

Міністерство освіти і науки України
КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Електротехнічний факультет

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА ДО КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

першого (бакалаврського) рівня вищої освіти
спеціальності 141

«ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА»

НА ТЕМУ:

«ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНЕ ОБЛАДНАННЯ НАСОСНОЇ УСТАНОВКИ
В УМОВАХ КОТЕЛЬНОЇ

Виконав: здобувач(ка) групи ЕЕМ-22-2 _____ Юрій МАЛИШ

Керівник кваліфікаційної роботи _____ к.т.н., доц. Олександр ІЛЬЧЕНКО

Нормоконтролер _____ к.т.н., доц. Олександр ІЛЬЧЕНКО

Декан ЕТФ _____ к.т.н., доц. Владислав ФЕДОТОВ

Гарант освітньої програми _____ к.т.н. Ігор ПЕРЕСУНЬКО

Кривий Ріг

2026 р.

КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет: Електротехнічний

Кафедра: Електромеханіки

Освітньо-професійна програма першого
(бакалаврського) рівня вищої освіти: «бакалавр»

Спеціальність: 141 «Електроенергетика,
електромеханіка та електромеханіка»
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Гарант освітньої програми

_____ к.т.н. Ігор Пересунько

« _____ » _____ 20____ р.

З А В Д А Н Н Я НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

_____ Малиш Юрій Михайлович _____

(прізвищі ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: _____ Електромеханічне обладнання насосної установки в умовах котельної _____

керівник проєкту (роботи) _____ Ільченко О.В. _____

затверджена наказом по КНУ від « 18 » травня 2026 р. № 248с

2. Строк подання студентом проєкту (роботи) « 06 » червня 2026 р.

3. Вихідні дані до проєкту (роботи)

_____ Насос котельної Wilo IL 80/170: продуктивність – 160-180 м³/год; напір – 22 м;
напірна характеристика насоса; потужність двигуна – 22,0 кВт; частота обертання – 2980
об/хв; напруга – 380 В _____

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1.1 Принцип роботи технологічної схеми котельної установки. 1.2 Роль насосів у роботі котельної установки. 1.3 Контрольно-вимірювальні прилади та засоби автоматизації насосної установки. 1.4 Вибір оптимального насоса для ТЕЦ. 1.5 Будова та технічні характеристики насоса Wilo CronoLine IL-E 80/170-22/2. 1.6 Розрахунок потужності та вибір електродвигуна. 1.7 Основні експлуатаційні вимоги до насосів та електроприводів. 1.8 Вибір перетворювача та елементів силової частини. 2.1 Схема заміщення та розрахунок механічних характеристик електропривода насоса Wilo IL 80/170. 2.2 Моделювання роботи насосної установки в середовищі MATLAB/Simulink. 3.1 Типові схеми електропостачання котельних та вибір трансформаторів. 3.2 Силова апаратура котельні (РУ-6 кВ). 3.3 Розрахунок струмів короткого замикання в мережі 0,4 кВ. 3.4 Розрахунок кабельної мережі 0,4 кВ. 3.5 Комплекс електричних захистів двигуна Wilo. Загальні висновки. _____

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

_____ презентація _____

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
1	Ільченко О.В., доцент		
2	Ільченко О.В., доцент		
3	Ільченко О.В., доцент		

7. Календарний план

№ з/п	Етапи роботи	Термін виконання	Примітка
1.1	Принцип роботи технологічної схеми котельної установки	18.05-19.05	Виконано
1.2, 1.3	Роль насосів у роботі котельної установки. Контрольно-вимірювальні прилади та засоби автоматизації насосної установки.	20.05-22.05	Виконано
1.4, 1.5	Вибір оптимального насоса для ТЕЦ. Будова та технічні характеристики насоса Wilo CronoLine IL-E 80/170-22/2.	23.05-24.05	Виконано
1.6	Розрахунок потужності та вибір електродвигуна	25.05	Виконано
1.7	Основні експлуатаційні вимоги до насосів та електроприводів	25.05	Виконано
1.8	Вибір перетворювача та елементів силової частини	25.05-26.05	Виконано
2.1	Схема заміщення та розрахунок механічних характеристик електропривода насоса Wilo	27.05	Виконано
2.2	Моделювання роботи насосної установки в середовищі MATLAB/Simulink	28.05-29.05	Виконано
3.1	Типові схеми електропостачання котельних та вибір трансформаторів	30.05	Виконано
3.2	Силова апаратура котельні (РУ-6 кВ).	31.05	Виконано
3.3	Розрахунок струмів короткого замикання в мережі 0,4 кВ	01.06	Виконано
3.4	Розрахунок кабельної мережі 0,4 кВ.	02.06	Виконано
3.5	Комплекс електричних захистів двигуна Wilo	04.06	Виконано
	Загальні висновки	05.06	Виконано

Дата видачі завдання: «18» травня 2026 р.

Студент _____ Малиш Ю.М.
(підпис) (П.І.Б.)

Керівник роботи (проекту) _____ Ільченко О.В.
(підпис) (П.І.Б.)

РЕФЕРАТ

Тема роботи: «Електромеханічне обладнання насосної установки в умовах котельної» складається з: ____ стор., ____ рис., ____ табл, ____ літературних джерел

Робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків та списку використаних джерел.

У першому розділі виконано аналіз технологічної схеми котельної установки. Проведено вибір насосного агрегату Wilo IL 80/170-22/2 та асинхронного електродвигуна класу енергоефективності IE3. Обґрунтовано застосування системи регулювання продуктивності на основі перетворювача частоти ABB ACS580, що забезпечує плавний пуск, зниження пускових струмів та підвищення енергоефективності привода.

У другому розділі виконано розрахунок параметрів схеми заміщення асинхронного двигуна та побудовано його статичні характеристики. Досліджено механічні, електромеханічні та енергетичні характеристики електропривода як у номінальному режимі, так і при частотному керуванні. Розроблено математичну модель електропривода насосної установки в середовищі MATLAB/Simulink та проаналізовано перехідні процеси при прямому пуску і частотному регулюванні швидкості.

У третьому розділі виконано проектування системи електропостачання котельної установки. Проведено вибір силових трансформаторів, трансформаторів власних потреб та керування, комутаційної апаратури і кабельних ліній. Виконано розрахунок струмів короткого замикання, аналіз нормальних та аварійних режимів роботи мережі, а також обґрунтовано вибір захистів електрообладнання та електродвигунів.

КОТЕЛЬНА УСТАНОВКА, НАСОС, АСИНХРОННИЙ ДВИГУН,
ПЕРЕТВОРЮВАЧ ЧАСТОТИ, ЕЛЕКТРОПРИВОД, MATLAB/SIMULINK,
ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

					КНУ.РБ.141.26.248с.10.Р					
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						
Розроб.		Малиш Ю.М.			Реферат			Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.		Ільченко О.В.								
Реценз.								ЕМ гр. ЕЕМ-22-2		
Н. Контр.		Ільченко О.В.								
Затверд.		Пересунько І.І.								

ЗМІСТ

С.

Вступ.....	.....
Розділ 1 Характеристика електромеханічного об'єкта та його електрообладнання.....	.....
1.1 Принцип роботи технологічної схеми котельної установки .....	.....
1.2 Роль насосів у роботі котельної установки.....	.....
1.3 Контрольно-вимірювальні прилади та засоби автоматизації насосної установки.....	.....
1.3.1 Засоби контролю технологічних параметрів .....	.....
1.3.2 Прилад автоматичного керування WILO-COR-SYSTEM.....	.....
1.4 Вибір оптимального насоса для ТЕЦ .....	.....
1.5 Будова та технічні характеристики насоса Wilo CronoLine IL-E 80/170-22/2.....	.....
1.6 Розрахунок потужності та вибір електродвигуна.....	.....
1.7 Основні експлуатаційні вимоги до насосів та електроприводів.....	.....
1.8 Вибір перетворювача та елементів силової частини.....	.....
1.9 Висновки за розділом 1.....	.....
Розділ 2 Аналіз системи електропривода технологічного механізму.....	.....
2.1 Схема заміщення та розрахунок механічних характеристик електропривода насоса Wilo IL 80/170.....	.....
2.1.1 Параметри схеми заміщення двигуна Wilo.....	.....
2.1.2 Розрахунок та аналіз характеристик електродвигуна насосної установки.....	.....
2.1.3 Штучні характеристики електропривода насосної установки з частотним регулюванням .....	.....
2.2 Моделювання роботи насосної установки в середовищі MATLAB/Simulink.....	.....

					КНУ.РБ.141.26.248с.10.3						
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.		Малиш Ю.М.			Зміст			Літ.		Арк.	Аркушів
Перевір.		Ільченко О.В.									
Реценз.											
Н. Контр.		Ільченко О.В.						ЕМ гр. ЕЕМ-22-2			
Затверд.		Пересуňко І.І.									

2.3 Висновки за розділом 2.....	....
Розділ 3 Електропостачання та електроспоживання.....	....
3.1 Типові схеми електропостачання котельних та вибір трансформаторів.....	....
3.2 Силова апаратура котельні (РУ-6 кВ).....	....
3.2.1 Комірка КРУ-6 кВ.....	....
3.2.2 Вимикачі високої напруги.....	....
3.2.3 Заземлювачі.....	....
3.2.4 Реактори.....	....
3.2.5 Вибір шин струмоведучих 6 кВ .....	....
3.3 Розрахунок струмів короткого замикання в мережі 0,4 кВ.....	....
3.4 Розрахунок кабельної мережі 0,4 кВ.....	....
3.5 Комплекс електричних захистів двигуна Wilo.....	....
3.6 Висновки за розділом 3.....	....
Загальні висновки.....	....
Список використаних джерел.....	....

ВСТУП

Важливим напрямом розвитку сучасної теплоенергетики є підвищення енергоефективності технологічного обладнання та впровадження енергозберігаючих технологій. Значна частина електричної енергії на об'єктах теплопостачання споживається електромеханічними системами, серед яких особливе місце займають насосні установки. Зростання вартості енергоресурсів, необхідність зменшення експлуатаційних витрат, а також підвищення вимог до надійності роботи інженерних систем обумовлюють актуальність модернізації насосного обладнання котелень та впровадження сучасних систем автоматизованого керування електроприводами.

Забезпечення безперебійної роботи систем теплопостачання є одним із ключових чинників підтримання належних умов життєдіяльності населення та функціонування промисловості. При цьому значна частина обладнання котелень була введена в експлуатацію багато років тому і сьогодні характеризується високим ступенем фізичного та морального зношення. Особливо це стосується насосних установок, які є невід'ємною складовою технологічних процесів виробництва, транспортування та розподілу теплової енергії.

Насосні установки котелень виконують важливі функції з подачі води до котлів, циркуляції теплоносія в теплових мережах, підживлення систем теплопостачання та забезпечення необхідних гідравлічних режимів роботи обладнання. Надійність функціонування насосних агрегатів безпосередньо впливає на стабільність роботи всієї системи теплопостачання. Водночас саме насосні установки належать до найбільших споживачів електричної енергії на об'єктах теплоенергетики.

					КНУ.РБ.141.26.248с.10.В		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.		Малиш Ю.М.			Вступ	Літ.	Арк.
Перевір.		Ільченко О.В.					Аркушів
Реценз.							
Н. Контр.		Ільченко О.В.				ЕМ гр. ЕЕМ-22-2	
Затверд.		Пересунько І.І.					

На більшості котелень насосні агрегати приводяться в дію асинхронними електродвигунами з короткозамкненим ротором, які характеризуються простотою конструкції, високою надійністю та тривалим терміном експлуатації. Проте значна частина таких електроприводів працює без регулювання швидкості обертання, а зміна продуктивності насосів здійснюється шляхом дроселювання потоку засувками або клапанами. Такий спосіб регулювання є технічно простим, однак супроводжується значними втратами електричної енергії та зниженням ефективності роботи насосного обладнання.

Відомо, що електродвигуни змінного струму споживають основну частину електроенергії промислових підприємств і комунальних об'єктів. Значна частка цього споживання припадає саме на насосні установки. Тому одним із найбільш перспективних напрямів підвищення енергоефективності котелень є впровадження частотно-регульованих електроприводів.

Сучасні перетворювачі частоти дозволяють здійснювати плавне регулювання швидкості обертання асинхронних двигунів залежно від фактичних потреб технологічного процесу. Завдяки цьому забезпечується автоматичне підтримання необхідного тиску та витрати теплоносія, зниження пускових струмів, покращення умов експлуатації обладнання та зменшення споживання електричної енергії.

Застосування частотно-регульованого електроприводу в насосних установках дозволяє отримати суттєвий енергозберігаючий ефект. Залежно від режиму роботи економія електроенергії може досягати 30–50 % порівняно з традиційними нерегульованими системами. Крім того, плавний пуск і зупинка насосів сприяють зменшенню гідравлічних ударів, механічних навантажень на обладнання та підвищенню ресурсу експлуатації насосів, електродвигунів і трубопроводних мереж.

Додатковою перевагою сучасних систем керування є можливість автоматизації технологічних процесів. Використання датчиків тиску, витрати та температури у поєднанні з частотними перетворювачами дозволяє

					КНУ.РБ.141.26.248с.10.В	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

реалізувати автоматичне підтримання параметрів роботи системи, дистанційний моніторинг стану обладнання, оперативну діагностику несправностей та захист електроприводів від аварійних режимів роботи.

Таким чином, модернізація насосних установок котельень на основі застосування частотно-регульованих електроприводів є одним із найбільш ефективних напрямів підвищення енергоефективності та надійності систем теплопостачання. Впровадження сучасних засобів автоматизації дозволяє знизити енергоспоживання, підвищити якість регулювання технологічних процесів, збільшити ресурс обладнання та забезпечити стабільне функціонування об'єктів теплоенергетики в сучасних умовах експлуатації.

Об'єкт дослідження – електромеханічне обладнання насосної установки котельної та система її електропостачання і керування.

Предмет дослідження – режими роботи електропривода насосної установки, параметри асинхронного двигуна та ефективність системи ПЧ-АД у складі котельної установки.

Мета роботи – підвищення енергоефективності та надійності роботи насосної установки котельної шляхом обґрунтування та проектування сучасного електропривода з частотним керуванням і оптимізації системи електропостачання.

Методи дослідження. У роботі використано методи теорії електричних машин, комплексного (символьного) аналізу кіл змінного струму, математичного моделювання, а також моделювання в середовищі MATLAB/Simulink.

Завдання дослідження:

1. Проаналізувати технологічну схему котельної установки та роботу насосного обладнання.
2. Виконати вибір насосного агрегату та електродвигуна відповідно до технічних вимог.
3. Обґрунтувати вибір системи електропривода «ПЧ–АД» для регулювання швидкості насосної установки.

					КНУ.РБ.141.26.248с.10.В	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

4. Розрахувати параметри схеми заміщення асинхронного двигуна.
5. Дослідити статичні та динамічні характеристики електропривода.
6. Розробити математичну модель електропривода в середовищі MATLAB/Simulink та проаналізувати перехідні процеси.
7. Виконати розрахунок системи електропостачання котельної установки.
8. Провести вибір електрообладнання та захистів на основі розрахунків режимів роботи та коротких замикань. Виконати математичне моделювання електропривода насосної установки у середовищі MATLAB Simulink та проаналізувати перехідні процеси під час пуску і регулювання швидкості.

					КНУ.РБ.141.26.248с.10.В	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1

ХАРАКТЕРИСТИКА ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО ОБ’ЄКТА ТА
ЙОГО ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ

					КНУ.РБ.141.26.248с.10.Р1							
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата								
Розроб.		Малиш Ю.М.			Розділ1				Літ.		Арк.	Аркушів
Перевір.		Ільченко О.В.										
Реценз.									ЕМ гр. ЕЕМ-22-2			
Н. Контр.		Ільченко О.В.										
Затверд.		Пересунько І.І.										

1.1 Принцип роботи технологічної схеми котельної установки

Технологічна схема котельної установки показана на рис. 1.1.

Технологічна схема котельної установки призначена для виробництва теплової енергії шляхом нагрівання води або отримання пари та подальшої передачі її споживачам через теплову мережу.

Паливо із паливного бункера (1) подається до пальникового пристрою (2), де відбувається його спалювання. Теплова енергія продуктів згоряння передається теплоносію в котлі (3). У результаті вода нагрівається до заданої температури або перетворюється на пару залежно від типу котельної установки.

Для забезпечення безпечної експлуатації котел обладнаний групою безпеки (4), до складу якої входять манометр, запобіжний клапан та інші контрольні прилади. Вони забезпечують контроль тиску та захист обладнання від аварійних режимів роботи.

Живильна вода надходить до деаератора (5), де з неї видаляються розчинені гази, насамперед кисень і вуглекислий газ, що запобігає корозії трубопроводів і обладнання. Після деаерації вода за допомогою живильного насоса (6) подається до котла для компенсації втрат теплоносія та підтримання необхідного рівня води.

Нагрітий теплоносій через подаючий трубопровід надходить до споживачів теплової енергії. Циркуляцію теплоносія в системі забезпечує циркуляційний насос подачі (7), який створює необхідний тиск для транспортування гарячої води по тепловій мережі.

Після передачі теплоти споживачам охолоджений теплоносій повертається до котельні через зворотний трубопровід. Циркуляційний насос зворотної магістралі (8) забезпечує повернення теплоносія до котла та підтримання необхідного режиму циркуляції.

Для компенсації витоків і втрат води в системі використовується підживлювальний насос (9), який подає підготовлену воду із системи водопідготовки (10). У системі водопідготовки здійснюється очищення,

					КНУ.РБ.141.26.248с.10.Р1	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ТЕХНОЛОГІЧНА СХЕМА КОТЕЛЬНОЇ УСТАНОВКИ

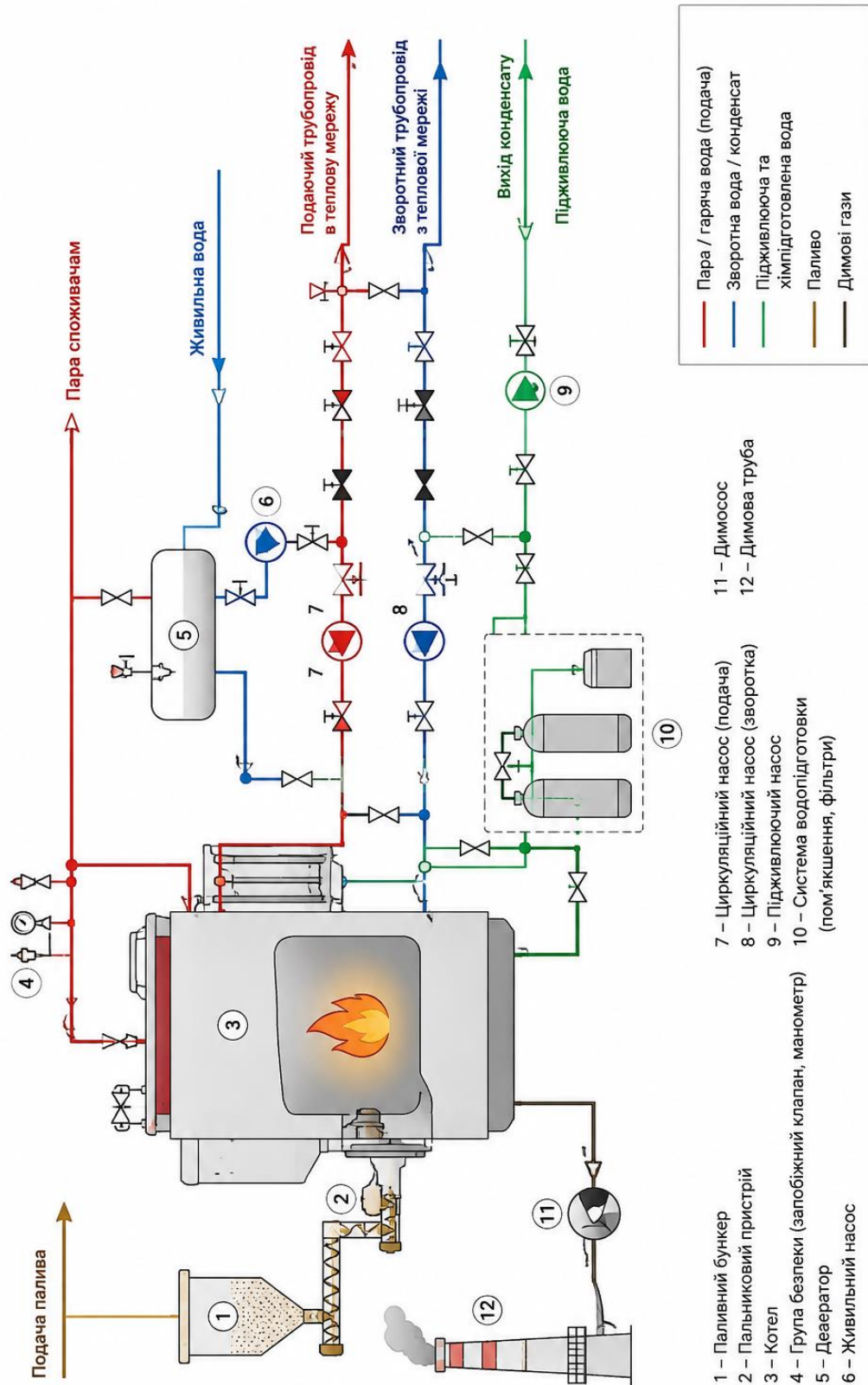


Рисунок 1.1 – Технологічна схема котельної установки

пом'якшення та коригування хімічного складу води, що дозволяє зменшити утворення накипу та підвищити довговічність обладнання.

Продукти згоряння палива після проходження через теплообмінні поверхні котла видаляються за допомогою димососа (11) та відводяться в атмосферу через димову трубу (12). Димосос забезпечує необхідне розрідження в топці та стабільність процесу горіння.

Таким чином, робота котельної установки ґрунтується на безперервній циркуляції теплоносія між котлом і споживачами, автоматичному підтриманні необхідних параметрів температури та тиску, а також забезпеченні безпечної та енергоефективної роботи всіх елементів системи.

1.2 Роль насосів у роботі котельної установки

Насосне обладнання є одним із найважливіших елементів котельної установки, оскільки забезпечує безперервний рух теплоносія, підтримання необхідних технологічних параметрів та стабільність роботи всієї системи тепlopостачання. Залежно від призначення в котельних установках застосовуються основні насосні установки, які зведені в табл. 1.1.

Живильний насос призначений для подачі підготовленої води з деаератора до котла. Його основним завданням є підтримання необхідного рівня води в котлі та компенсація втрат теплоносія, що виникають у процесі експлуатації.

Живильний насос працює в умовах підвищеного тиску та повинен забезпечувати надійне подавання води незалежно від режиму роботи котла. Від його роботи залежить безпечна експлуатація котельного агрегату, оскільки недостатня подача води може призвести до перегрівання поверхонь нагріву та аварійної зупинки обладнання.

Циркуляційний насос є основним насосним агрегатом системи тепlopостачання. Його функцією є забезпечення безперервної циркуляції теплоносія між котлом та споживачами теплової енергії.

					КНУ.РБ.141.26.248с.10.Р1	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 1.1 - Основні насосні установки котельні

Тип насосної установки	Призначення	Подача, м³/год	Напір, м	Потужність двигуна, кВт
Живильний насос	Подача води до котла	20–500	50–300	7,5–315
Мережевий насос	Циркуляція теплоносія в тепломережі	100–2000	20–100	15–400
Підживлювальний насос	Компенсація втрат води	2–50	20–80	0,75–15
Конденсатний насос	Повернення конденсату	5–200	10–80	1,5–55
Насос сирі води	Подача води на водопідготовку	10–300	10–60	2,2–75
Дренажний насос	Відведення дренажних вод	5–100	5–40	0,75–22

Насос створює необхідний перепад тиску для подолання гідравлічних опорів трубопроводів, арматури та теплообмінного обладнання. Саме циркуляційний насос забезпечує транспортування нагрітої води до споживачів та повернення охолодженого теплоносія до котла для повторного нагрівання.

Оскільки витрата теплоносія змінюється залежно від теплового навантаження, циркуляційні насоси є найбільш доцільними об'єктами для впровадження частотно-регульованого електропривода. Регулювання швидкості обертання насоса дозволяє автоматично підтримувати необхідний тиск у тепловій мережі та значно зменшувати споживання електричної енергії.

					КНУ.РБ.141.26.248с.10.Р1	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Підживлювальний насос призначений для компенсації втрат теплоносія в системі теплопостачання, які виникають унаслідок витоків, ремонтних робіт, спрацювання запобіжної арматури або випаровування води.

Насос подає очищену та хімічно підготовлену воду із системи водопідготовки до теплової мережі або деаератора. Робота підживлювального насоса дозволяє підтримувати необхідний об'єм теплоносія та стабільний тиск у системі.

Зазвичай підживлювальні насоси працюють періодично або в автоматичному режимі за сигналами датчиків тиску. Їх застосування забезпечує надійну роботу теплової мережі та запобігає аварійним режимам, пов'язаним із нестачею теплоносія.

Таким чином, живильні, циркуляційні та підживлювальні насоси виконують різні, але взаємопов'язані функції в роботі котельної установки. Від надійності та ефективності їх роботи залежить безпечне функціонування котельного обладнання, якість теплопостачання споживачів та рівень енергоспоживання всієї системи.

На котельнях встановлені та працюють насоси:

- насоси сирої води: Д 2000-100, 22 НДС, 32Д19;
- дренажні насоси: ЦМК 16/27, К 20/30;
- насоси хімічно очищеної води: ЦНС 38-220, ЦНС 60-198.

1.2 Контрольно-вимірювальні прилади та засоби автоматизації насосної установки

Для забезпечення надійної, безпечної та енергоефективної роботи насосної установки застосовується комплекс контрольно-вимірювальних приладів і засобів автоматизації з використанням частотно-регульованого електропривода. Основою системи керування є перетворювач частоти асинхронного двигуна (ПЧ-АД), який забезпечує плавне регулювання продуктивності насосного обладнання шляхом зміни частоти обертання електродвигуна.

					КНУ.РБ.141.26.248с.10.Р1	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Основними завданнями системи автоматичного керування є контроль технологічних параметрів робочого середовища, підтримання заданих режимів тиску/рівня/витрати, автоматичне регулювання продуктивності насосів, а також захист обладнання від аварійних режимів роботи.

До складу системи автоматизації входять: датчики технологічних параметрів (рівня, тиску, витрати), перетворювач частоти, контролер або регулятор, виконавчі елементи, а також апаратура захисту та сигналізації.

1.2.1 Засоби контролю технологічних параметрів

Контроль технологічних параметрів насосної установки здійснюється за допомогою датчиків рівня, тиску та витрати, які забезпечують безперервне або дискретне вимірювання відповідних величин і передають інформацію до системи керування.

Основною функцією датчиків є перетворення фізичних параметрів робочого середовища в електричний сигнал, який використовується для формування керуючого впливу на перетворювач частоти.

У насосних установках можуть застосовуватися: датчики рівня; датчики тиску; витратоміри.

Датчики рівня забезпечують контроль заповнення резервуарів і захист від «сухого ходу». Датчики тиску використовуються для підтримання стабільного тиску в трубопроводній системі. Витратоміри дозволяють контролювати продуктивність установки та оптимізувати режим її роботи.

Залежно від призначення формуються сигнали мінімального, робочого та максимального рівнів (або граничних значень тиску/витрати), які використовуються системою керування для зміни частоти обертання насосного агрегату.

1.2.2 Прилад автоматичного керування WILO-COR-SYSTEM

Прилад автоматичного керування WILO-COR-SYSTEM призначений для автоматизованого керування насосними агрегатами станцій підвищення тиску.

					КНУ.РБ.141.26.248с.10.Р1	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Він забезпечує підтримання заданого тиску в системі, плавне регулювання продуктивності за допомогою частотного перетворювача, автоматичне чергування та резервування насосів, а також реалізує функції захисту від сухого ходу, перевантаження й аварійних режимів роботи. Керування здійснюється мікропроцесорним контролером із графічним сенсорним дисплеєм та можливістю інтеграції до систем диспетчеризації.

Технічні характеристики наведені в табл. 1.2, зовнішній вид – на рис. 1.2.

Таблиця 1.2 - Технічні характеристики приладу автоматичного керування WILO-COR-SYSTEM (Comfort Controller CC-FC)

Параметр	Значення
Тип пристрою	Мікропроцесорна шафа автоматичного керування насосною станцією
Кількість керованих насосів	1–6 шт.
Спосіб регулювання	Частотне регулювання базового насоса та каскадне підключення інших насосів
Напруга живлення	3×400 В, 50/60 Гц
Діапазон робочої температури рідини	+3...+50 °С
Тип датчика тиску	Аналоговий, 4–20 мА
Зовнішнє завдання уставки	0/4–20 мА
Автоматичне чергування насосів	Передбачено
Автоматичний тестовий пуск насосів	Передбачено
Режими роботи	Ручний / Вимкнено / Автоматичний
Функції захисту	Захист від сухого ходу, перевантаження, відмови датчика, аварійне перемикання на резервний насос
Аналогові та цифрові входи/виходи	Вбудовані
Вартість	660000 грн



Рисунок 1.2 - Прилад автоматичного керування WILO-COR-SYSTEM (Comfort Controller CC-FC) для керування насосним агрегатом потужністю 22 кВт

1.3 Вибір оптимального насоса для ТЕЦ

Для ТЕЦ найбільш характерними є серії: Wilo Atmos GIGA, Wilo Helix, Wilo CronoBloc BL, Wilo CronoLine IL, що комплектуються асинхронними електродвигунами потужністю 20–30 кВт. Дані насоси застосовуються у системах мережевого та циркуляційного водопостачання, підживлення котлоагрегатів та транспортування теплоносія. Вони забезпечують стабільну роботу при високих витратах (до сотень м³/год) і робочих температурах до 140 °С, що відповідає умовам експлуатації обладнання ТЕЦ.

У табл. 1.3 надані порівняльні параметри насосів Wilo для ТЕЦ з електродвигунами близько 20–30 кВт та основними гідравлічними параметрами (Q, H, P, DN).

Вони забезпечують роботу в широкому діапазоні подачі та напору, підтримують високі температури теплоносія та можуть працювати в умовах

					КНУ.РБ.141.26.248с.10.Р1	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

мережевих і циркуляційних систем. Конструктивно всі насоси сумісні з частотним регулюванням (ПЧ-АД), що дозволяє ефективно змінювати продуктивність без дроселювання та підвищує енергоефективність установки.

Таблиця 1.3 – Технічні параметри насосів Wilo для ТЕЦ

Параметр	Wilo Atmos GIGA-NHT 80/200-30/2-S7	Wilo Atmos GIGA-N 80/200-30/2	Wilo Atmos GIGA-I 80/190- 30/2-S1	Wilo Atmos GIGA-NHT 80/200-30/2-S2
Потужність двигуна P, кВт	30	30	30	30
Подача Q, м³/год	50-400	50-400	50-350	50-450
Напір H, м	10-90	10-90	10-85	10-95
Номінальний тиск, bar	25	16	16	25
Патрубок (DN)	DN 100 / DN 80	DN 100 / DN 80	DN 80 / DN 80	DN 100 / DN 80
Частота обертання, об/хв	2960	2960	2900	2960
Температура робоча, °C	до 200	до 140	до 140	до 350
Тип насоса	горизонтальний відцентровий			

1. Вихідні умови вибору

Розглянемо два типові варіанти насосних агрегатів серії Wilo:

- насос з електродвигуном $P_2 = 22$ кВт (середній клас продуктивності);
- насос з електродвигуном $P_2 = 30$ кВт (підвищеної продуктивності).

Обидва варіанти працюють у системах мережевого та циркуляційного водопостачання та можуть бути оснащені частотно-регульованим електроприводом (ПЧ-АД).

2. Технічне порівняння варіантів

Характеристики насосних агрегатів зведені до табл. 1.4.

					КНУ.РБ.141.26.248с.10.Р1	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 1.4 – Технічні параметри двох насосних агрегатів

Параметри	22 кВт	30 кВт
Подача Q	середня	висока
Напір H, м	60-70	80-95
Маса агрегату, кг	250	500
DN патрубків, мм	65-80	150
Енергоспоживання	нижче	вище
Резерв по продуктивності	обмежений	значний

3. Енергетичний аналіз (з ПЧ-АД)

При використанні частотного регулювання споживана потужність змінюється за кубічним законом: $P \sim n^3$, що при навіть незначному зниженні частоти обертання відбувається значна економія енергії.

Тому насос з приводним двигуном 30 кВт має запас продуктивності, але часто працює в недовантаженому режимі, а насос з приводним двигуном 22 кВт працює ближче до номінальної точки, що забезпечує вищий ККД.

4. Економічне порівняння

Насос з приводним двигуном 30 кВт дорожчий агрегат, більша металоємність, складніший монтаж, вищі втрати електроенергії при часткових навантаженнях.

Насос з приводним двигуном 22 кВт нижча вартість закупівлі (~15–30% дешевший), простіший монтаж і обслуговування, оптимальний режим роботи при змінних навантаженнях ТЕЦ.

Таким чином, з урахуванням технічних, енергетичних та економічних показників, насосний агрегат з електродвигуном потужністю 22 кВт є більш раціональним вибором для застосування на ТЕЦ у порівнянні з агрегатом 30 кВт. Його використання забезпечує оптимальне співвідношення між продуктивністю,

					КНУ.РБ.141.26.248с.10.Р1	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

енергоефективністю та капітальними витратами, особливо при роботі в системі з частотно-регульованим електроприводом.

Розглянемо насос Wilo CronoLine IL-E 80/170-22/2.

1.4 Будова та технічні характеристики насоса Wilo CronoLine IL-E 80/170-22/2

Насос Wilo CronoLine IL-E 80/170-22/2 є сучасним енергоефективним агрегатом для ТЕЦ із вбудованим частотним регулюванням. Він забезпечує подачу до 300–350 м³/год при напорі до 85 м та оснащений асинхронним двигуном потужністю 22 кВт класу IE4. Використання інтегрованого ПЧ-АД дозволяє забезпечити плавне регулювання продуктивності, зниження пускових струмів та підвищення енергоефективності системи.

У табл. 1.5 подано технічні характеристики насоса Wilo CronoLine IL-E 80/170-22/2, а на рис. 1.3 – загальний вид.

У насосі Wilo CronoLine IL-E 80/170-22/2 є вбудований не класичний зовнішній ПЧ, а інтегрований електронний частотний привід (ECM + VFD-модуль). Частотний перетворювач вбудований у насосний агрегат (on-board drive), керування здійснюється без окремого шафового ПЧ, реалізується повноцінне регулювання швидкості двигуна (ПІД-регулятор).



Рисунок 1.3 - Насос Wilo CronoLine IL-E 80/170-22/2 з вбудованим ПЧ

					КНУ.РБ.141.26.248с.10.Р1	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 1.5 - Параметри насоса Wilo CronoLine IL-E 80/170-22/2

№ з/п	Параметри насоса	Значення параметру / одиниці вимірювання
1	Продуктивність	300-350 м³/год
2	Напір	70-85 м
3	Максимальний робочий тиск	16 bar = 1.6 МПа $\approx$ 1600 кПа $\approx$ 163 м водяного стовпа
4	Робоче середовище	чиста вода
5	Температура рідини	до +140 °С
6	Матеріал корпусу	чавун
7	Мінімальний ККД (MEI)	$\geq 0,4$
8	Режим роботи	тривалий

Згідно технічної документації Wilo у вбудований ПЧ входить:

1. Електронний модуль керування - вбудований мікропроцесорний контролер, підтримка ПД-регулювання
2. Перетворення частоти - зміна частоти живлення двигуна, діапазон регулювання швидкості: приблизно 30–100%.
3. Вбудовані входи/виходи: 0–10 В / 4–20 мА (задання уставки), підключення датчика тиску/перепаду, цифрові входи Start/Stop.
4. Функції ПЧ: плавний пуск/зупинка, захист двигуна (перевантаження, перегрів), стабілізація тиску $\Delta p-s$ / $\Delta p-v$, оптимізація енергоспоживання.

Насос Wilo CronoLine IL-E 80/170-22/2 оснащений інтегрованим електронним частотним перетворювачем (вбудованим приводом зі змінною частотою обертання), який забезпечує регулювання швидкості асинхронного двигуна без застосування зовнішнього ПЧ. Система дозволяє реалізувати режими підтримання постійного або змінного диференціального тиску, а також забезпечує плавний пуск і енергоефективну роботу насосного агрегату

Порівняння Wilo CronoLine IL-E (з інтегрованим приводом) і класичної схеми “асинхронний двигун + зовнішній ПЧ-АД” на ТЕЦ не має однозначного

					КНУ.РБ.141.26.248с.10.Р1	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

“краще/гірше” - усе залежить від масштабу установки, режимів роботи та вимог до надійності.

Використання насосів Wilo з інтегрованим частотним приводом (IL-E) є доцільним для невеликих та середніх насосних установок завдяки простоті монтажу, компактності та заводській оптимізації режимів роботи. Водночас для умов ТЕЦ, де характерні великі потужності, змінні навантаження та складні системи автоматичного керування, більш ефективним є застосування схеми “асинхронний двигун + зовнішній перетворювач частоти”, яка забезпечує високу гнучкість керування, кращу ремонтпридатність та можливість інтеграції в АСУ ТП. Порівняння таких ПЧ зображено на рис. 1.4.

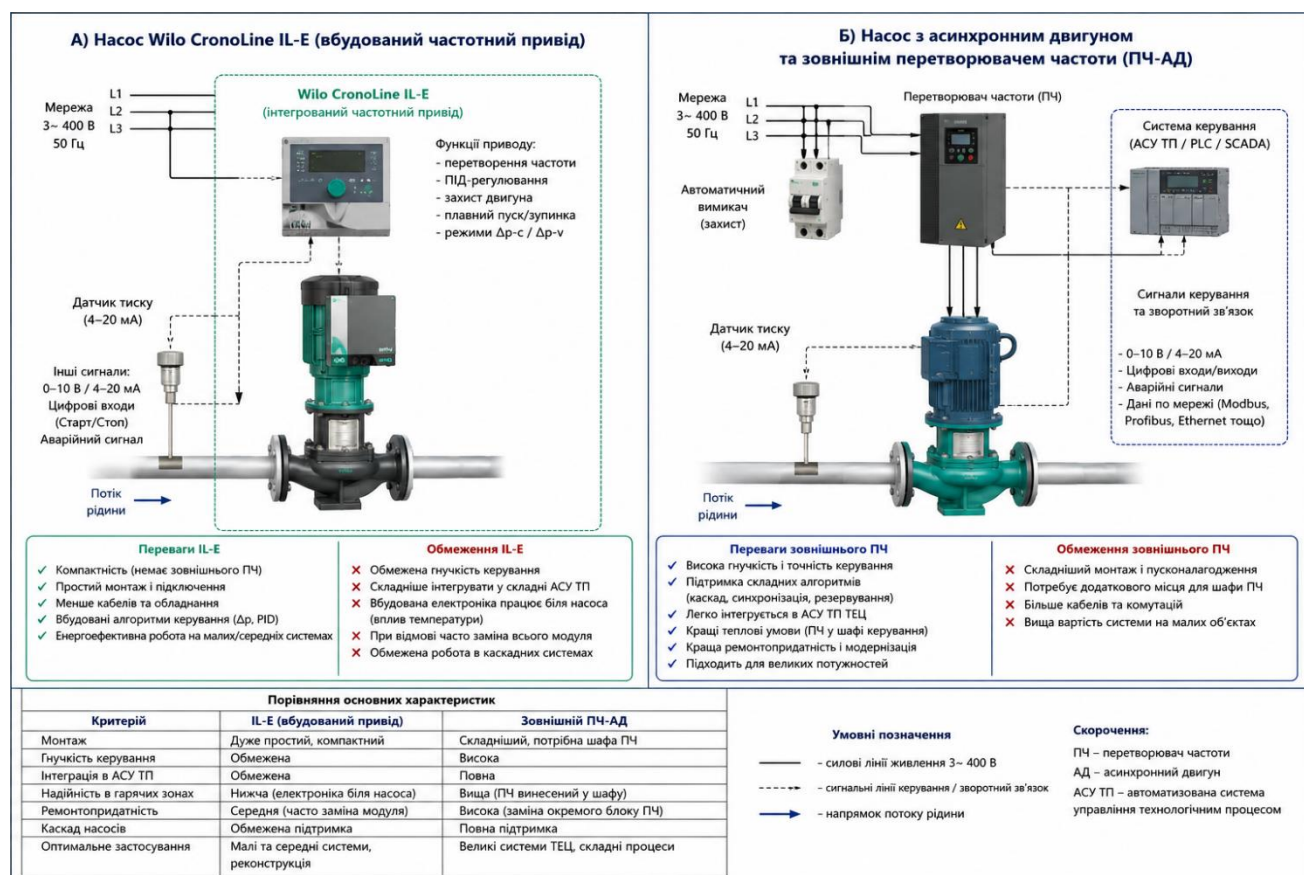


Рисунок 1.4 – Порівняння властивостей насосного агрегату з вбудованим ПЧ та зовнішнім ПЧ

Розглянемо класичний насос Wilo CronoLine IL 80/170-22/2-IE3 без ПЧ (див. табл. 1.6 та рис. 1.5).

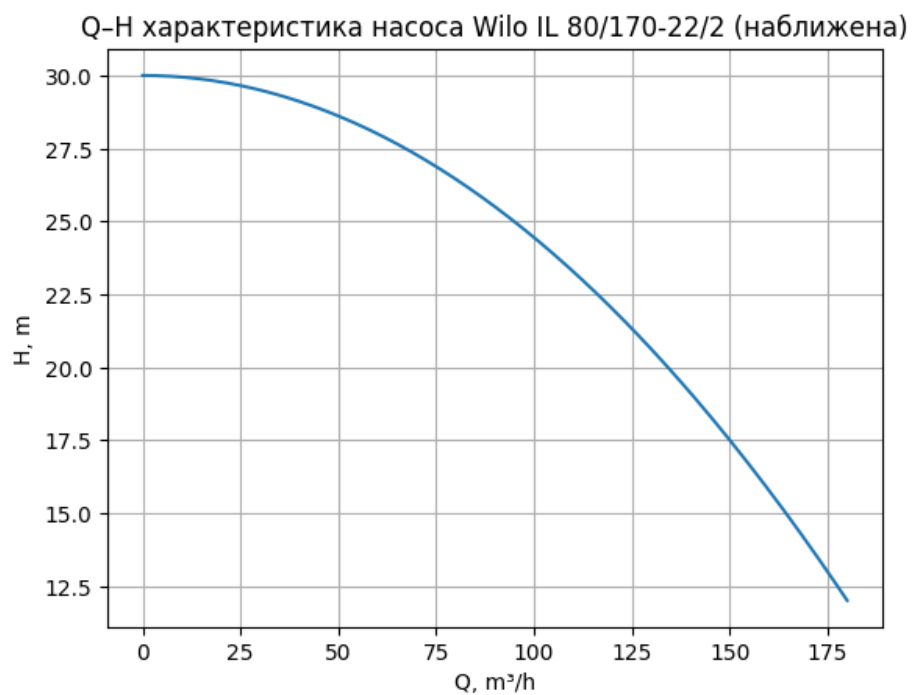
Насосний агрегат Wilo CronoLine IL 80/170-22/2-IE3 являє собою одноступінчастий відцентровий інлайн-насос з окремо встановленим трифазним асинхронним двигуном потужністю 22 кВт. Регулювання продуктивності здійснюється за допомогою зовнішнього частотного перетворювача, що забезпечує гнучке керування режимами роботи насосної установки.

Як правило в котельні встановлено та працює група насосних агрегатів, кількість включень яких регулюється на протязі зміни технологічних умов роботи (див. рис. 1.6).

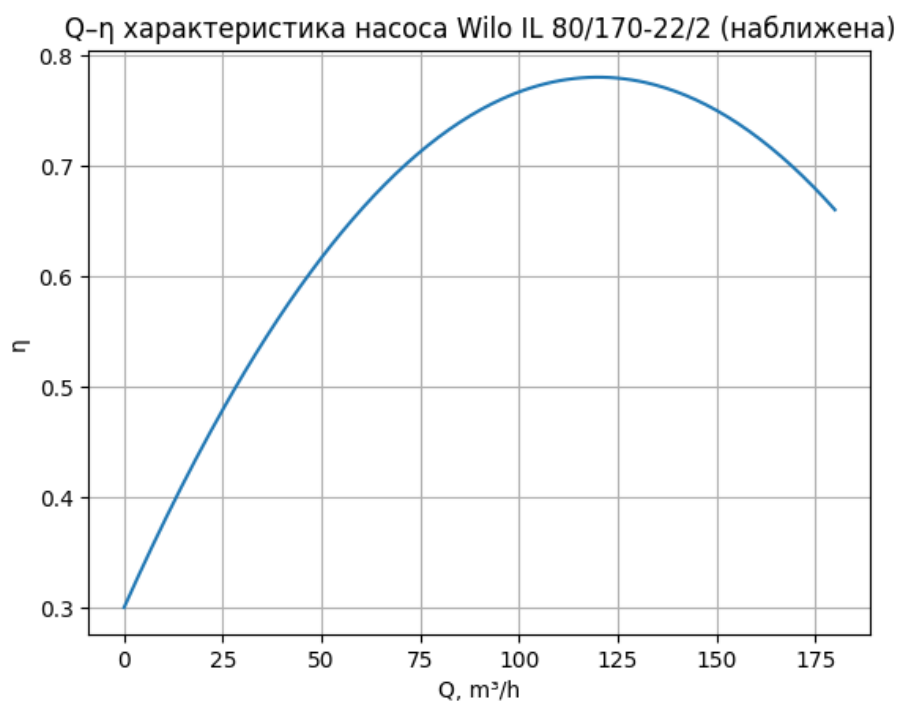
Таблиця 1.6 - Параметри насоса Wilo CronoLine IL 80/170-22/2-IE3

№ з/п	Параметри насоса	Значення параметру / одиниці вимірювання
1	Продуктивність	160-180 м³/год
2	Напір	22 м
3	Максимальний робочий тиск	16 bar = 1.6 МПа $\approx$ 1600 кПа $\approx$ 163 м водяного стовпа
4	Робоче середовище	чиста вода
5	Температура рідини	до +140 °С
6	Матеріал корпусу	чавун
7	ККД	65 %
8	Режим роботи	тривалий

					КНУ.РБ.141.26.248с.10.Р1	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



а)



б)

Рисунок 1.5 - Наблизені енергетичні характеристики насосного агрегата Wilo IL 80/170-22/2: а) залежності напору та б) ККД від подачі

					КНУ.РБ.141.26.248с.10.Р1	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 1.6 – Група насосів із приладом автоматичного керування WILO-COR-SYSTEM для керування насосним агрегатом потужністю 22 кВт

1.5 Розрахунок потужності та вибір електродвигуна

Визначаємо потужність насоса за формулою:

$$P_{розр} = \frac{\rho \cdot Q \cdot H}{367000 \cdot \eta} = \frac{1000 \cdot 180 \cdot 22}{367000 \cdot 0,65} = 16,6 \text{ кВт}, \quad (1.1)$$

де $\rho = 1000 \text{ кгс/м}^3$ – питома вага води чистої;

$Q = 180 \text{ м}^3/\text{год.}$ – подача насоса;

$H = 22 \text{ м}$ – напір насоса;

$\eta = 65\text{-}88 \%$ – ККД відцентрових промислових насосів;

367000 – перевідний множник (константа).

Для привода насосного агрегату використовується двигун власного виробництва Wilo IE3 класу енергоефективності, або OEM-постачальника під Wilo (табл. 1.7).

Таблиця 1.7 – Технічні характеристики електродвигуна Wilo IL 80/170-22/2

					КНУ.РБ.141.26.248с.10.Р1	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

№ з/п	Технічні дані	Значення
1	Номінальна потужність/споживана потужність, кВт	22 / 22,9
2	Частота мережі, Гц	50/60
3	Кількість полюсів	2
4	Синхронна швидкість, об/хв	3000
5	Номінальна швидкість, об/хв	2980
6	Номінальна напруга, В	380
7	Номінальний струм, А	34,5
8	Клас енергоефективності	IE3
9	Момент інерції, кг·м ²	0,005

Можна підібрати аналоги з аналогічними характеристиками:

- 1) ABB M3BP 180ML 2 (22 kW, 2-pole, IE3);
- 2) Siemens 1LE1 180M-2 (22 kW, 2-pole, IE3).

1.6 Основні експлуатаційні вимоги до насосів та електроприводів

Сучасні центробіжні насосні агрегати повинні відповідати комплексу технічних та експлуатаційних вимог, які забезпечують їхню ефективну, надійну та економічну роботу.

Вимоги до електропривода насосних агрегатів:

- висока енергоефективність та надійність у всьому діапазоні навантажень;
- можливість запуску агрегату під навантаженням без втрати стійкості;
- забезпечення роботи електропривода в нереверсивному режимі;
- широкий діапазон регулювання швидкості обертання;
- висока перевантажувальна здатність у всьому робочому діапазоні швидкостей;
- точне та стабільне регулювання частоти обертання.

					КНУ.РБ.141.26.248с.10.Р1	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

До основних вимог, що пред'являються до сучасних насосів, належать:

- компактність і раціональне конструювання, що зменшує витрати на монтаж, налагодження та експлуатацію;
- надійна герметизація ущільнень при простоті їх обслуговування;
- ефективні умови всмоктування з мінімальними витратами на створення необхідного підпору;
- можливість автоматизованого керування насосним агрегатом і насосною станцією;
- простота конструкції, яка забезпечує високу надійність і зручність технічного обслуговування;
- висока економічність роботи, що визначається високим ККД та відносно невеликою вартістю обладнання;
- мінімальне зниження коефіцієнта корисної дії при перекачуванні рідин із підвищеною в'язкістю;
- передача крутного моменту безпосередньо від електродвигуна до вала насоса.

Для приводу насосних агрегатів найбільш доцільним є застосування системи ПЧ–АД, яка забезпечує оптимальне регулювання режимів роботи.

Переваги такого електропривода:

- плавне регулювання швидкості обертання з жорсткими механічними характеристиками, що забезпечує стабільну роботу в широкому діапазоні;
- зниження енергетичних втрат завдяки роботі асинхронного двигуна з малим ковзанням, близьким до номінального режиму.

Недоліки частотно-регульованого електропривода:

- складність налаштування та побудови системи керування;
- висока вартість перетворювачів частоти, особливо для потужних електроприводів.

					КНУ.РБ.141.26.248с.10.Р1	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.7 Вибір перетворювача та елементів силової частини

Вибір перетворювача частоти проводимо, виходячи з таких умов:

$$U_{\text{вихПЧ}} \geq U_{1н}, P_{\text{ПЧ}} \geq P_n.$$

Для керування асинхронним двигуном Wilo потужністю 22 кВт обрано перетворювач частоти ABB ACS580-01-046A-4. Даний перетворювач забезпечує плавне регулювання частоти обертання, високі енергетичні показники, надійний пуск насосного агрегату та підтримує сучасні функції автоматизації технологічного процесу (рис. 1.7).



Рисунок 1.7 - Перетворювач частоти ABB ACS580-01-046A-4 (22 кВт, 400 В) для регулювання швидкості асинхронного двигуна насосного агрегату

Паспортні дані перетворювача частоти ABB ACS580-01-046A-4 зведено до табл. 1.8.

Таблиця 1.8 – Паспортні дані перетворювача частоти ABB ACS580-01-046A-4

№ з/п	Параметри перетворювача	Значення параметру / одиниця вимірювання
1	Номінальна потужність	22 кВт
2	Напруга живлення	380–480 В
3	Вихідна напруга	0–400 В

					КНУ.РБ.141.26.248с.10.Р1	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

№ з/п	Параметри перетворювача	Значення параметру / одиниця вимірювання
4	Вихідна частота	0–500 Гц
5	Номінальний вихідний струм	45 А
6	Перевантажувальна здатність	150 % на 60 с
7	Режим керування	скалярне V/f та векторне (sensorless vector control)
8	Частота ШІМ	2–12 кГц
9	Кількість аналогових входів/виходів	2 / 2
10	Кількість дискретних входів	2 / 2
11	Кількість релейних виходів	6 / 3
12	Вартість	120 000 грн

Основні переваги перетворювача полягають у підтримці спеціалізованих режимів для насосів та вентиляторів; у здійсненні плавного пуску і зупинки двигуна; зниженні пускових струмів; можливості автоматичного підтримання тиску рідини; вбудованій функції енергозбереження; підтримці сучасних промислових протоколів зв'язку; високому рівні захисту двигуна та мережі.

Для електропривода насосного агрегату з двигуном WEG W22 180 M4 потужністю 18,5 кВт застосування струмообмежувача реактора та згладжуючого дроселя не є обов'язковим, оскільки перетворювач частоти Schneider Electric ATV630D18N4 має вбудовані засоби обмеження гармонік та захисту силової частини. Встановлення додаткових реакторів доцільне лише при значній довжині кабельної лінії, підвищеній потужності короткого замикання мережі або жорстких умовах експлуатації електропривода.

					КНУ.РБ.141.26.248с.10.Р1	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.8 Висновки за розділом 1

У розділі наведено технологічну схему котельної установки та виконано огляд основного обладнання і контрольно-вимірювальних засобів, зокрема датчиків рівня, регуляторів та виконавчих механізмів (пускатів, контакторів, реле, регулюючих клапанів).

Проведено вибір електропривода насосного агрегату Wilo IL 80/170-22/2 та визначено його основні параметри. На основі технічних характеристик підібрано асинхронний електродвигун, що забезпечує надійну та ефективну роботу насосної установки.

Для регулювання прийнято систему ПЧ–АД. Обрано перетворювач частоти ABB ACS580-01-046A-4 (22 кВт, 400 В), орієнтований на застосування в насосних системах та прилад автоматичного керування WILO-COR-SYSTEM.

Використання частотного керування забезпечує плавне регулювання швидкості, зниження пускових струмів і механічних навантажень, а також підвищення енергоефективності привода при збереженні високої надійності та простоти конструкції.

					КНУ.РБ.141.26.248с.10.Р1	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2

АНАЛІЗ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ТЕХНОЛОГІЧНОГО
МЕХАНІЗМУ

					КНУ.РБ.141.26.248с.10.Р2							
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата								
Розроб.		Малиш Ю.М.			Розділ 2				Літ.		Арк.	Аркушів
Перевір.		Ільченко О.В.										
Реценз.									ЕМ гр. ЕЕМ-22-2			
Н. Контр.		Ільченко О.В.										
Затверд.		Пересунько І.І.										

2.1 Схема заміщення та розрахунок механічних характеристик електропривода насоса Wilo IL 80/170-22/2

2.1.1 Параметри схеми заміщення двигуна Wilo

Схема заміщення (Т-подібна) показана на рис. 2.2, де U_ϕ – напруга (фазна), I_1 – струм статора (фазний); I_2' – струм ротора (приведений до обмотки статора, фазний), I_μ – струм намагнічування, R_1, X_1 – активний та індуктивний опори (фазні статора), R_2', X_2' – активний та індуктивний опори ротора (приведені до обмотки статора), X_μ – індуктивний опір (контур намагнічування).

Використовуючи технічні характеристики електродвигуна Wilo, наведені в табл. 1.2, визначимо параметри схеми заміщення, представлені вище. Отримані результати зведено в табл. 2.2 і 2.3.

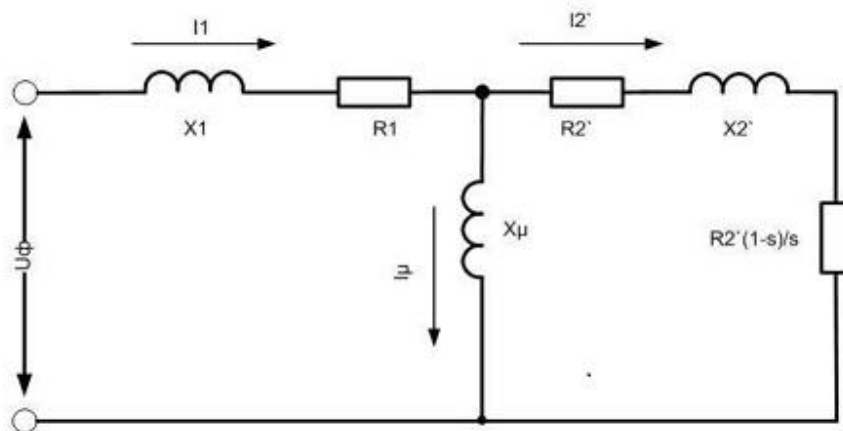


Рисунок 2.2 - Т-подібна схема заміщення асинхронного двигуна Wilo

Таблиця 2.2 – Параметри еквівалентної схеми заміщення двигуна Wilo, визначені розрахунковим шляхом

№ з/п	Назва параметру	Формула	Номер формули
1	Синхронна швидкість	$\omega_0 = \frac{\pi \cdot n_0}{30}$	(2.1)

№ з/п	Назва параметру	Формула	Номер формули
2	Номінальна швидкість	$\omega_n = \frac{\pi \cdot n_n}{30}$	(2.2)
3	Номінальне ковзання	$s_n = \frac{\omega_0 - \omega_n}{\omega_0}$	(2.3)
4	Номінальний момент	$M_n = 1000 \cdot \frac{P_n}{\omega_n}$	(2.4)
5	Номінальний струм статора	$I_{1n} = \frac{P_n}{3 \cdot U_{1n} \cdot \eta_n \cdot \cos \varphi_n}$ де P_n – номінальна потужність двигуна; U_{1n} – номінальна фазна напруга; η_n – номінальний к.к.д.; $\cos \varphi_n$ – номінальний коефіцієнт потужності	(2.5)
6	Струм статора при завантаженні 75%	$I_{1p} = \frac{p_* \cdot P_n}{3 \cdot U_{1n} \cdot \eta_{p*} \cdot \cos \varphi_{p*}}$ де $p_* = P/P_n$ – коефіцієнт завантаження АД; η_{p*} – ККД при 75% завантаження; $\cos \varphi_{p*}$ – коефіцієнт потужності при 75% завантаження	(2.6)
7	Струм неробочого ходу статора	$I_0 = \sqrt{\frac{I_{1p}^2 - I_{1n}^2 \cdot \left[p_* \cdot (1 - s_n) / p_* \cdot (1 - s_n) \right]^2}{1 - \left[p_* \cdot (1 - s_n) / p_* \cdot (1 - s_n) \right]^2}}$	(2.7)
8	Критичне ковзання	$s_k = s_n \times$ $\times \frac{\left(k_m + \sqrt{k_m^2 - [1 - 2 \cdot s_n \cdot \beta \cdot (k_m - 1)]} \right)}{1 - 2 \cdot s_n \cdot \beta \cdot (k_m - 1)}$	(2.8)

№ з/п	Назва параметру	Формула	Номер формули
		де k_m – перевантажувальна здатність АД; $\beta = 1,3$ – коефіцієнт, що залежить від типів АД.	
9	Конструктивний коефіцієнт C_1	$C_1 = 1 + \frac{I_0}{2 \cdot k_i \cdot I_{1H}}$ де k_i – кратність пускового струму	(2.9)
10	Конструктивний коефіцієнт A_1	$A_1 = \frac{3 \cdot U_{1H}^2 \cdot (1 - s_H)}{2 \cdot C_1 \cdot k_m \cdot P_H}$	(2.10)
11	Активний опір ротора, приведений до обмотки статора АД	$R_2' = \frac{A_1}{(\beta + 1/s_K) \cdot C_1}$	(2.11)
12	Активний опір обмотки статора	$R_1 = C_1 \cdot R_2' \cdot \beta$	(2.12)
13	Конструктивний параметр γ	$\gamma = \sqrt{(1/s_K^2) - \beta^2}$	(2.13)
14	Індуктивний опір короткого замикання X_{KH}	$X_{KH} = \gamma \cdot C_1 \cdot R_2'$	(2.14)
15	Індуктивний опір розсіювання фази роторної обмотки, приведеної до статорної	$X_1 = 0,42 \cdot X_{KH}$	(2.15)

№ з/п	Назва параметру	Формула	Номер формули
16	ЕРС ланки намагнічування	$E_m = \sqrt{(U_{1n} \cdot \cos \varphi_n - R_1 \cdot I_{1n})^2 + \sqrt{+ (U_{1n} \cdot \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_n} - X_1 \cdot I_{1n})^2}}$	(2.16)
17	Індуктивний опір контуру намагнічування	$X_\mu = \frac{E_m}{I_0}$	(2.17)

Таблиця 2.3 – Параметри еквівалентної схеми заміщення двигуна Wilo, визначені розрахунковим шляхом

№ з/п	Назва параметру	Формула	Номер формули
1	Синхронна швидкість	$\omega_0 = \frac{3,14 \cdot 3000}{30} = 314,15$	1/с
2	Номінальна швидкість	$\omega_n = \frac{3,14 \cdot 2980}{30} = 303,7$	1/с
3	Номінальне ковзання	$s_n = \frac{314,15 - 303,7}{314,15} = 0,0333$	в.о.
4	Номінальний момент	$M_n = 1000 \cdot \frac{22,0}{303,7} = 72$	Н·м
5	Номінальний струм статора	$I_{1n} = \frac{22000}{3 \cdot 380 \cdot 0,9 \cdot 0,8} = 34,5$	А
6	Струм статора при завантаженні 75%	$I_{1p} = \frac{0,75 \cdot 22000}{3 \cdot 380 \cdot 0,9 \cdot 0,8} = 31,5$	А

№ з/п	Назва параметру	Формула	Номер формули
7	Струм неробочого ходу статора	$I_0 = \sqrt{\frac{31,5^2 - 34,5^2 \cdot [0,75 \cdot (1 - 3,33) / (1 - 0,75 \cdot 3,33)]^2}{1 - [0,75 \cdot (1 - 3,33) / (1 - 0,75 \cdot 3,33)]^2}} = 10,63$	А
8	Критичне ковзання	$s_k = 3,33 \times \frac{(2,8 + \sqrt{2,8^2 - [1 - 2 \cdot 3,33 \cdot 1,3 \cdot (2,8 - 1)]})}{1 - 2 \cdot 3,33 \cdot 1,3 \cdot (2,8 - 1)} = 0,185$	В.О.
9	Конструктивний коефіцієнт C_1	$C_1 = 1 + \frac{10,63}{2 \cdot 6,6 \cdot 34,5} = 1,0172$	В.О.
10	Конструктивний коефіцієнт A_1	$A_1 = \frac{3 \cdot 380^2 \cdot (1 - 3,33)}{2 \cdot 1,0172 \cdot 2,8 \cdot 22000} = 1,2475$	В.О.
11	Активний опір ротора, приведений до обмотки статора АД	$R_2' = \frac{1,2475}{(1,3 + 1/3,33) \cdot 1,0172} = 0,1826$	Ом
12	Активний опір обмотки статора	$R_1 = 1,0172 \cdot 0,1826 \cdot 1,3 = 0,2415$	Ом
13	Конструктивний параметр γ	$\gamma = \sqrt{(1/0,185^2) - 1,3^2} = 5,26$	
14	Індуктивний опір короткого замикання $X_{кн}$	$X_{кн} = 5,26 \cdot 0,1826 \cdot 1,0172 = 0,9766$	Ом
15	Індуктивний опір розсіювання фази роторної	$X_1 = 0,42 \cdot 0,9766 = 0,410$	Ом

№ з/п	Назва параметру	Формула	Номер формули
	обмотки, приведеної до статорної		
16	ЕРС ланки намагнічування	$E_m = \sqrt{(380 \cdot 0,85 - 0,2415 \cdot 34,5)^2 + \sqrt{+(380 \cdot \sqrt{1 - 0,85^2} - 0,410 \cdot 34,5)^2}} = 202,83$	В
17	Індуктивний опір контуру намагнічування	$X_\mu = \frac{202,83}{10,63} = 19,06$	Ом

2.1.2 Розрахунок та аналіз характеристик електродвигуна насосної установки

Для побудови природних характеристик асинхронного електродвигуна застосовано комплексний (символьний) метод розрахунку кіл змінного струму. Розраховані параметри наведено в табл. 2.4. Обчислення за залежностями (2.18)–(2.30) виконано із використанням програмного середовища MATLAB.

На рис. 2.3–2.9 подано результати моделювання механічних, електромеханічних та енергетичних характеристик електропривода насосної установки.

Таблиця 2.4 - Параметри схеми заміщення асинхронного двигуна Wilo, визначені комплексним методом розрахунку

№ з/п	Назва параметру (комплексне значення)	Формула	Номер формули
1	Опір ротора	$z_2(s) = \frac{r_2}{s} + j \cdot x_2$	(2.18)
2	Опір кола намагнічування	$z_\mu = j \cdot x_\mu$	(2.19)

№ з/п	Назва параметру (комплексне значення)	Формула	Номер формули
3	Опір кола ротора	$z_{20}(s) = \frac{z_2(s) \cdot z_\mu}{z_2(s) + z_\mu}$	(2.20)
4	Опір кола статора	$z_1(s) = r_1 + j \cdot x_1$	(2.21)
5	Повний опір	$z_0(s) = z_1(s) + z_2(s)$	(2.22)
6	Струм статора	$I_1(s) = \frac{U_1}{z_0(s)}$	(2.23)
7	Напруга на клеммах роторного кола	$E_{20}(s) = U - I_1(s) \cdot z_1(s)$	(2.24)
8	Струм ротора	$I_2(s) = \frac{E_{20}(s)}{z_2(s)}$	(2.25)
9	Електромагнітний момент	$M_{EM}(s) = 3 \cdot \left( |I_2(s)| \right)^2 \cdot \frac{r_2}{\omega_0 \cdot s}$	(2.26)
10	Спожита активна потужність	$P_{AD}(s) = 3 \cdot \operatorname{Re} \left(U_1 \cdot \hat{I}_1(s) \right)$	(2.27)
11	Спожита реактивна потужність	$Q_{AD}(s) = 3 \cdot \operatorname{Im} \left(U_1 \cdot \hat{I}_1(s) \right)$	(2.28)
12	ККД	$\eta(s) = \frac{M_{EM}(s) \cdot \omega_0 \cdot (1-s)}{P_{AD}(s)}$	(2.29)
13	Коефіцієнт потужності	$k_m(s) = \cos \left(\arg(z_0(s)) \right)$	(2.30)

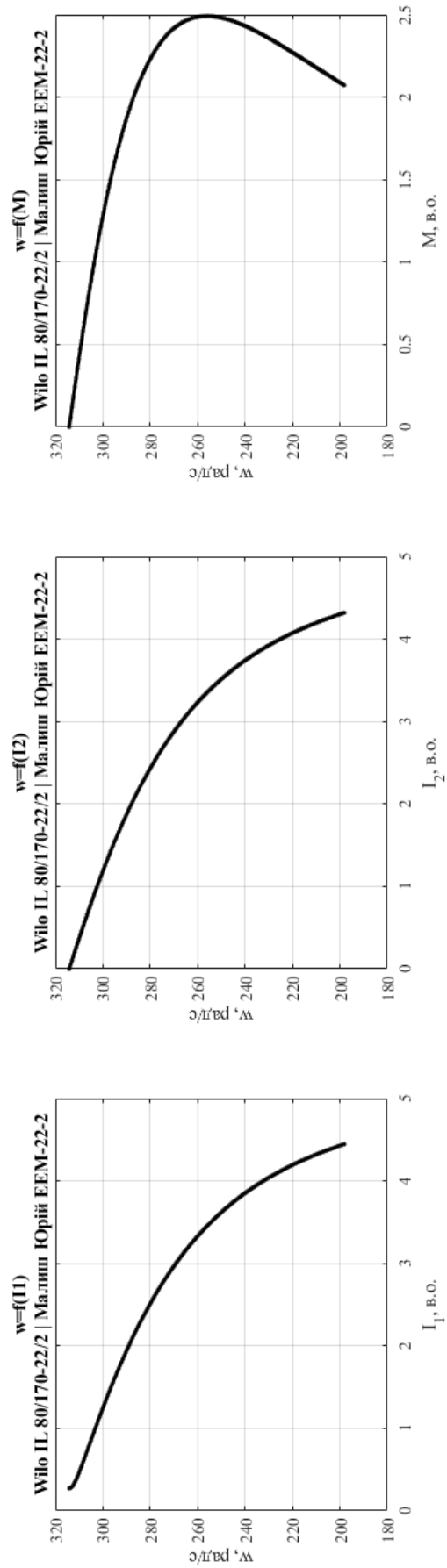


Рисунок 2.1 – Характеристики двигуна насоса Wilo StronoLine IL 80/170-22/2-IE3: а – швидкісна характеристика за струмом статора; б - швидкісна характеристика за струмом ротора; в – механічна характеристика

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

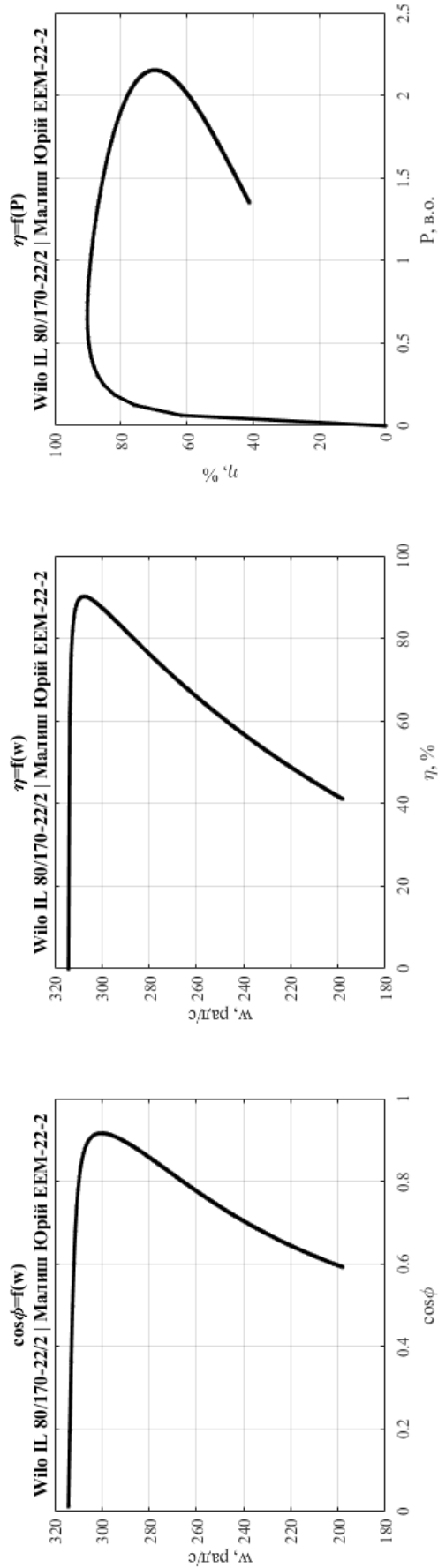


Рисунок 2.2 – Характеристики двигуна насоса Wilo CronoLine IL 80/170-22/2-IE3: γ – коефіцієнт потужності;
 δ – коефіцієнт корисної дії; ϵ – залежність коефіцієнта корисної дії від механічної потужності на валу

2.1.3 Штучні характеристики електропривода насосної установки з частотним регулюванням

При дослідженні електропривода за системою ПЧ-АД необхідно враховувати такі особливості:

1. Індуктивні опори елементів схеми заміщення змінюються пропорційно частоті живильної напруги.
2. У розімкненій системі керування регулювання напруги здійснюється узгоджено зі зміною частоти відповідно до залежності:

$$\frac{U_1}{U_{1н}} = \left(\frac{f_1}{f_{1н}} \right)^m, \quad (2.31)$$

де $m = 2$ – показник, що відповідає насосному характеру навантаження.

Розрахунок штучних характеристик електропривода виконано із застосуванням комплексного (символьного) методу аналізу кіл змінного струму на основі параметрів, наведених у табл. 2.4. Обчислення за співвідношеннями (2.18)–(2.30) проведено в програмному середовищі MATLAB для частот живлення від 50 до 10 Гц з кроком $\Delta f = 10$ Гц. Отримані результати подано на рис. 2.3–2.6..

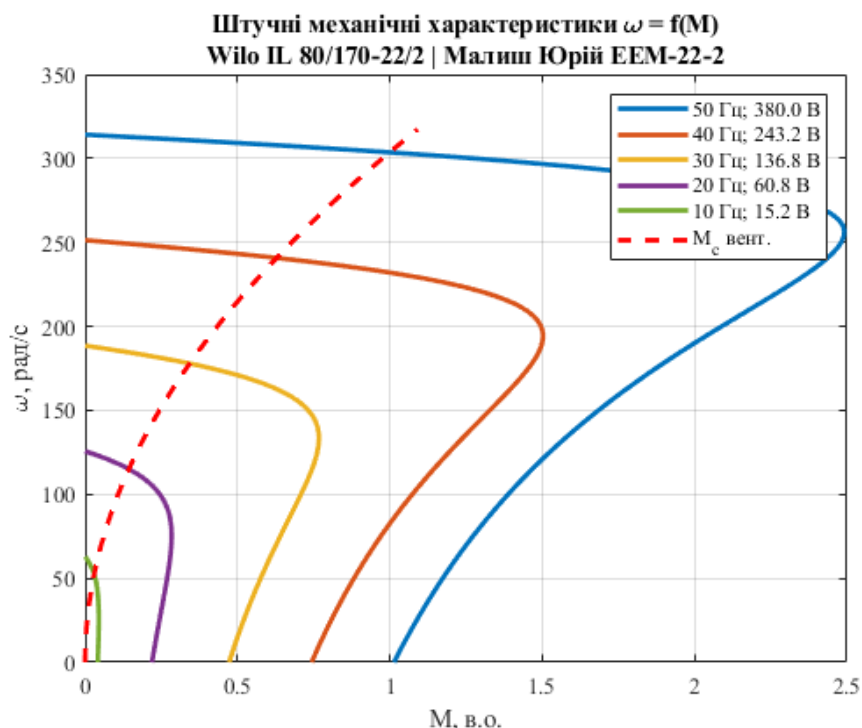


Рисунок 2.3 – Механічні характеристики при частотному регулюванні

					КНУ.РБ.141.26.248с.10.Р2	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

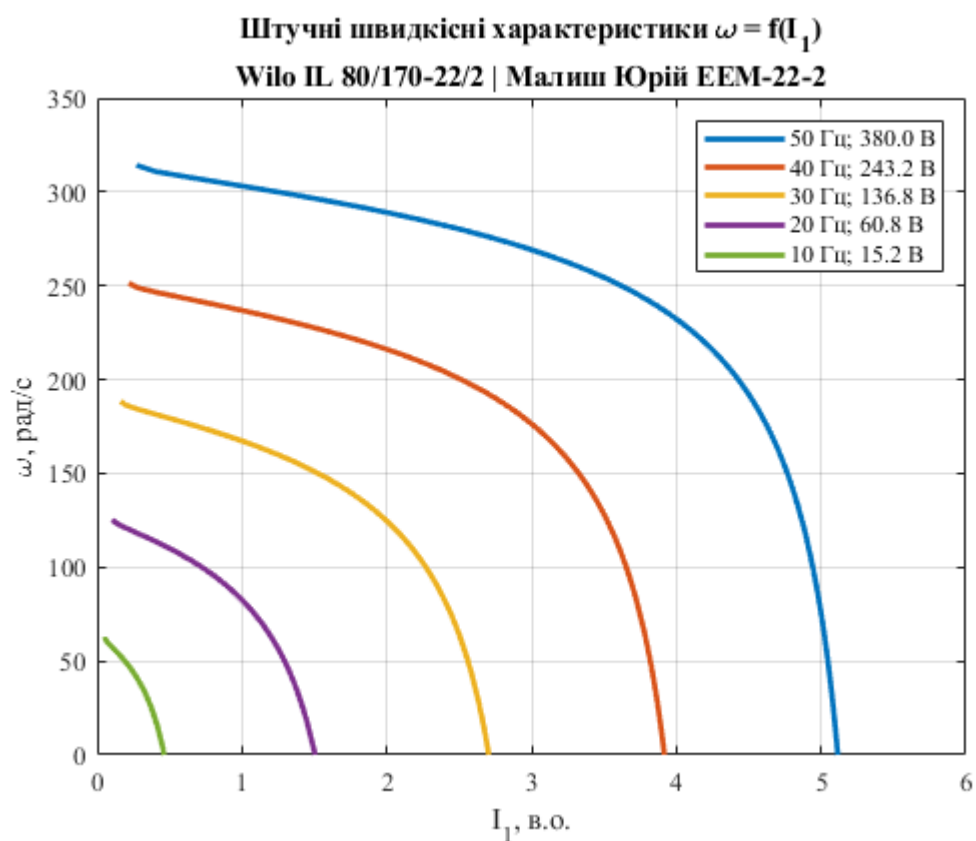


Рисунок 2.4 - Швидкісні характеристики при частотному регулюванні
(за струмом статора)

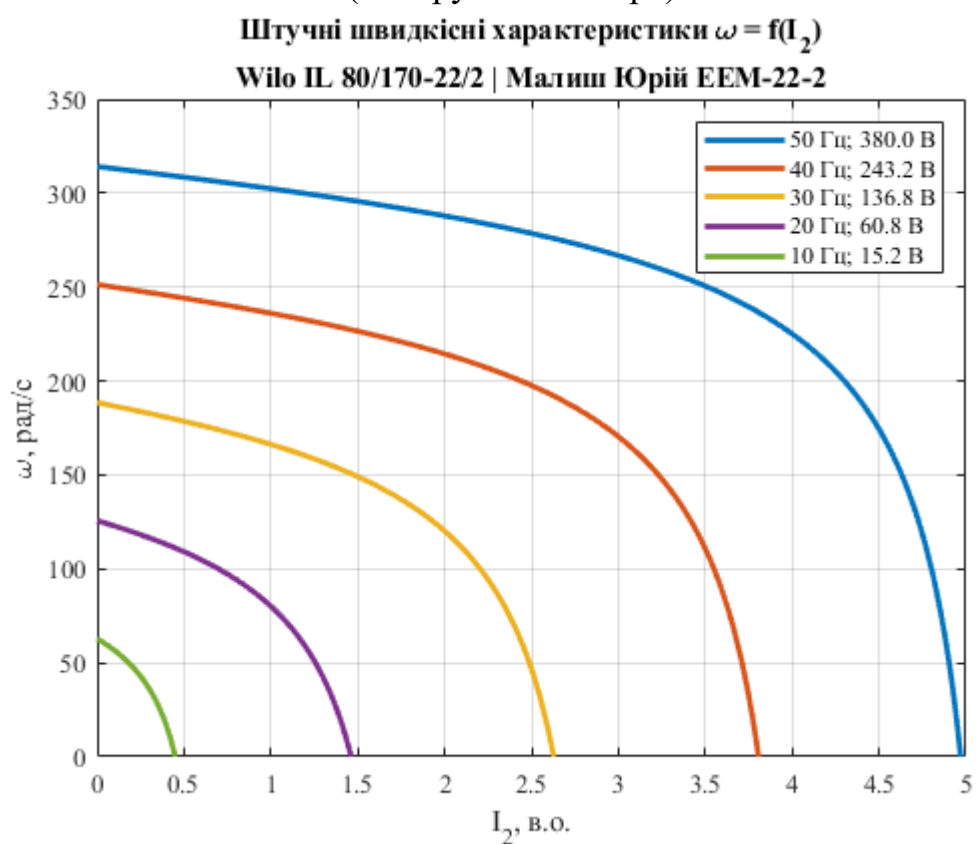


Рисунок 2.5 - Швидкісні характеристики при частотному регулюванні
(за струмом ротора)

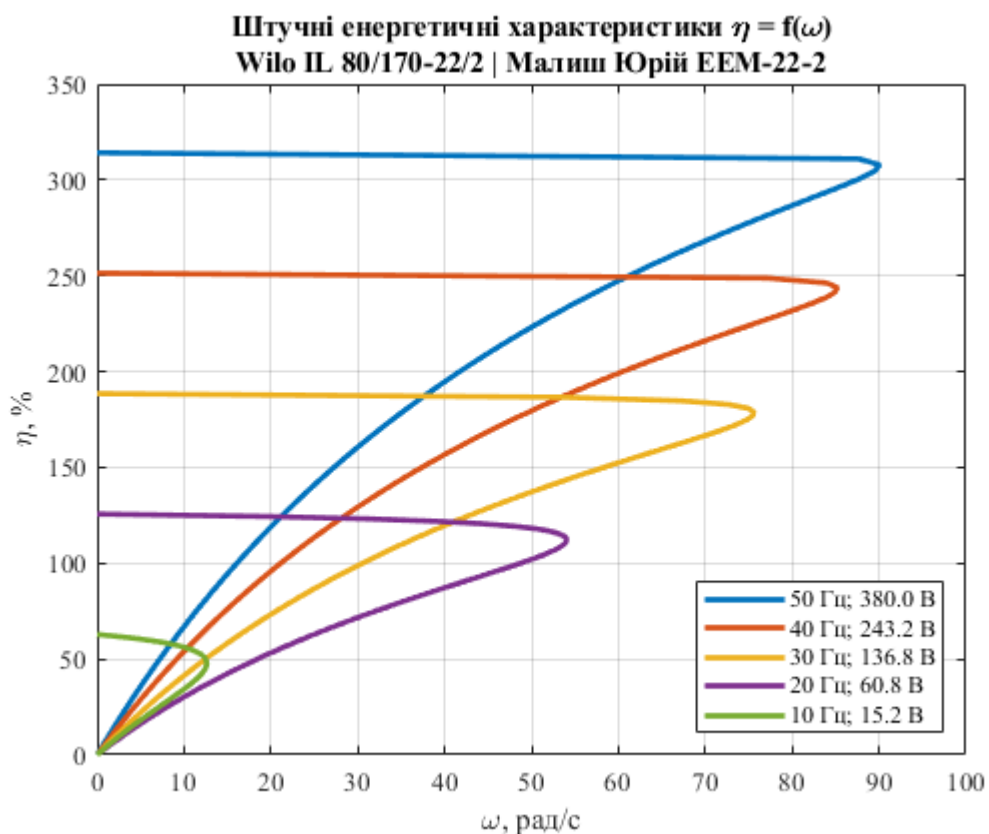


Рисунок 2.6 - Енергетичні характеристики при частотному регулюванні

2.2 Моделювання роботи насосної установки в середовищі MATLAB/Simulink

Для дослідження роботи насосної установки в середовищі MATLAB/Simulink розроблено математичну модель електропривода з асинхронним двигуном з урахуванням закону частотного керування (2.31). Структурну схему моделі прямого пуску наведено на рис. 2.7, результати моделювання – на рис. 2.8.

На рис. 2.8 подано часові залежності швидкості обертання, електромагнітного моменту та струмів статора і ротора двигуна. На рис. 2.9 представлено модель частотно-регульованого електропривода системи ПЧ–АД з векторним керуванням, а на рис. 2.10 – часові діаграми струму статора, частоти обертання та електромагнітного моменту під час перехідних процесів.

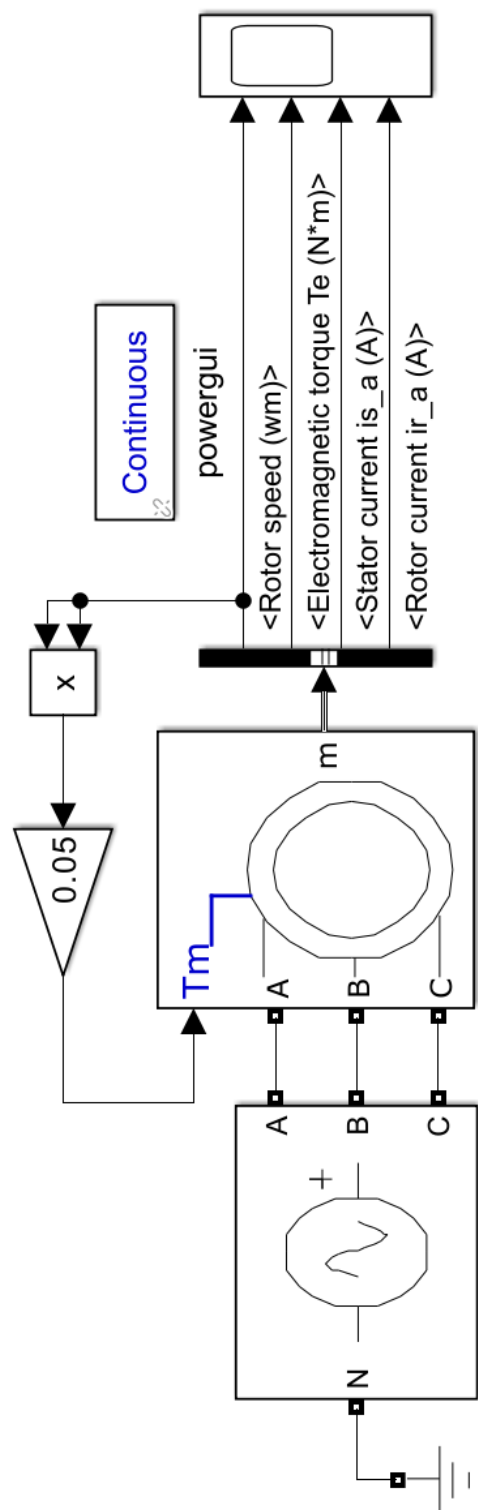


Рисунок 2.7 – Імітаційна модель асинхронного електропривода насосної установки з урахуванням реактивного моменту опору

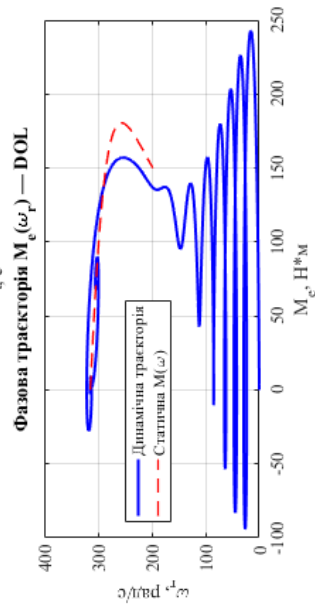
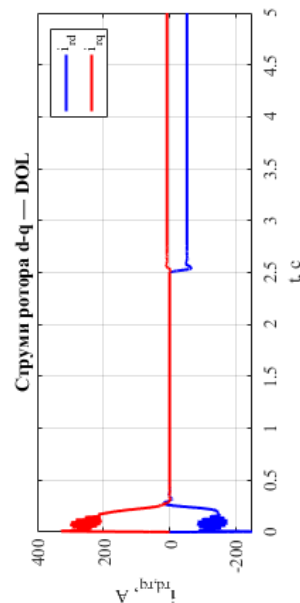
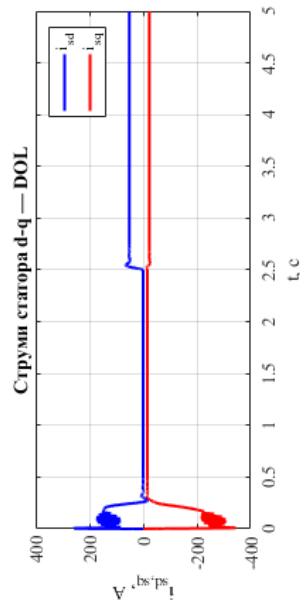
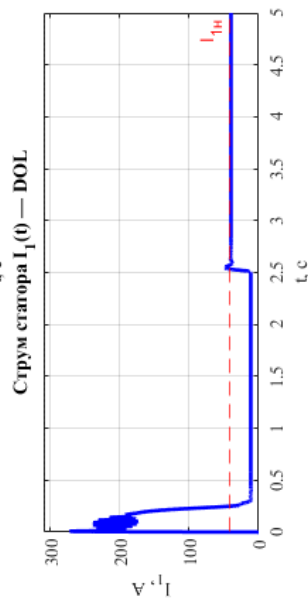
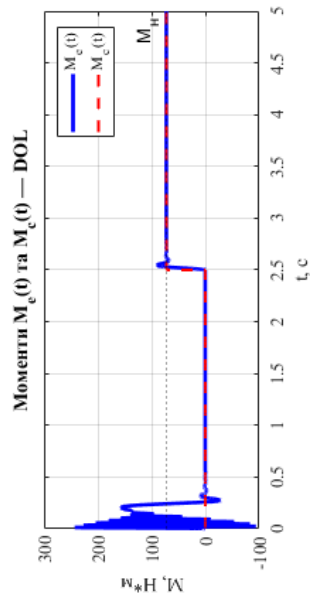
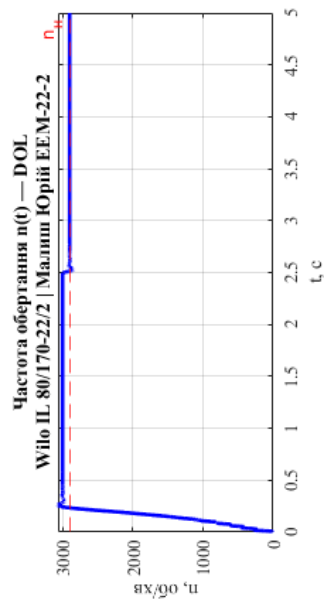


Рисунок 2.8 – Моделювання прямого пуску електропривода насосної установки з вентиляторним характером моменту опору

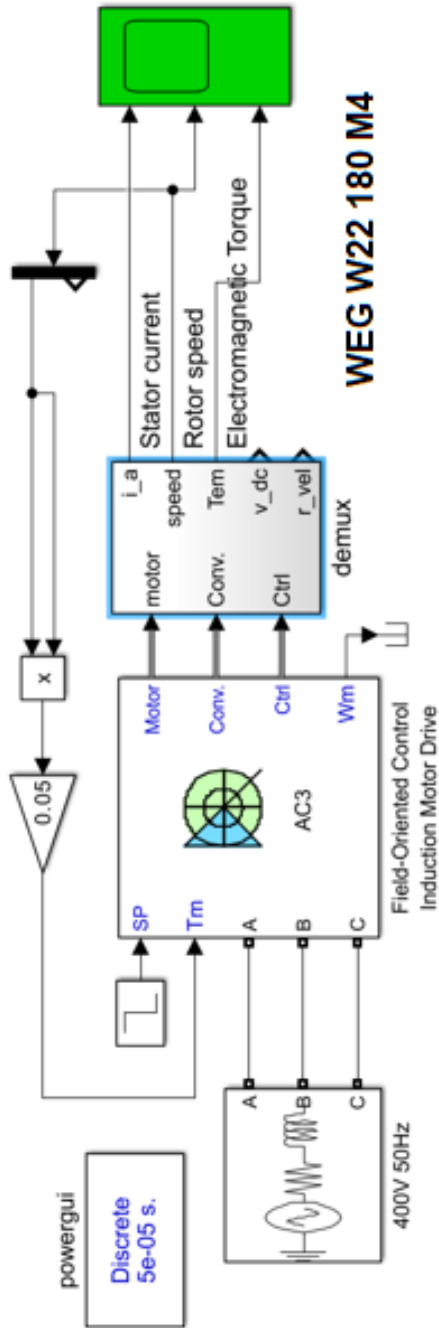


Рисунок 2.9 – Імітаційна реалізація математичної моделі асинхронного електропривода насосної установки з частотним регулюванням

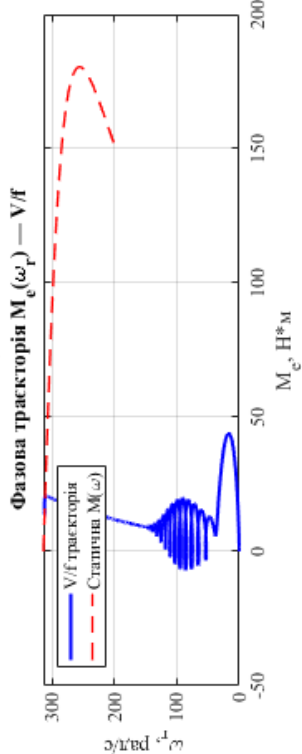
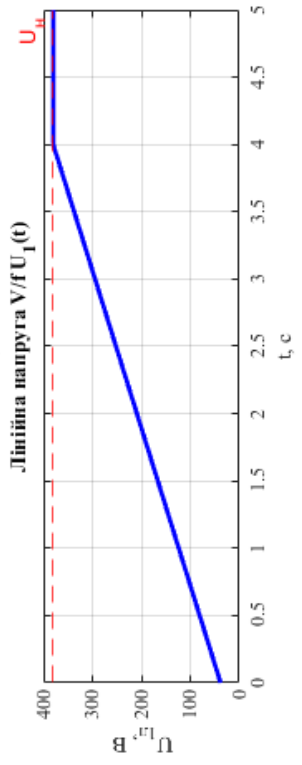
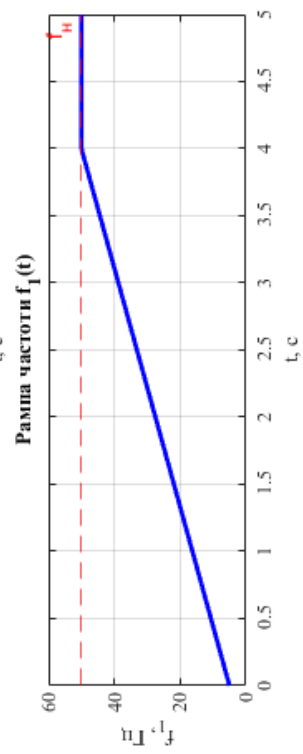
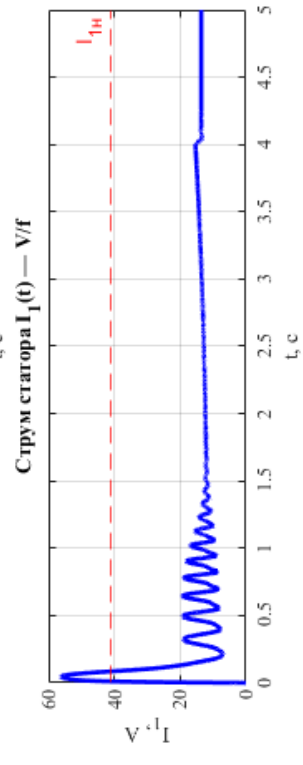
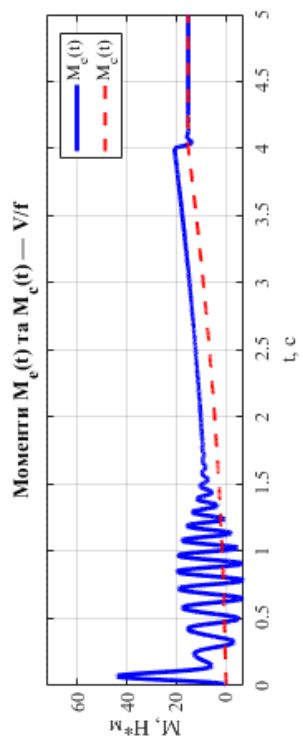
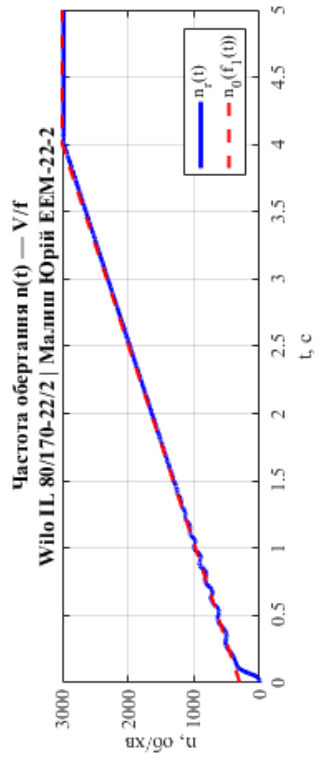


Рисунок 2.10 – Графіки зміни струму статора, частоти обертання та електромагнітного моменту в процесі пуску насосної установки

Результати моделювання прямого пуску показали виникнення підвищених пускових струмів і електромагнітного моменту на початку розгону двигуна. Частота обертання плавно зростає до номінального значення, після чого параметри електропривода стабілізуються та встановлюється усталений режим роботи.

Аналіз перехідних процесів частотно-керованого електропривода засвідчив, що векторне керування забезпечує плавний пуск і регулювання швидкості без значних перевантажень за струмом і моментом. Застосування частотного регулювання дозволяє зменшити пускові струми, підвищити плавність роботи та покращити енергетичну ефективність насосної установки.

2.3 Висновки за розділом 2

У розділі визначено параметри схеми заміщення асинхронного двигуна та досліджено його статичні й динамічні характеристики. Встановлено, що система ПЧ–АД забезпечує жорсткі механічні характеристики, плавне регулювання швидкості та стабільну роботу насосної установки.

Для електропривода обрано двигун Wilo класу енергоефективності IE3, використання якого сприяє зниженню втрат електроенергії та підвищенню енергоефективності системи. Аналіз характеристик показав збереження високого ККД у робочому діапазоні частот, а моделювання перехідних процесів підтвердило плавний пуск і стійку роботу привода без значних перевантажень.

Отримані результати підтверджують відповідність розробленого електропривода вимогам насосної установки та його високу енергоефективність.

					КНУ.РБ.141.26.248с.10.Р2	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 3

ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ТА ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ

					КНУ.РБ.141.26.248с.10.РЗ							
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата								
Розроб.		Малиш Ю.М.			Розділ 3				Літ.		Арк.	Аркушів
Перевір.		Ільченко О.В.										
Реценз.									ЕМ гр. ЕЕМ-22-2			
Н. Контр.		Ільченко О.В.										
Затверд.		Пересунько І.І.										

3.1 Типові схеми електропостачання котельних та вибір трансформаторів

Електропостачання об'єкта здійснюється від об'єднаної енергосистеми України через повітряні лінії електропередачі напругою 110 кВ. На підстанції передбачено один ввід високої напруги та два силові трансформатори 115/10 кВ, які працюють паралельно (рис. 3.1).

Визначення споживаної потужності електроприймачів виконується на основі їх установленої потужності та відповідних коефіцієнтів попиту. Для вибору потужності силових трансформаторів проводиться розрахунок електричних навантажень, що базується на сумарній установленій потужності всіх споживачів електроенергії.

Для груп однотипних електроприймачів розрахунок робочого навантаження здійснюється за значеннями активної, реактивної та повної потужностей, які вони споживають.

Необхідна номінальна потужність трансформаторів визначається за величиною повної розрахункової потужності навантаження:

$$S_T = \frac{S}{\eta_M \cdot K_{ПВ}} . \quad (3.1)$$

При розгляді котельні прийнято встановлення трансформаторів, що є типовим для промислових і комунальних котелень малої та середньої потужності:

- трансформатор силовий ТДН-10000/110-У1 з обмоткою НН 10–11 кВ;
- два силові трансформатори ТМГ-630/10/0,4 кВ;
- трансформатор власних потреб ТСЗІ-2,5 кВА 380/220 В;
- трансформатор керування ОСМ1-0,4 кВА 220/24 В;
- комплект трансформаторів струму для обліку та захисту.

Наведемо паспортні дані трансформаторів, які встановлені на котельні (табл. 3.1).

					КНУ.РБ.141.26.248с.10.РЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Таблиця 3.1 - Паспортні параметри встановлених трансформаторів на котельні

Тип	S _н , кВА	U _н , кВ		Втрати, кВт		Напруга КЗ, u _к , %	Струм НХ, I _{НХ} , %
		U _{1н}	U _{2н}	ΔP _{xx}	ΔP _{кз}		
ТДН-10000/110-У1	10000	115	10	14	58	10,5	0,9
ТМГ-630/10/0,4-У1	630	10	0,4	1,0	7,6	5,5	1,7
ТСЗІ-2,5	2,5	0,380	0,220	0,05	0,120	3,8	18
ОСМ1-0,4 220/24 В	0,4	0,220	0,024	0,02	0,035	4,5	20

3.2 Силова апаратура котельні (РУ-6 кВ)

На розподільчому пристрої 6 кВ котельної розміщується силова апаратура, призначена для приймання, розподілу та комутації електроенергії, захисту електрообладнання від перевантажень і коротких замикань, а також забезпечення безпечного та надійного функціонування системи електропостачання.

3.2.1 Комірка КРУ-6 кВ

Підберемо комірку КРУ-6 кВ для котельної (з вакуумним вимикачем, роз'єднувачем/заземлювачем, ТТ і ТН). Вона призначена для:

- приймання та розподілу електроенергії;
- комутації силових кіл;
- захисту обладнання від коротких замикань і перевантажень;
- вимірювання електричних параметрів.

Для котельної установки приймається комірка КРУ-6 кВ у складі:

- вакуумний вимикач Siemens 3АН / ABB VD4;
- вбудований трипозиційний роз'єднувач із заземлювачем;
- трансформатори струму 600/5 А;
- трансформатор напруги 6/√3 кВ / 100 В;

					КНУ.РБ.141.26.248с.10.РЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

- релейний захист (МТЗ та відсічка).

Можливі різні варіанти комірок, характеристики яких зведені у табл. 3.2

Таблиця 3.2 – Параметри комірки КРУ К-104-6(10)-20-630 УЗ

Параметр	RM6 Schneider Electric	Siemens 8DJH	КРУ К-63	КРУ2-10
Тип	GIS	GIS	AIS	AIS
Напруна номінальна, кВ	6-10	до 12	6-10	6-10
Струм, А	630	630	630-1600	630-3100
Струм КЗ, кА	до 25	до 25	до 31,5	до 31,5
Ціна, грн	685467	-	-	-

Для РУ-6 кВ котельної прийнято комплектне розподільче пристрій типу КРУ2-10 у викатному виконанні. Обрана комірка забезпечує приймання та розподіл електроенергії, встановлення вакуумних вимикачів, трансформаторів струму і напруги, а також реалізацію релейного захисту та блокувань.

3.2.2 Вимикачі високої напруги

Основним комутаційним пристроєм, що використовується для вмикання та вимикання навантаження, а також відключення струмів короткого замикання, є високовольтний вимикач. У мережах напругою 6–10 кВ найбільшого поширення набули вакуумні та елегазові вимикачі, зокрема ВВ/TEL-10, Siemens 3АН та Schneider Electric Evolis.

Встановлюємо вакуумний вимикач Siemens 3АН5, паспортні дані якого приведені у табл. 3.3.

					КНУ.РБ.141.26.248с.10.РЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Таблиця 3.3 – Параметри Siemens 3AH5

№ з/п	Параметри	Значення
1	Номінальна напруга	7,2-12 кВ
2	Найбільша робоча напруга	12 кВ
3	Номінальний струм	1250 А
4	Номінальний струм відключення КЗ	31,5 кА
5	Струм термічної стійкості	до 40 кА
6	Струм електродинамічної стійкості	до 100 кА
7	Час відключення	≤ 60 мс
8	Час включення	≤ 75 мс
9	Тип приводу	Пружинно-моторний
10	Механічний ресурс	до 30 000 циклів
11	Комутаційний ресурс	до 10 000 операцій

Для розподільчого пристрою 10 кВ котельної доцільно прийняти вимикач Siemens 3AH5, який забезпечують надійний захист силових трансформаторів, секцій шин та електроприймачів котельної.

3.2.3 Заземлювачі

У сучасних розподільчих пристроях 6 кВ застосовуються вбудовані заземлювальні пристрої, інтегровані в комірочки КРУ, а також заземлювальні ножі роз'єднувачів. Як функціональні аналоги роз'єднувачів типу RB3-10/630 використовуються трипозиційні комутаційні апарати або вбудовані заземлювачі в КРУ типу Siemens 8DJH, ABB SafePlus та Schneider Electric SM6. Вони забезпечують надійне заземлення відключених ділянок електричної мережі, можливість безпечного проведення ремонтних робіт та підвищення загального рівня електробезпеки електроустановки котельної.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

3.2.4 Реактори

Для котельні на стороні 6 кВ доцільно застосовувати сухі струмообмежувальні реактори типу РТСТ-6(10)-400-0,6 з номінальним струмом 400–600 А. Вони забезпечують обмеження струмів короткого замикання, підвищують електродинамічну стійкість обладнання та покращують надійність роботи системи електропостачання.

При струмі КЗ = 5кА вибираємо реактор РТСТ-6(10)-400-0,6 (див. табл. 3.4).

Таблиця 3.4 – Параметри реактора РТСТ-6(10)-400-0,6

№ з/п	Параметри	Значення
1	Номінальна напруга	6-10 кВ
2	Індуктивний опір	0,6 Ом
3	Номінальний струм	400 А
4	Струм КЗ	до 5-6 кА

Для обмеження струмів короткого замикання на стороні 6 кВ котельної прийнято сухий струмообмежувальний реактор типу РТСТ-6(10)-400-0,6. Реактор забезпечує зниження рівня струмів КЗ, підвищення електродинамічної стійкості обладнання та надійну роботу розподільчої мережі.

3.2.5 Вибір шин струмоведучих 6 кВ

Для установок доцільно застосовувати алюмінієві шини.

Визначимо лінійний струм вторинної обмотки трансформатора ТДН-10000/110-У1 з обмоткою НН 10–11 кВ, до якого підключені шини секції:

$$I_H = \frac{S_H}{\sqrt{3} \cdot U_H} = \frac{10000}{\sqrt{3} \cdot 10} = 577 \text{ А.} \quad (3.2)$$

За розрахунковим струмом 600 А приймаємо мідні шини прямокутного перерізу 40×5 мм. Допустимий тривалий струм таких шин становить 700 А,

					КНУ.РБ.141.26.248с.10.РЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

що перевищує розрахунковий струм навантаження та забезпечує необхідний запас по нагріванню, відстані при установці: $L=0,8$ м (між ізоляторами), $a=0,2$ м (між самими шинами).

1) Перевірка шин струмоведучих за економічним перерізом (3.4):

$$S_{EK} = \frac{I_H}{J_{EK}} = \frac{600}{2,0} = 300 \text{ мм}^2,$$

де $J_{EK}=2,0$ А/мм² – задана економічна щільність струму.

Умова не виконується:

$$200 < 300 \text{ мм}^2.$$

Тобто шина 40×5 мм не відповідає економічному перерізу. Зі стандартного ряду обрано мідні шини 60×5 мм перерізом 300 мм². Фактична густина струму дорівнює 2,0 А/мм², що відповідає економічно доцільному режиму роботи шинопроводу.

2) Перевірка шин струмоведучих до механічних навантажень:

Електродинамічна сила, яка діє на шину:

$$F = 1,76 \cdot I_y^2 \cdot \frac{l}{a} \cdot 0,1 = 1,76 \cdot 15^2 \cdot \frac{25}{15} \cdot 0,1 = 66 \text{ Н}, \quad (3.3)$$

де I_y , кА- ударний струм КЗ (див. табл. 3.4) ;

l – відстань між ізоляторами, см;

a – відстань між шинами, см.

Вигинаючий момент:

$$M = F \cdot l = 66 \cdot 25 = 1650 \text{ Нсм}; \quad (3.4)$$

момент опору шини відносно вісі:

$$W = \frac{b \cdot h^2}{6} = \frac{0,5 \cdot 6,0^2}{6} = 3 \text{ см}^3. \quad (3.5)$$

Напруження, що виникає в шині:

$$\sigma_{роз} = \frac{M}{W} = \frac{1650}{3} = 550 \text{ Н/см}^2 = 44,4 \text{ МПа}. \quad (3.6)$$

Умова виконується:

$$44,4 < 140 \text{ МПа},$$

					КНУ.РБ.141.26.248с.10.РЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

де $\sigma_{\text{доп}} = 140$ МПа – допустиме напруження в шині.

Обрана шина 60×5 мм є електродинамічно стійкою до дії струмів короткого замикання з коефіцієнтом запасу за механічною міцністю $k=3,15$.

3) Перевірка шин струмоведучих на термічну стійкість:

$$S_{III} = \frac{I_{\infty} \cdot \sqrt{t}}{C} = \frac{5500 \cdot \sqrt{1}}{143} = 38,5 \text{ мм}^2. \quad (3.7)$$

Умова виконується:

$$38,5 < 300 \text{ мм}^2.$$

Для РУ-10 кВ котельні обрано мідні шини перерізом 60×5 мм. Перевіркою встановлено, що мінімально допустимий переріз за умовою термічної стійкості при струмі короткого замикання 5,5 кА та часі його відключення 1 с становить 38,5 мм². Фактичний переріз шини дорівнює 300 мм², що значно перевищує необхідне значення. Отже, обрана мідна шина 60×5 мм є термічно стійкою до дії струмів короткого замикання..

3.3 Розрахунок струмів короткого замикання в мережі 0,4 кВ

Враховуємо паспортні значення трансформаторів (див. табл. 3.1).

Розрахунок опорів схеми заміщення мережі зведено у табл. 3.5 та 3.6.

Таблиця 3.5 – Розрахунок опорів схеми заміщення мережі

№ з/п	Назва параметру	Розрахунковий вираз	Номер виразу
1	Базисний струм	$I_B = \frac{S_B}{1,73 \cdot U_B}$	(3.8)
2	Індуктивний опір трансформатора ТДН-10000/110-У1, ТМГ-630/10/0,4-У1	$X_{TP} = \frac{u_{\kappa} \% \cdot S_B}{100 \cdot S_H}$	(3.9)
3	Активний опір трансформатора ТДН-10000/110-У1,	$r_{TP} = \frac{\Delta P_M \cdot S_B}{S_H \cdot S_H}$	(3.10)

									Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата					

КНУ.РБ.141.26.248с.10.РЗ

№ з/п	Назва параметру	Розрахунковий вираз	Номер виразу
	ТМГ-630/10/0,4-У1		
4	Індуктивний опір кабельної лінії	$X_{*L} = \frac{X_{ол} \cdot l_{л} \cdot S_B}{U_B^2}$	(3.11)
5	Активний опір кабельної лінії	$r_{*L} = \frac{r_{ол} \cdot l_{л} \cdot S_B}{U_B^2}$	(3.12)
6	Результуючий реактивний опір до точки КЗ	$X_{\sum 0,4} = X_{TP1} + X_{TP2} + X_{*L}$	(3.13)
7	Результуючий активний опір до точки КЗ	$r_{\sum 0,4} = r_{TP1} + r_{TP2} + r_{*L}$	(3.14)
8	Повний опір до точки КЗ	$z = \sqrt{X_{\sum 0,4}^2 + r_{\sum 0,4}^2}$	(3.15)
9	Сталий струм короткого замикання в точці КЗ	$I_{K3} = \frac{I_B}{z}$	(3.16)
10	Ударний струм в точці КЗ	$I_y = 1,41 \cdot 1,8 \cdot I_{K3}$	(3.17)

Таблиця 3.6 – Розрахунок опорів схеми заміщення мережі

№ з/п	Назва параметру	Розрахунковий вираз та величина параметру	Одиниця вимірювання
1	Базисний струм	$I_6 = \frac{100}{1,73 \cdot 0,4} = 144,338$	144,338 кА
2	Індуктивний опір трансформатора ТДН-10000/110-У1, ТМГ-630/10/0,4-У1	$X_{TP1} = \frac{10,5 \cdot 100 \cdot 10^6}{100 \cdot 10000 \cdot 10^3} = 1,05$ $X_{TP2} = \frac{5,5 \cdot 100 \cdot 10^6}{100 \cdot 630 \cdot 10^3} = 8,73$	1,05 8,73

№ з/п	Назва параметру	Розрахунковий вираз та величина параметру	Одиниця вимірювання
3	Активний опір трансформатора ТДН-10000/110-У1, ТМГ-630/10/0,4-У1	$r_{\text{тр1}} = \frac{58000 \cdot 100 \cdot 10^6}{10000 \cdot 10000 \cdot 10^6} = 0,058$ $r_{\text{тр2}} = \frac{7600 \cdot 100 \cdot 10^6}{630 \cdot 630 \cdot 10^6} = 1,915$	0,058 1,915
4	Індуктивний опір кабельної лінії ВВГнг-LS 4x10 мм², де $X_{0к}$ питомий опір	$X_L = \frac{0,1 \cdot 0,025 \cdot 100}{0,4^2} = 1,563$ $X_0 = 0,1 \text{ Ом/км,}$ $l = 0,025 \text{ км}$	1,563
5	Активний опір кабельної лінії ВВГнг-LS 4x10 мм², де $r_{0к}$ питомий опір	$r_L = \frac{1,75 \cdot 0,025 \cdot 100}{0,4^2} = 27,344$ $R_0 = 1,75 \text{ Ом/км,}$ $l = 0,025 \text{ км}$	27,344
6	Результуючий реактивний опір до точки КЗ	$X_{\Sigma 0,4} = 1,05 + 8,73 + 1,563 = 11,343$	11,343
7	Результуючий активний опір до точки КЗ	$r_{\Sigma 0,4} = 0,058 + 1,915 + 27,344 = 29,317$	29,317
8	Повний опір до точки КЗ	$z = \sqrt{11,343^2 + 29,317^2} = 31,435$	31,435
9	Сталий струм короткого	$I_{\text{КЗ}} = \frac{144,338}{31,434} = 4,6$	4,6 кА

№ з/п	Назва параметру	Розрахунковий вираз та величина параметру	Одиниця вимірювання
	замикання в точці КЗ		
10	Ударний струм в точці КЗ	$I_y = 1,41 \cdot 1,8 \cdot 4,6 = 11,675$	11,675 кА

3.4 Розрахунок кабельної мережі 0,4 кВ

Проведемо вибір кабелю для підключення насоса Wilo CronoLine IL 80/170-22/2-IE3; струм двигуна – 34,5 А.

Для живлення асинхронного двигуна потужністю 22 кВт та номінальним струмом 34,5 А приймаємо мідний кабель типу ВВГнг-LS 4х10 мм² та має параметри: $R_0 = 1,75$ Ом/км, $X_0 = 0,1$ Ом/км.

1) Перевірка кабелю за допустимим тривалим струмом:

$$I_{\text{доп}} \geq I_p, \quad (3.18)$$

де $I_p = 35$ А – розрахунковий струм двигуна;

$I_{\text{доп}} \approx 55 - 68$ А – струм для кабелю ВВГнг-LS 4х10 мм².

Умова виконується:

$$55 > 35 \text{ А.}$$

2) Перевірка за допустимими втратами напруги.

Припустима втрата напруги:

$$\begin{aligned} \Delta U &= \frac{\sqrt{3} \cdot I \cdot L \cdot (R \cdot \cos \varphi + X \cdot \sin \varphi)}{U_H} \cdot 100\% = \\ &= \frac{1,73 \cdot 35 \cdot 0,025 \cdot (1,75 \cdot 0,85 + 0,1 \cdot 0,53)}{380} \cdot 100\% \approx 1,3\% \end{aligned} \quad (3.19)$$

де $L = 25$ м - довжина кабелю;

$\cos \varphi = 0,85$ - середньозважений коефіцієнт потужності;

$U_H = 380$ В – номінальна напруга.

					КНУ.РБ.141.26.248с.10.РЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Допустимі втрати напруги для силових мереж не повинні перевищувати 5 %. Умова виконується:

$$1,3\% < 5\%.$$

3) Перевірка за економічною густиною струму.

Значення економічної густини струму для мідних кабелів $J_{ЕК} = 3,5$ А/мм²:

$$S_{ек} = \frac{I}{J_{ЕК}} = \frac{35}{3,5} = 10 \text{ мм}^2. \quad (3.20)$$

Вибраний кабель ВВГнг-LS 4x10 мм² пройшов перевірку за економічною густиною струму.

4) Перевірка на термічну стійкість до струмів короткого замикання.

Умова перевірки:

$$S_{\min} \geq \frac{I_{\infty} \cdot \sqrt{t}}{C} = \frac{2500 \cdot \sqrt{0,2}}{115} = 9,7 \text{ мм}^2, \quad (3.21)$$

де $I_{\infty} = 6690$ А – струм короткого замикання;

$t = 0,2$ с - час відключення захисного;

$C = 115$ – коефіцієнт для мідних жил з ПВХ ізоляцією.

Умова виконується:

$$9,7 < 10 \text{ мм}^2.$$

Отже, для живлення двигуна доцільно застосувати кабель ВВГнг-LS 4x10 мм², який задовольняє умовам допустимого тривалого струму навантаження, допустимих втрат напруги, економічної густини струму та термічної стійкості до струмів короткого замикання.

3.5 Комплекс електричних захистів двигуна Wilo

Для асинхронного двигуна Wilo потужністю 22 кВт, напругою 380 В та номінальним струмом 35 А необхідно передбачити комплекс електричних захистів, які забезпечують безпечну та надійну роботу електропривода.

					КНУ.РБ.141.26.248с.10.РЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Для забезпечення надійної роботи асинхронного електродвигуна насосної установки передбачено комплекс електричних та теплових захистів, що включає контроль фазних режимів, напруги живлення, тривалості пуску та температурного стану обмоток. Реалізація захистів виконана на базі сучасних електронних реле, що забезпечують своєчасне відключення двигуна при виникненні аварійних режимів та підвищують загальну надійність електропривода.

1) Захист АД від короткого замикання.

Оскільки двигун Wilo живиться від частотного перетворювача, тепловий захист двигуна налаштовується за його номінальним струмом $I_{HD} = 35$ А. Номінальний струм частотного перетворювача $I_{HПЧ} = 45$ А враховується при виборі апаратів захисту та комутації на стороні живлення перетворювача. Таким чином, для розрахунку захисту електродвигуна приймається струм 35 А, а для вибору вхідного автоматичного вимикача — струм 45 А.

Струм спрацювання автоматичного вимикача:

$$I_{ABT} \geq 1,25 \cdot I_{HПЧ} . \quad (3.22)$$

$$I_{ABT} = 1,25 \cdot I_{HПЧ} = 1,25 \cdot 45 = 56,25 \text{ А}.$$

Будемо розглядати установку автоматичного вимикача на стандартний найближчий номінал по струму 50 А, який забезпечить комутацію електричного кола, аварійне відключення двигуна, захист від КЗ, захист від перевантаження, .

Для захисту АД (напруга живлення 380 В) вибрано автоматичний вимикач типу Schneider Electric Acti9 iC60N D63 3P:

- кількість полюсів – 3P;
- номінальний струм 63 А;
- вимикальна здатність 6 (або 10 кА);
- тепловий та електромагнітний розчеплювач;
- механічна зносостійкість – до 20000 циклів;
- електрична зносостійкість – до 10000 циклів.

					КНУ.РБ.141.26.248с.10.РЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Для схеми прямого пуску асинхронного двигуна номінальним струмом 35 А обрано автоматичний вимикач Schneider Electric Acti9 iC60N D50 3P. Характеристика D забезпечує неспрацювання автомата під час проходження пускових струмів двигуна.

Для схеми електропривода з частотним перетворювачем номінальним струмом 45 А обрано автоматичний вимикач Schneider Electric Acti9 iC60N C63 3P. Номінальний струм автомата перевищує розрахунковий струм навантаження, а характеристика C забезпечує надійний захист перетворювача частоти та живильної мережі.

2) Вибір електромагнітного розчіплювача.

Пусковий струм асинхронного двигуна Wilo:

$$I_{\Pi} = 6,7 \cdot I_H = 6,7 \cdot 35 = 234,5 \text{ А.} \quad (3.23)$$

Уставка миттєвого електромагнітного захисту:

$$I_{EM} = 1,2 \cdot I_{\Pi} = 1,2 \cdot 234,5 = 281,4 \text{ А.} \quad (3.24)$$

Для автомата Schneider Acti9 iC60N D50 його миттєве спрацювання відбувається в діапазоні:

$$I_{EM} = 500 - 1000 \text{ А.}$$

3) Тепловий захист від перевантаження двигуна Wilo.

Теплове реле вибирають за умовою:

$$I_{TP} = 1,1 \cdot I_H = 1,1 \cdot 35 = 38,5 \text{ А.} \quad (3.25)$$

Приймаємо уставку теплового реле:

$$I_{уст} = 50 \text{ А.}$$

Для захисту асинхронного двигуна Wilo від тривалих перевантажень вибрано теплове реле Schneider Electric LRD35 (або ABB TA75DU-50, або IEK РТІ-3355) з діапазоном регулювання струму до 50 А.

Реле забезпечує захист двигуна від тривалих перевантажень і перегріву обмоток.

4) Захист від обриву та перекосу фаз.

					КНУ.РБ.141.26.248с.10.РЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Для асинхронного двигуна насоса Wilo з номінальним струмом 35 А передбачено захист від аварій, пов'язаних із порушенням симетрії живлення. Такий захист виконується за допомогою реле контролю фаз, яке забезпечує контроль наявності всіх трьох фаз, правильності їх чергування, а також виявлення перекосу та зникнення фазної напруги.

Як варіант сучасних аналогів можуть застосовуватись реле CZF-332, Carlo Gavazzi DPA51, Finder 70.61

Прийнято реле контролю фаз CZF-332 з регульованою витримкою часу спрацювання 0,1–10 с.

5) Мінімальний захист напруги

Мінімальний захист напруги призначений для запобігання самозапуску електродвигуна після відновлення живлення, а також для захисту обмоток статора від перегріву при тривалій роботі в режимі пониженої напруги.

Уставка мінімальної напруги визначається виходячи з допустимого діапазону роботи двигуна:

$$U_{\min} = (0,75 - 0,8) \cdot U_H = 290 - 300 \text{ В.} \quad (3.26)$$

Для реалізації цього захисту можуть застосовуватись DigiTOP VP-380V, ZUBR D2-40, Schneider RM17UBE. Прийнято реле контролю напруги DigiTOP VP-380V з діапазоном контролю 50–400 В та часом спрацювання 0,02–5 с.

6) Захист від затягнутого пуску двигуна Wilo

Для забезпечення коректної роботи пускових режимів асинхронного двигуна передбачено захист від затягнутого пуску, який реалізується за допомогою реле часу. Воно обмежує тривалість пускового процесу та може використовуватись для реалізації логіки автоматичного керування насосною установкою (затримка ввімкнення, чергування насосів, блокування повторних пусків).

Можливі аналоги Schneider Electric RE22R1QCMU, Omron H3CR-A, Finder 80.01. Прийнято реле часу Schneider Electric RE22R1QCMU з діапазоном витримки часу 0,1 с – 100 год.

					КНУ.РБ.141.26.248с.10.РЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

7) Захист від перегріву обмоток двигуна Wilo

Для контролю теплового стану обмоток асинхронного двигуна застосовується температурний захист на основі РТС-датчиків, що вбудовуються в обмотки статора. При перевищенні допустимої температури реле температурного контролю формує сигнал на відключення двигуна.

Можливі сучасні аналоги ETI TER-7, Siemens 3RN2, Carlo Gavazzi TCS. Прийнято реле температурного контролю ETI TER-7 з РТС-датчиками, що забезпечує своєчасне відключення двигуна при перегріві та підвищує надійність роботи насосної установки.

Усі захисти зведемо у таблицю 3.5.

Таблиця 3.5 - Захисти асинхронного електродвигуна насосної установки

Вид захисту	Призначення	Прийнятий пристрій	Параметри
Захист від обриву, перекосу та чергування фаз	Контроль симетрії трифазної мережі, запобігання роботі двигуна в аварійних режимах живлення	Реле контролю фаз CZF-332	Час спрацювання 0,1–10 с; контроль перекосу, обриву та чергування фаз
Захист від зниження напруги	Відключення двигуна при зниженій напрузі, запобігання перегріву обмоток та самозапуску	Реле контролю напруги DigiTOP VP-380V	Діапазон 50–400 В; час спрацювання 0,02–5 с
Захист від затягнутого пуску	Обмеження тривалості пускового режиму, реалізація логіки керування насосом	Реле часу Schneider RE22R1QCMU	Діапазон витримки 0,1 с – 100 год
Захист від перегріву обмоток	Контроль температури обмоток та аварійне відключення при перегріві	Реле температурного контролю ETI TER-7	РТС-датчики, контроль температури статора,

			автоматичне відключення
--	--	--	----------------------------

3.6 Висновки за розділом 3

У розділі виконано аналіз та проєктування системи електропостачання котельної установки з урахуванням вимог надійності та енергоефективності.

Обґрунтовано вибір основного електрообладнання: трансформатор силовий ТДН-10000/110-У1 з обмоткою НН 10–11 кВ, два силові трансформатори ТМГ-630/10/0,4 кВ, трансформатор власних потреб ТСЗІ-2,5 кВА 380/220 В, трансформатор керування ОСМ1-0,4 кВА 220/24 В.

Проведено аналіз нормальних та аварійних режимів роботи мережі, включаючи короткі замикання, що дозволило оцінити її надійність і стійкість.

На основі розрахунків струмів короткого замикання виконано вибір кабельних ліній, шин та комутаційної апаратури, а також підібрано захисти електродвигунів від основних аварійних режимів.

У результаті сформовано надійну та безпечну систему електропостачання котельної.

					КНУ.РБ.141.26.248с.10.Р3	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Виконано аналіз технологічного процесу котельної установки, розглянуто склад основного електромеханічного обладнання насосної установки, а також засоби контролю, керування та автоматизації технологічних процесів.

2. Обґрунтовано вибір насосного агрегату Wilo IL 80/170-22/2 та асинхронного електродвигуна потужністю 22 кВт класу енергоефективності IE3, що забезпечує надійну роботу установки та зниження експлуатаційних витрат.

3. Для регулювання продуктивності насосної установки обрано систему електропривода «перетворювач частоти – асинхронний двигун» на базі перетворювача частоти ABB ACS580-01-046A-4, яка забезпечує плавний пуск, регулювання швидкості та зменшення пускових струмів.

4. Розраховано параметри схеми заміщення асинхронного двигуна та досліджено його механічні, електромеханічні й енергетичні характеристики. Встановлено, що застосування частотного керування забезпечує стабільну роботу електропривода в широкому діапазоні регулювання швидкості.

5. Розроблено математичну модель електропривода насосної установки в середовищі MATLAB/Simulink та досліджено перехідні процеси. Результати моделювання підтвердили плавний характер пуску, відсутність значних перевантажень і високу якість регулювання координат електропривода.

6. Виконано аналіз та проектування системи електропостачання котельної установки, обґрунтовано вибір силових трансформаторів, трансформаторів власних потреб, комутаційної апаратури та кабельних ліній.

					КНУ.РБ.141.26.248с.10.3В					
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						
Розроб.		Малиш Ю.М.			Загальні висновки			Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.		Ільченко О.В.								
Реценз.								ЕМ гр. ЕЕМ-22-2		
Н. Контр.		Ільченко О.В.								
Затверд.		Пересунько І.І.								

7. Проведено розрахунок струмів короткого замикання, за результатами якого здійснено вибір електрообладнання та засобів захисту електродвигунів від перевантажень, коротких замикань, втрати та перекосу фаз.

8. Розроблені технічні рішення забезпечують надійну, безпечну та енергоефективну роботу насосної установки в умовах котельної, а також відповідають вимогам сучасних систем електропривода та електропостачання.

					КНУ.РБ.141.26.248с.10.3В	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДСТУ EN 60034-30-1:2017. Машины електричні обертові. Класи енергоефективності двигунів змінного струму. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2018. 25 с.
2. ДСТУ ІЕС 60034-1:2019. Машины електричні обертові. Частина 1. Номінальні дані та характеристики. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2019. 42 с.
3. ДСТУ EN 61800-2:2015. Системи електроприводів зі змінною швидкістю. Загальні вимоги до перетворювачів частоти. Київ : Мінекономрозвитку України, 2016. 58 с.
4. Правила улаштування електроустановок. Харків : Форт, 2017. 760 с.
5. Браславський О. В. Електропривод насосних та вентиляційних установок : навч. посіб. Київ : НТУУ «КПІ», 2020. 256 с.
6. Бурбело М. Й., Савенко О. І. Електричні машини : підручник. Вінниця : ВНТУ, 2019. 318 с.
7. Костишин В. С. Теорія електропривода : підручник. Львів : Новий Світ-2000, 2021. 312 с.
8. Кузьмін О. В. Електропостачання промислових підприємств : навч. посіб. Харків : Факт, 2020. 420 с.
9. Сегеда М. С. Електричні мережі та системи : підручник. Львів : Львівська політехніка, 2018. 540 с.
10. Малащенко В. О., Говорущенко М. Ю. Автоматизація технологічних процесів теплоенергетичних установок : навч. посіб. Київ : Каравела, 2018. 274 с.
11. Chapman S. J. Electric Machinery Fundamentals. 5th ed. New York : McGraw-Hill, 2012. 688 p.
12. Fitzgerald A. E., Kingsley C., Umans S. D. Electric Machinery. 7th ed. New York : McGraw-Hill, 2013. 704 p.

					КНУ.РБ.141.26.248с.10.СД					
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						
Розроб.		Малиш Ю.М.			Список джерел			Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.		Ільченко О.В.								
Реценз.								ЕМ гр. ЕЕМ-22-2		
Н. Контр.		Ільченко О.В.								
Затверд.		Пересунько І.І.								

13. Wilo SE. CronoBloc-BL. Single-stage low-pressure centrifugal pumps : Technical catalogue. URL: [Wilo Official Website](#) (дата звернення: 08.06.2026)..

14. Wilo SE. CronoBloc BL 100/300 : Product documentation and technical data. Електронний ресурс. URL: Wilo Product Finder (дата звернення: 08.06.2026).

					КНУ.РБ.141.26.248с.10.СД	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		