 3.37 – Часові програми керування частотою обертання та активним моментом опору

На рисунку 3.38 показані результати моделювання роботи електроприводу з векторним управлінням з повністю необхідним обладнанням.

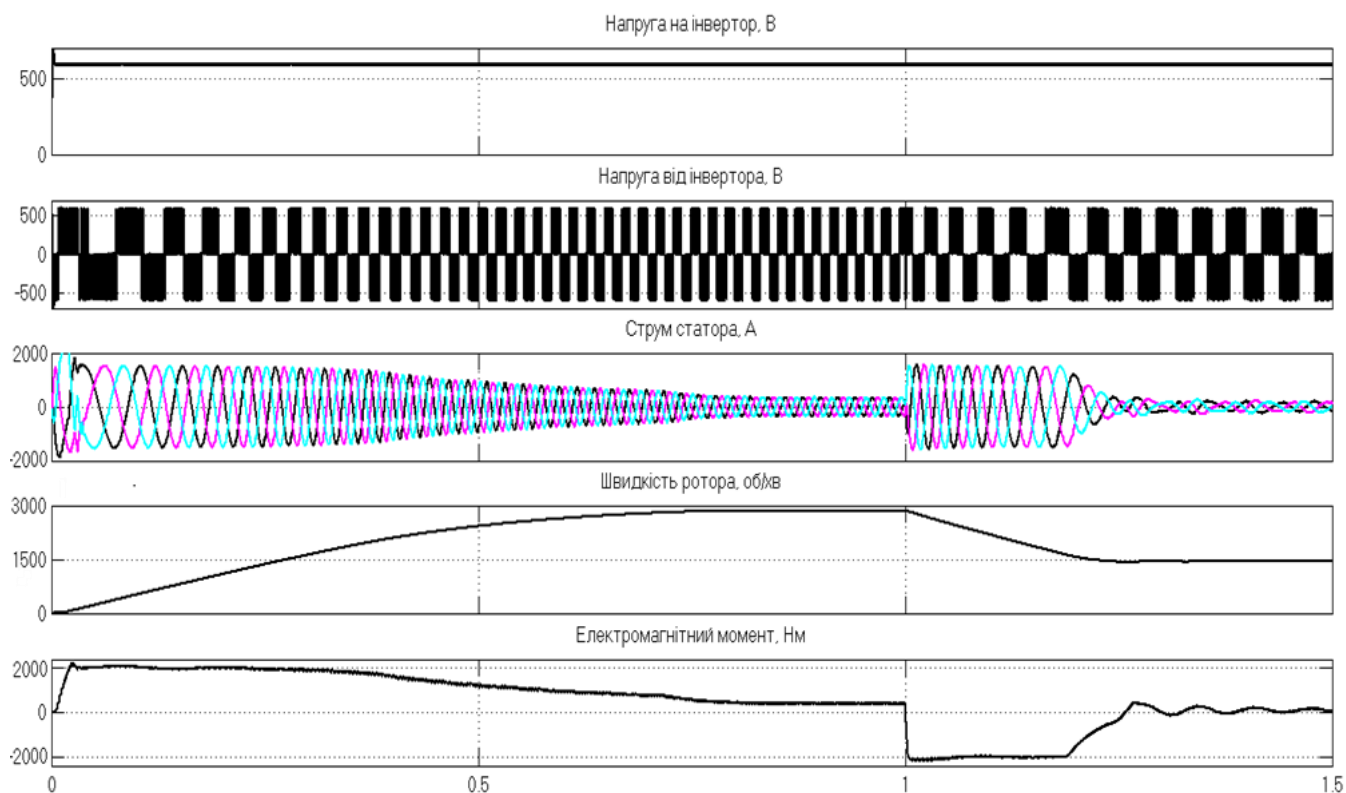


Рисунок 3.38 – Результати моделювання електроприводу з векторним керуванням при роботі на активне навантаження при переході з великої на середню швидкість

Перший висновок, який необхідно зробити, це принципово інший характер реакції приводу на управління та збурення.

Перерегулювання стало чітко вираженим фактом і є наслідком дії активного моменту. Однак завдання щодо частоти обертання виконується досить акуратно, хоча через великі перерегулювання чіткість відпрацювання заданої частоти обертання в цьому масштабі дещо розмита.

І, третє, напруга джерела живлення вибирається у 600 В, за винятком моменту включення приводу до мережі.

Як видно з результатів моделювання, розроблений електропривод впевнено працює у діапазоні 1:1000 з різним характером навантаження, при впливі навантаження номінального значення астатичні властивості системи не порушуються у всьому діапазоні частоти обертання.

4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

4.1 Розрахунок витрат при використанні існуючого електроприводу насосу

Витрати на паливо становлять 60...70% собівартості теплової енергії в промислових котельнях. Основою для зниження витрат палива є підвищення тиску і температури пари та вдосконалення систем автоматизації котельні.

Для підтримання заданого тиску перегрітої пари до 6,5 МПа насоси живильної води потребують великих витрат електроенергії на їх електропривод, оскільки вони повинні створювати тиск води на вході в котел, що перевищує заданий на величину гідравлічних втрат в пароводяному тракті котла. Необхідність модернізації електроприводу насосів живильної води полягає в заміні асинхронного приводу прямого пуску на енергозберігаючий частотно-регульований.

Така заміна може вирішити ряд проблем:

- 1) Зменшення споживання електроенергії;
- 2) зменшення споживання палива;
- 3) Зниження експлуатаційних витрат;
- 4) Збільшення продуктивності насоса (підвищення ККД).

Модернізація електроприводу живильного насосу котла полягає у використанні сучасних частотних перетворювачів, які дозволяють плавно регулювати швидкість електроприводу, покращуючи таким чином продуктивність насосу при зміні навантаження котла.

Річне споживання електроенергії Q_{E1} , кВт-год при роботі насосів з нерегульованим електроприводом:

$$Q_{E1} = F_{Д0} \cdot k_3 \cdot P_{CP1}, \quad (4.1)$$

де k_3 – коефіцієнт завантаження устаткування за часом, $k_3 = 1$;

P_{CP1} – середня потужність, споживана електродвигуном насоса, приймається

$P_{CP1} = 194$ кВт;

$F_{до}$ – дійсний час роботи обладнання, год.

Дійсний час роботи обладнання $F_{до}$, год:

$$F_{до} = F_H \cdot (1 - (a_p + a_R)), \quad (4.2)$$

де a_p – коефіцієнт, що не враховує втрати часу;

a_H – коефіцієнт, що враховує втрати часу на налагодження та регулювання обладнання протягом робочої зміни; $a_H = 0,07$;

F_H – номінальний час роботи h електроприводу.

Номінальний час роботи електроприводу F_H , год

$$F_H = \Phi_{см} \cdot F_{см} \cdot F_{р.д}, \quad (4.3)$$

де $\Phi_{см}$ – тривалість зміни, $\Phi_{см} = 12$ год;

$F_{см}$ – число змін у добі, $F_{см} = 2$;

$F_{р.д.}$ – робочих днів у році, приймається, з урахуванням простою на ремонт

$F_{р.д.} = 335$ днів.

$$F_H = 12 \cdot 335 = 8040 \text{ год,}$$

$$F_{до} = 8040 \cdot (1 - (0 + 0,07)) = 7477 \text{ год,}$$

$$Q_{E1} = 7477 \cdot 1 \cdot 194 = 1465531 \text{ кВт/год.}$$

Річні витрати на електроенергію C_{E1} , грн/год

$$C_{E1} = Q_{E1} \cdot Ц, \quad (4.4)$$

де $Ц$ – ціна 1 кВт електроенергії, приймаємо $Ц = 2,74$ грн.

$$C_{E1} = 119632 \cdot 2,74 = 401555,48 \text{ грн/рік.}$$

Витрати на електроенергію для роботи насоса з некерованим

електроприводом становлять 4015555,48 грн/рік.

4.2 Розрахунок витрат у проектному варіанті (з ПЧ-АД)

Річне споживання електроенергії після модернізації Q_{E2} , кВт-год:

$$Q_{E2} = F_{ДО} \cdot k_3 \cdot P_{CP2}, \quad (4.5)$$

де P_{cp2} – середня потужність, споживана електродвигуном насоса, приймаємо $P_{cp2} = 145$ кВт.

$$Q_{E2} = 7477 \cdot 1 \cdot 145 = 1084194 \text{ кВт/ч}$$

Річні витрати на електроенергію після модернізації C_{E2} , грн/рік

$$C_{E2} = Q_{E2} \cdot \text{Ц}, \quad (4.6)$$

$$C_{E2} = 1084194 \cdot 2,74 = 2970692 \text{ грн/рік.}$$

Розрахуємо інвестиції у виробниче обладнання, якщо будуть встановлені приводи з регульованою швидкістю.

Вартість основних фондів K_{TC} розраховується за формулою

$$K_{TC} = \sum_{i=1}^m N_i \cdot \text{Ц}_i + C_{mp}, \quad (4.7)$$

де m – число типів технічних засобів; $m = 3$;

$N_1 = N_2 = N_3 = 1$ – кількість датчиків АДР, частотних перетворювачів та електродвигунів;

Ц_1 – ціна датчика АДР -0.25.3, грн., $\text{Ц}_1 = 7900$ грн;

Ц_2 – ціна частотного перетворювача, грн., $\text{Ц}_2 = 1042593$ грн;

Ц_3 – ціна електродвигуна, грн., $\text{Ц}_3 = 604184$ грн;

C_{mp} – транспортні витрати, грн., 10 % від вартості технічних засобів.

Транспортні витрати C_{mp} , грн.

$$C_{mc} = 0,1 \cdot (N_1 \cdot Ц_1 + N_2 \cdot Ц_2 + N_3 \cdot Ц_3), \quad (4.8)$$

$$C_{mc} = 0,1 \cdot (1 \cdot 7900 + 1 \cdot 1042593 + 1 \cdot 604184) = 165468 \text{ грн},$$

$$K_{TC} = 1 \cdot 7900 + 1 \cdot 1042593 + 1 \cdot 604184 + 165468 = 1820145 \text{ грн},$$

Витрати на допоміжне обладнання K_{BC} , грн:

$$K_{BC} = 0,1 \cdot K_{TC}, \quad (4.9)$$

$$K_{BC} = 0,1 \cdot 1820145 = 182014 \text{ грн}.$$

Витрати на монтаж і налагодження технічних засобів K_{MH} , грн:

$$K_{MH} = \frac{K_{mc} \cdot 50}{100}, \quad (4.10)$$

$$K_{MH} = \frac{1820145 \cdot 50}{100} = 910072 \text{ грн}. \quad (4.11)$$

Капітальні вкладення K , грн:

$$K = K_{TC} + K_{BC} + K_{MH}, \quad (4.12)$$

$$K = 1820145 + 182014 + 910072 = 2912232 \text{ грн}$$

Витрати на електроенергію при роботі насоса з регульованим електроприводом $C_{E2} = 2970692$ грн/рік.

Економічний ефект:

Наведені витрати Z_i , грн

$$Z_i = C_i + E_i \cdot \Sigma K_i, \quad (4.13)$$

де C_i – річні витрати на підготовку виробництва, грн;

E_i – коефіцієнт економічної ефективності, $E_i = 0,15$;

K_i – капітальні вкладення на підготовку виробництва, грн.

Для існуючих електроприводів насосів без частотних перетворювачів:

$$Z_1 = 327791 + 0,15 \cdot (2912232 - 1042593) = 4296001 \text{ грн}.$$

Для проектного варіанту:

$$Z_2 = 2970692 + 0,15 \cdot 2912232 = 3407526 \text{ грн}$$

Економічний ефект, грн:

$$E = Z_1 - Z_2, \quad (4.14)$$

$$E = 4296001 - 3407526 = 888475 \text{ грн.}$$

Термін окупності $T_{ок}$, років

$$T_{ок} = \frac{\Sigma K}{E}, \quad (4.15)$$

де ΣK – капітальні вкладення, грн.

$$T_{ок} = \frac{2912232}{888475} = 3,3 \text{ рік}$$

Дані економічних розрахунків наведено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Зведені дані економічних розрахунків

Показники	Одиниця виміру	Діюча схема	Проектна схема
Капітальні вкладення	Грн.	–	2912232
Витрати на електричну енергію	Грн/рік	4015556	2970692
Наведені витрати	Грн/рік	4296001	3407526
Економічний ефект	Грн/рік	888475	
Термін окупності	Рік	3,3	

Висновок: Економічний ефект від модернізації електроприводу становить 888475 грн на рік, а термін окупності проекту – 3,3 роки, що відповідає нормативам. Згідно з планом проекту, витрати на електроенергію скоротяться на 35%, а вищевказані витрати – на 26%.

5 РЕЗУЛЬТАТИВНА ЧАСТИНА

5.1 Висновки та рекомендації на основі рішень, прийнятих у цьому дослідженні

У вступі було показано, що наразі до 90 % виробленої електроенергії споживається системами електроприводу, електротехнологічними та освітлювальними установками. Існує значний потенціал енергозбереження в удосконаленні систем електроприводу, на які припадає близько 60 % споживаної електроенергії, а в деяких галузях до 80 %. Узгодження швидкості двигуна зі швидкістю робочого механізму може допомогти заощадити енергію і поліпшити управління процесом.

Описано технологічний процес виробництва перегрітої пари в котлах WTB-V, а також конструкцію і технічні характеристики відцентрового живильного насоса типу HGM 3/10.

Представлено вимоги до модернізації електроприводу живильного насоса. З метою оптимізації режиму подачі живильної води в котел і підвищення якості підтримання тиску води електропривод живильного насоса модернізовано до системи автоматичного керування з використанням ПЧ для регулювання обертів живильного насоса до $n_{\text{нас}} = 1500 \dots 2986$ об/хв з точністю підтримання обертів $\Delta n_{\text{нас}} = 5 \%$.

Були проведені розрахунки для визначення потужності приводу і обрано трифазний асинхронний двигун з короткозамкненим ротором серії SIEMENS 1LE15033AA034AB4-Z потужністю 250 кВт і частотою обертання 2986 об/хв та перетворювач частоти VACON 0100-3L-0590-5-FLOW+IP00 для приводу живильних насосів.

Розділ моделювання електроприводу включає постановку задачі моделювання електроприводу, розрахунок механічних властивостей і параметрів схеми вмикання двигуна живильного насоса, а також схему моделювання та

результати роботи електроприводу з ПЧ-АД з скалярним та векторним законами регулювання.

При пуску електроприводу безпосередньо асинхронним двигуном з урахуванням моменту інерції насоса час набору швидкості і моменту становить 1,4 с, пусковий електромагнітний момент досягає приблизно 4000 Н·м, що майже в п'ять разів перевищує номінальне значення, а пусковий струм статора досягає 3300 А, що майже в сім разів перевищує номінальне значення.

При пуску приводу з ПЧ час набору швидкості і моменту для прямого пуску приводу становив 1,5 с. Пусковий електромагнітний момент зменшився до 1700 Н·м, що майже втричі перевищує номінальне значення, а пусковий струм статора зменшився до 2500 А, що майже в п'ять разів перевищує номінальне значення. Перехідні процеси підвищення і зниження частоти на 15 Гц мали плавний характер і тривали біля 0,5 с. Механічні та гідравлічні удари електропривода при пуску живильного насоса з ПЧ менші, ніж при прямому пуску.

Розімкнуті схеми керування електроприводом живильного насоса з вибраним перетворювачем частоти та трифазним асинхронним двигуном забезпечують необхідну точність до 5% в робочому діапазоні регулювання обертів живильного насоса при керуванні двигуном за скалярним законом та 1...2 % за векторним законом.

Наведено розрахунки економічної ефективності модернізації електроприводу живильного насоса. Річний економічний ефект від модернізації електроприводу живильного насоса становить 888475 грн./рік, що відповідає терміну окупності капітальних витрат $T_{ок} = 3,3$ роки.

Таким чином, модернізація електроприводів живильних насосів парових котлів WTB-V є технічно та економічно доцільною і може бути рекомендована для впровадження в котельнях підприємств харчової промисловості України.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи магістра за спеціальністю 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» галузі знань 14 – «Електрична інженерія» / Укладачі: В.Ф. Бабіч, А.А. Галіулін, Є.П. Штепа – Одеса: ОНАХТ, 2021. – 55 с.
2. Правила улаштування електроустановок: – К.: Міненерговугілля України, 2017. – 617 с.
3. Парові котли VYNCLE. Технічна інформація по котлу HGM 3/10.
4. Перетворювач частоти VACON 0100-3L-0590-5-FLOW. – URL: <https://www.vacondrives.com>. Дата звертання 25.11.2023.
5. Электротехнический справочник: В 3 т. – М.: Энергоатомиздат. 1986. – Т.2.: Электротехнические изделия и устройства / Под. общ. ред. профессоров МЭИ (гл. ред. И.Н. Орлов) и др. 1986. – 712 с.
6. Кацман М.М. Электрические машины. – М.: Высшая школа, 1991.
7. Герман-Галкин С.Г. Проектирование механотронных систем на ПК. – СПб.: Корона, 2008. – 346 с.
8. Дьяков В., Круглов В. MATLAB. Анализ, идентификация и моделирование систем. Специальный справочник. – СПб.: Питер, 2002. – 286 с.
9. Терехин В.Б. Моделирование систем электропривода в Simulink (Matlab 7.0.1): учебное пособие / В.Б. Терехин. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 320 с.
10. Удут Л.С. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов. Ч. 8. Асинхронный частотно-регулируемый электропривод: учебное пособие / Л.С. Удут, О.П. Мальцева, Н.В. Кояин. – Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2009. – 354 с.