

Здобувач: Хомякова Аліна Русланівна

Керівник: Барановська М.Л.

Тема: Електромеханічне обладнання конденсатного насоса WILO BL 100/300 котлотурбінного цеху АТ «Криворізька теплоцентрально»

РЕФЕРАТ

Бакалаврська робота присвячена дослідженню та проектуванню електромеханічного обладнання конденсатного насоса WILO BL100/300 котлотурбінного цеху АТ Криворізька теплоцентрально.

У першому розділі виконано аналіз технологічного процесу котлотурбінного цеху та наведено характеристику основного обладнання конденсатної насосної установки. Розглянуто принцип роботи насосного агрегата, засоби автоматизації, контрольно-вимірювальні прилади та виконавчі механізми системи керування.

У другому розділі здійснено вибір основного обладнання електропривода насосної установки. За технічними параметрами насоса обрано асинхронний двигун WEG W22 180 M4 класу енергоефективності IE3. Для керування електроприводом обрано перетворювач частоти Schneider Electric ATV630D18N4. Виконано розрахунок параметрів схеми заміщення асинхронного двигуна, побудовано механічні та енергетичні характеристики. Проведено математичне моделювання режимів роботи електропривода у середовищі MATLAB Simulink із використанням бібліотеки SimPowerSystems. Досліджено перехідні процеси під час пуску та регулювання швидкості насосного агрегата.

У третьому розділі виконано проектування системи електропостачання котлотурбінного цеху. Проведено вибір силових трансформаторів, кабельних ліній, струмопровідних шин, комутаційної апаратури та засобів релейного захисту. Розраховано струми короткого замикання та проаналізовано режими роботи системи електропостачання в нормальних і аварійних умовах.

У результаті виконаних досліджень встановлено, що застосування частотно-регульованого електропривода забезпечує зниження пускових струмів, підвищення плавності роботи насосної установки, зменшення механічних навантажень та скорочення споживання електроенергії. Отримані результати підтверджують ефективність використання сучасних систем частотного регулювання для підвищення надійності та енергоефективності роботи насосних агрегатів теплоелектроцентралей.

АСИНХРОННИЙ ДВИГУН, ПЕРЕТВОРЮВАЧ ЧАСТОТИ, КОНДЕНСАТНИЙ НАСОС, ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ, MATLAB SIMULINK, ТЕПЛОЕЛЕКТРОЦЕНТРАЛЬ

ВСТУП

У сучасних умовах розвитку енергетики України особливої актуальності набувають питання підвищення ефективності електромеханічних систем та скорочення енергоспоживання промислових і комунальних підприємств. Значення цих питань суттєво посилилося в умовах повномасштабної війни, коли енергетична система держави зазнає значних пошкоджень унаслідок атак на об'єкти критичної інфраструктури. За таких умов забезпечення безперебійної роботи систем теплопостачання, водопостачання та енергозабезпечення є необхідною умовою стабільного функціонування промисловості та підтримання життєдіяльності населення.

В умовах воєнного стану енергетична безпека стала одним із ключових напрямів розвитку держави. Постійні перевантаження енергосистеми, аварійні відключення електроенергії та нестача генеруючих потужностей обумовлюють необхідність модернізації теплоелектроцентралей, котелень, насосних станцій та інших об'єктів теплоенергетики. Значна частина обладнання таких підприємств експлуатується тривалий час і характеризується високим ступенем фізичного та морального зношення. У результаті насосні, вентиляційні та інші електромеханічні установки працюють із недостатньою ефективністю та підвищеними витратами електроенергії.

Важливу роль у функціонуванні енергетичної системи відіграють теплоелектроцентралі, які забезпечують споживачів тепловою та електричною енергією. У сучасних умовах стабільна робота ТЕЦ має особливе значення, насамперед у осінньо-зимовий період. Пошкодження енергетичних об'єктів зумовило потребу у впровадженні сучасних систем автоматизації та підвищенні надійності роботи технологічного обладнання. Одним із найбільш

ефективних напрямів модернізації є використання частотно-регульованих електроприводів у насосних та вентиляційних установках.

Сучасні перетворювачі частоти забезпечують автоматичне регулювання швидкості асинхронних двигунів відповідно до вимог технологічного процесу. Це дозволяє реалізувати плавний пуск електродвигунів, підтримувати необхідні параметри роботи системи, знижувати пускові струми та оптимізувати режими роботи обладнання. На теплоелектроцентралях частотно-регульовані електроприводи широко застосовуються для керування насосами різного призначення, вентиляторами, димососами, компресорними та водопідготовчими установками.

Застосування систем частотного регулювання дає змогу значно скоротити споживання електричної енергії насосними та вентиляційними агрегатами, а також підвищити надійність їх роботи. Крім енергозбереження, такі системи забезпечують плавність роботи обладнання, зменшують механічні навантаження та зношення насосів, трубопроводів і запірної арматури. Додатковою перевагою є можливість автоматичного відновлення роботи після аварійних відключень та організації дистанційного контролю й керування обладнанням.

Відомо, що значна частка електроенергії промислових підприємств споживається електродвигунами змінного струму, серед яких найбільш поширеними є асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором. Використання традиційних нерегульованих електроприводів і дросельного регулювання продуктивності насосів супроводжується значними втратами електроенергії. Натомість частотне регулювання дозволяє змінювати продуктивність насосних установок шляхом регулювання швидкості обертання двигуна, що суттєво підвищує ефективність роботи системи.

Таким чином, впровадження частотно-регульованих електроприводів на об'єктах теплоенергетики є важливим напрямом модернізації енергетичної галузі України. Використання сучасних енергоефективних технологій сприяє підвищенню надійності роботи обладнання, скороченню енергоспоживання та

забезпеченню стабільного функціонування об'єктів критичної інфраструктури в умовах воєнного часу.

Об'єкт дослідження – електромеханічне обладнання конденсатного насоса WILO BL100/300 котлотурбінного цеху АТ Криворізька теплоцентраль.

Предмет дослідження – режими роботи, механічні та енергетичні характеристики частотно-регульованого асинхронного електропривода конденсатного насоса, а також система його електропостачання та релейного захисту.

Мета роботи – дослідження електромеханічного обладнання конденсатного насоса WILO BL100/300, вибір та аналіз сучасного частотно-регульованого електропривода і проєктування системи електропостачання котлотурбінного цеху для підвищення енергоефективності, надійності та якості роботи насосної установки.

Завдання дослідження:

1. Провести аналіз технологічного процесу роботи конденсатного насоса котлотурбінного цеху АТ Криворізька теплоцентраль та дослідити особливості його електромеханічного обладнання.

2. Виконати вибір основного електромеханічного обладнання насосної установки, зокрема асинхронного двигуна WEG W22 180 M4 та перетворювача частоти Schneider Electric ATV630D18N4.

3. Розробити систему частотно-регульованого електропривода конденсатного насоса на базі системи ПЧ – АД.

4. Розрахувати параметри схеми заміщення асинхронного двигуна та побудувати механічні й енергетичні характеристики електропривода.

5. Дослідити режими роботи та регульовальні характеристики системи ПЧ – АД.

6. Виконати математичне моделювання електропривода насосної установки у середовищі MATLAB Simulink та проаналізувати перехідні процеси під час пуску і регулювання швидкості.

7. Провести аналіз енергетичних характеристик та оцінити енергоефективність частотно-регульованого електропривода.

8. Виконати розрахунок системи електропостачання котлотурбінного цеху, струмів короткого замикання та здійснити вибір елементів релейного захисту й комутаційної апаратури. Здійснити вибір комутаційної апаратури, кабельних ліній і засобів релейного захисту електродвигуна.

Методи дослідження – методи теорії електропривода, електричних машин та електропостачання; аналітичні методи розрахунку електричних кіл і параметрів асинхронного двигуна; методи математичного моделювання та комп'ютерного аналізу режимів роботи електропривода із застосуванням програмного середовища MATLAB Simulink і бібліотеки SimPowerSystems.

Наукова новизна роботи полягає у дослідженні та аналізі режимів роботи частотно-регульованого електропривода конденсатного насоса WILO BL100/300 з асинхронним двигуном WEG W22 180 M4 в умовах котлотурбінного цеху АТ Криворізька теплоцентраль, а також у визначенні впливу частотного регулювання на енергетичні характеристики, плавність перехідних процесів та підвищення енергоефективності насосної установки.

1.1 Технологічна схема котлотурбінного цеху конденсатного насоса АТ Криворізька теплоцентраль

Технологічна схема котлотурбінного цеху (КТЦ) конденсатного насоса показана на рис. 1.1.

Під час роботи бойлерів, теплообмінників і деаераторів водяна пара охолоджується та перетворюється на конденсат, який збирається у резервуарах. Для його відведення та повернення в систему теплопостачання застосовуються конденсатні насоси КН-1 – КН-4.

Основним призначенням системи збору та перекачування конденсату є:

- відведення та транспортування конденсату;
- підтримання безперервної циркуляції рідини;
- повернення конденсату для повторного використання;
- підтримання необхідного рівня рідини в резервуарах;
- запобігання переповненню та роботі насосів «всуху».

Повторне використання конденсату дозволяє зменшити витрати води та теплової енергії, оскільки конденсат має високу температуру.

До складу установки входять:

- конденсатні насоси КН-1 – КН-4;
- резервуари збору конденсату;
- трубопроводи;
- електроприводи насосів;
- регулюючі клапани;
- система автоматичного регулювання рівня;
- система сигналізації та захисту.

Насоси працюють в автоматичному, дистанційному та ручному режимах. Для приводу використовуються трифазні асинхронні електродвигуни. Робота насосів автоматично регулюється залежно від рівня конденсату в резервуарах.

Система автоматизації включає датчики рівня, регулятор, магнітні пускачі, виконавчі механізми, сигнальні лампи та автоматичні вимикачі.

Датчики контролюють рівень рідини та передають сигнали до регулятора, який формує команди для керування насосами й клапанами.

Система сигналізації та захисту забезпечує контроль аварійних режимів, захист від перевантаження, короткого замикання, перегріву та переповнення резервуарів.

Таким чином, система збору та перекачування конденсату забезпечує надійну, безпечну та енергоефективну роботу насосної установки й стабільний технологічний процес.

1.2 Контрольно-вимірювальні прилади та автоматика

Схема контрольно-вимірювальних приладів (КІП) і автоматизації конденсатного насоса котлотурбінного цеху – на рис. 1.2.

1.2.1 Датчики рівня

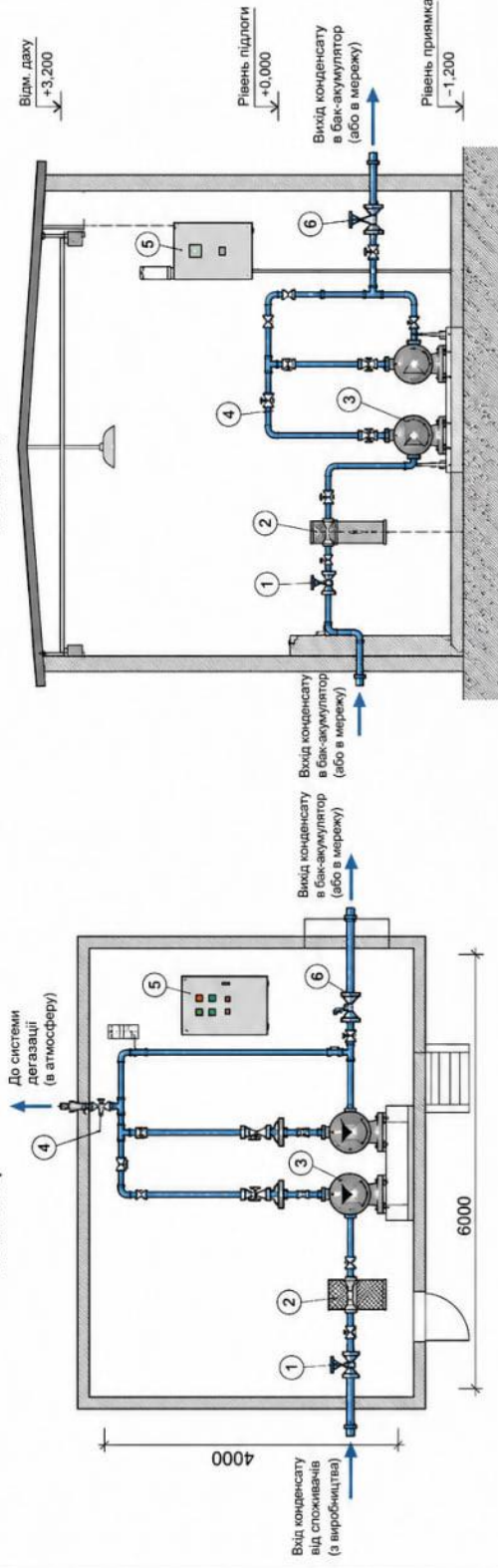
Для контролю рівня конденсату в резервуарах насосної установки застосовуються датчики рівня, які є важливими елементами системи автоматизації (див. рис. 1.3). Вони забезпечують безперервний контроль кількості рідини та передають сигнали до регуляторів, реле або систем керування для автоматичного ввімкнення чи вимкнення насосів і підтримання необхідного режиму роботи.

Основним призначенням датчиків є визначення фактичного рівня конденсату та передача електричного сигналу в систему керування. Це дозволяє автоматизувати роботу насосного обладнання, підвищити надійність системи та запобігти аварійним режимам.

У системах контролю рівня конденсату застосовують:

- поплавкові датчики;
- електродні датчики;
- імпульсні (ультразвукові або радарні) системи вимірювання.

PO3PI3 1-1



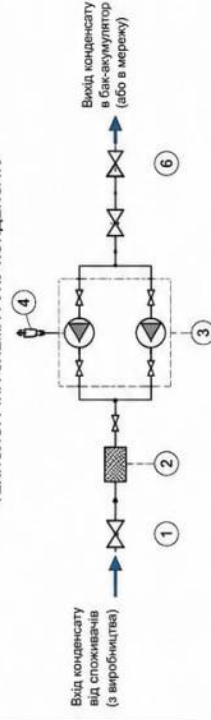
ЕКСПЛІКАЦІЯ ОБЛАДНАННЯ

№ поз.	Найменування
1	Запірна арматура (засувка)
2	Фільтр січний
3	Конденсатний насос (робочий/резервний)
4	Автоматичний повітряноділчик (деагазатор)
5	Шафа керування насосами (ШКУ)
6	Зворотний клапан

ТЕХНІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА

1. Продуктивність насоса — $Q, \text{ м}^3/\text{год}$
2. Напір насоса — $H, \text{ м}$
3. Робоча температура конденсату — $t, ^\circ\text{C}$
5. Кількість насосів — 2 (1 робочий, 1 резервний)
5. Спосіб керування — автоматичний (за рівнем)

ТЕХНОЛОГІЧНА СХЕМА РУХУ КОНДЕНСАТУ



ПРИМІТКИ

1. Насосна станція призначена для перекачування конденсату з виробничих установок в бак-аккумулятор або в мережу конденсатопроводу.
2. Робота насосів – автоматична з автоматичним чергуванням та захистом від "сушого ходу".
3. Сигналізація: мінімальний рівень, максимальний рівень, аварія насоса.

УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

- | | |
|---|--------------------------|
|  | — Трубопровід конденсату |
|  | — Засувка |
|  | — Заворотний клапан |
|  | — Фільтр сітчастий |
|  | — Насос |
|  | — Електродвигун |
|  | — Позиція обладнання |

СХЕМА КІП ТА АВТОМАТИЗАЦІЇ КТЦ КОНДЕНСАТНОГО НАСОСА

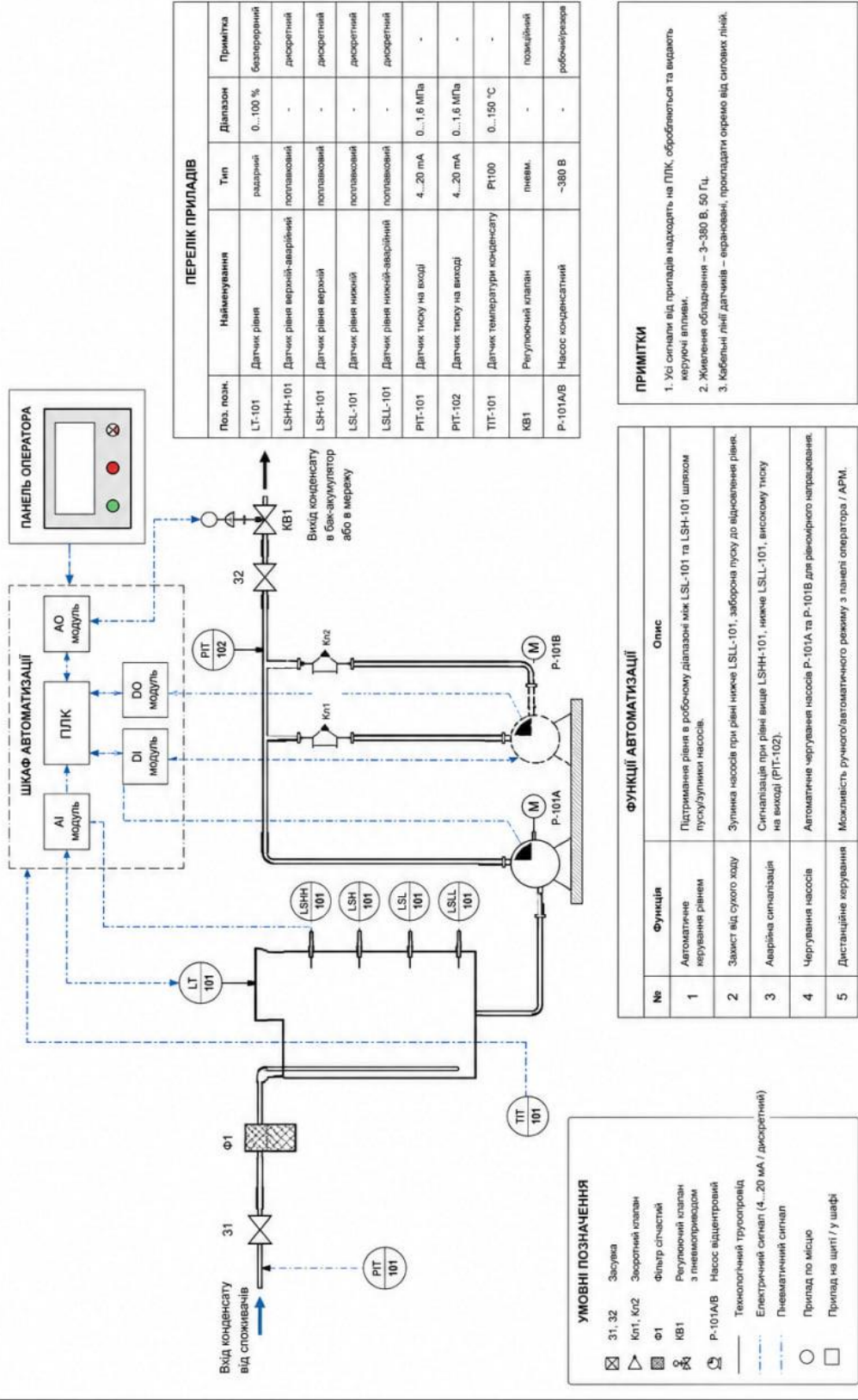


Рисунок 1.2 – Схема КІП та автоматизації КТЦ конденсатного насоа КІПТМ «Криворізька теплоцентрально»



Рисунок 1.3 – Датчики рівня

Поплавкові датчики працюють за принципом переміщення поплавка залежно від рівня рідини. При досягненні заданого рівня спрацьовує контакт, який формує керуючий сигнал. Вони прості за конструкцією та широко використовуються для контролю мінімального і максимального рівнів.

Електродні датчики функціонують на основі електропровідності рідини. При контакті конденсату з електродом замикається електричне коло та формується сигнал про відповідний рівень рідини. Такі датчики відзначаються високою точністю і швидкодією.

Імпульсні системи забезпечують безконтактне вимірювання рівня за допомогою ультразвукових або радарних сигналів. Рівень рідини визначається за часом повернення відбитого імпульсу. Перевагою таких систем є висока точність і надійність роботи.

Датчики рівня формують сигнали:

- мінімального рівня (для захисту насосів від роботи «всуху»);
- нормального рівня (для підтримання штатного режиму роботи);

- максимального рівня (для запобігання переповненню резервуарів шляхом автоматичного ввімкнення насосів або відкриття регулюючих клапанів).

У комплексі з регуляторами, магнітними пускачами та релейним захистом датчики рівня забезпечують автоматичне керування насосною установкою, підвищують безпеку та надійність експлуатації системи перекачування конденсату.

1.2.2 Регулятор рівня

Для автоматичного підтримання необхідного рівня конденсату в системі застосовується регулятор рівня РПИБ-III (див. рис. 1.4). Він є важливим елементом системи автоматизації насосної установки та забезпечує контроль і регулювання рівня рідини в резервуарах.



Рисунок 1.4 – Регулятор рівня РПИБ-III

Регулятор працює у взаємодії з датчиками рівня, від яких отримує сигнали про фактичний рівень конденсату. Отримані дані порівнюються із

заданим значенням, після чого формується керуючий сигнал для виконавчих механізмів.

Основними функціями регулятора РПИБ-III є:

- автоматичне підтримання заданого рівня рідини;
- керування насосами та регулюючими клапанами;
- формування сигналів для магнітних пускачів і реле;
- запобігання переповненню резервуарів і роботі насосів «всуху»;
- аварійне блокування обладнання при несправностях.

При підвищенні рівня конденсату регулятор подає команду на ввімкнення насосів для відкачування рідини, а при зниженні рівня — на їх вимкнення. Це забезпечує стабільний технологічний режим без постійного втручання оператора.

Регулятор РПИБ-III живиться від однофазної мережі змінного струму напругою 220 В, що забезпечує простоту його підключення та надійну роботу.

Для нормальної роботи регулятора необхідні:

- стабільна напруга живлення;
- справні датчики рівня;
- надійні електричні з'єднання;
- правильне налаштування заданого рівня;
- справність виконавчих механізмів.

Застосування регулятора РПИБ-III підвищує точність підтримання рівня конденсату, покращує надійність роботи насосної установки, знижує витрати електроенергії та зменшує ймовірність аварійних ситуацій.

1.2.3 Виконавчі механізми

У системі автоматизованого керування насосною установкою важливу роль виконують виконавчі механізми, які забезпечують запуск і зупинку насосів, керування клапанами, регулювання подачі рідини та аварійне відключення обладнання. До основних виконавчих механізмів належать магнітні пускачі, контактори, електромагнітні реле та регулюючі клапани.

Магнітні пускачі призначені для дистанційного керування електродвигунами насосів. Вони забезпечують підключення та відключення двигуна від мережі, а також його захист від перевантаження за допомогою теплового реле.

Контактори застосовуються для комутації силових електричних кіл великої потужності. Вони забезпечують надійне та часте вмикання і вимикання насосних агрегатів у автоматичному режимі.

Електромагнітні реле виконують функції керування та захисту електричних кіл. Вони реагують на зміну струму, напруги, тиску або рівня рідини та передають сигнали до виконавчих пристроїв для автоматичного керування насосами.

Регулюючі клапани використовуються для керування потоком конденсату в трубопроводах, підтримання необхідного тиску та стабільного режиму роботи системи.

Основною функцією виконавчих механізмів є забезпечення автоматичного керування насосною установкою відповідно до сигналів системи автоматики. У разі аварійних режимів - перевантаження, короткого замикання, перегріву або падіння напруги - система автоматично відключає насосне обладнання та блокує його повторний запуск до усунення несправності.

Застосування виконавчих механізмів підвищує надійність, безпечність і економічність роботи насосної установки, зменшує навантаження на обслуговуючий персонал та забезпечує стабільний технологічний процес.

1.3 Система автоматичного регулювання конденсатними насосами АТ Криворізька теплоцентраль

Рівень конденсату в резервуарі контролюється датчиками рівня та системою автоматичного регулювання. До складу системи входять датчики рівня, регулятор, магнітний пускач і електропривод насоса, які забезпечують автоматичне підтримання необхідного рівня рідини.

При підвищенні рівня конденсату датчик формує сигнал, що надходить до регулятора. Якщо рівень перевищує допустиме значення, регулятор подає команду на магнітний пускач, який підключає електродвигун насоса до мережі. Після запуску насос починає перекачувати конденсат, знижуючи рівень рідини в резервуарі.

Коли рівень досягає нормального значення, датчики передають відповідний сигнал регулятору, який вимикає магнітний пускач. Електродвигун зупиняється, насос припиняє роботу, а система переходить у режим контролю.

Такий принцип роботи забезпечує:

- автоматичне підтримання рівня конденсату;
- стабільну роботу насосної установки;
- захист насосів від роботи «всуху» та перевантаження;
- економне використання електроенергії;
- підвищення надійності та безпеки системи.

Об'єкт проектування – конденсатний насос типу WILO BL100/300 встановлений в котлотурбінному цеху. Технічні характеристики насосів КТЦ задані у табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Технічні характеристики насосів КТЦ

Насос	Тип насосу	Продуктивність м³/год	Напір, м	Частота обертання, об/хв	Потужність, кВт	Напруга, В
КН-1	WILO BL100/300	110	50	1450	18,5	380
КН-2	WILO BL100/300	110	50	1450	18,5	380
КН-3	8КСД-103	110	55	1500	40	380
КН-4	WILO BL100/300	110	50	1450	18,5	380

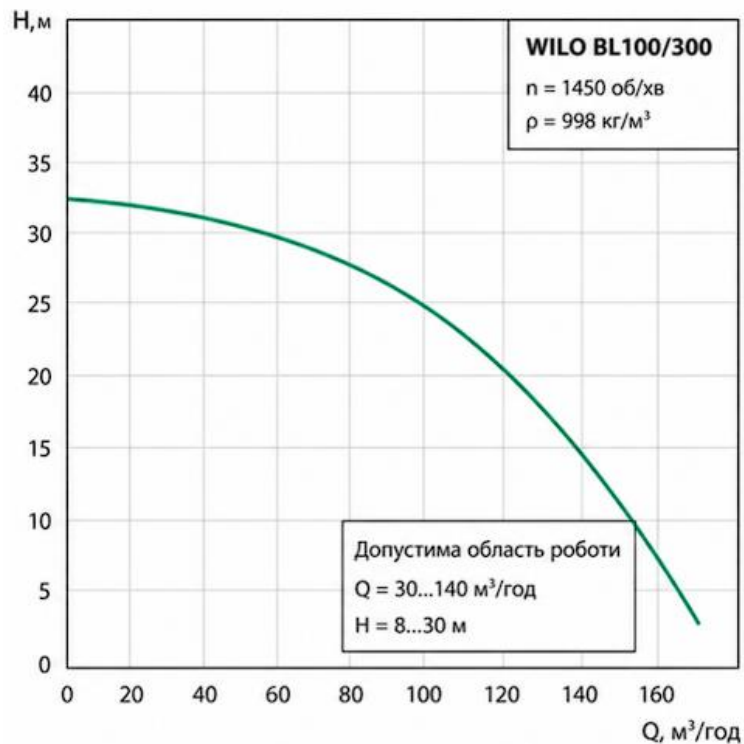
Для насосів КН-1, КН-2 та КН-4 застосовані електродвигуни потужністю 18,5 кВт з частотою обертання 1450 об/хв, для насоса КН-3 - більш потужний двигун 40 кВт із частотою обертання 1500 об/хв.

1.4 Будова та технічні характеристики насоса WILO BL100/300

Конденсаційні насоси КН1-КН4 – це насоси типу WILO BL100/300, їх загальний вид та напірна характеристика показані на рис. 1.5.



а)



б)

Рисунок 1.5 - Насос конденсаційний WILO BL100/300: а) загальний вид насоса; б) напірна характеристика насоса

Параметри насоса WILO BL100/300 наведені у табл. 1.2.

Таблиця 1.2 - Параметри насоса WILO BL100/300

№ з/п	Параметри насоса	Значення параметру / одиниці вимірювання
1	Тип насоса	WILO BL100/300
2	Тип конструкції	відцентровий, горизонтальний
3	Продуктивність	110 м³/год
4	Напір	50 м
5	Частота обертання	1450 об/хв
6	Потужність двигуна	18,5 кВт
7	Напруга живлення	380 В
8	Рід струму	трифазний змінний
9	Частота мережі	50 Гц
10	Тип привода	асинхронний двигун
11	Робоче середовище	чиста вода
12	Температура рідини	до +120 °С
13	Матеріал корпусу	чавун
14	ККД насоса	високий
15	Режим роботи	тривалий

1.5 Розрахунок потужності та вибір електродвигуна

1.5.1 Розрахунок потужності електродвигуна

Визначаємо потужність насоса за формулою:

$$P_{розр} = \frac{\rho \cdot Q \cdot H}{367000 \cdot \eta} = \frac{1000 \cdot 110 \cdot 50}{367000 \cdot 0,81} = 18,5 \text{ кВт}, \quad (1.1)$$

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

$Q = 110 \text{ м}^3/\text{год.}$ – подача насоса;

$H = 50 \text{ м}$ – напір насоса;

$\eta = 70\text{-}90 \%$ – ККД відцентрових промислових насосів;

367000 – перевідний множник (константа).

1.5.1 Технічні характеристики приводного двигуна WEG W22 180 M4

Для привода насосного агрегату №4 обираємо приводний двигун WEG W22 180 M4 (рис. 1.6).



Рисунок 1.6 – Загальний вид двигуна WEG W22 180 M4

Зведемо у табл. 1.3 паспортні дані двигунів серії WEG різних класів енергоефективності.

Таблица 1.3 – Технічні дані асинхронних двигунів WEG W22 180 M4

№ з/п	Технічні дані	Значення параметрів		
		клас енергоефективності		
		IE2	IE3	IE4
1	Номінальна потужність, кВт	18,5	18,5	18,5
2	Частота мережі, Гц	50	50	50
3	Кількість полюсів	4	4	4
4	Синхронна швидкість, об/хв	1500	1500	1500
5	Номінальна швидкість, об/хв	1460	1460	1465
6	Номінальна напруга, В	380	380	380
7	ККД, %			
	50	90,5	91,8	92,5
	75	90,6	91,7	92,9
	100	90,0	91,2	93,1
8	Коефіцієнт потужності			
	50	0,73	0,72	0,68
	75	0,81	0,81	0,79
	100	0,87	0,85	0,84
9	Номінальний струм, А	35,9	36,3	35,9
10	Кратність пускового струму, А	6,6	6,6	7,3
11	Номінальний момент, Н·м	121	121	120
12	Коефіцієнт відношення пускового моменту до номінального	2,4	2,4	2,7
13	Коефіцієнт перевантажувальної здатності (максимального моменту)	2,8	2,8	3,0
14	Момент інерції, Дж (кг·м ²)	0,1615	0,1973	0,1973

№ з/п	Технічні дані	Значення параметрів		
		клас енергоефективності		
		IE2	IE3	IE4
15	Ступінь захисту	IP55	IP55	IP55
16	Клас ізоляції	F	F	F
17	Режим роботи	S1	S1	S1
18	Рівень шуму, дБ	61	61	61

1.6 Основні експлуатаційні вимоги до насосів та електроприводів

До основних вимог, які ставляться до сучасних центробіжних насосів, відносять:

- високу економічність експлуатації, що характеризується значним коефіцієнтом корисної дії та відносно невеликою вартістю обладнання;
- простоту конструкції, яка забезпечує надійність роботи й зручність технічного обслуговування;
- мінімальне зниження ККД при перекачуванні рідин із підвищеною в'язкістю;
- можливість автоматизованого керування насосним агрегатом і насосною станцією;
- передачу крутного моменту безпосередньо від електродвигуна до вала насоса;
- ефективні умови всмоктування з мінімальними витратами на створення необхідного підпору;
- надійну герметизацію ущільнень за умови простоти їх експлуатації та обслуговування;
- компактне та раціональне компонування обладнання, що дозволяє зменшити витрати на монтаж, налагодження й експлуатацію.

З огляду на специфіку роботи насосного агрегату до системи електропривода висуваються такі вимоги:

- забезпечення точного регулювання частоти обертання;

- висока перевантажувальна здатність у всьому робочому діапазоні швидкостей;

- широкий діапазон регулювання швидкості;
- можливість запуску агрегату під навантаженням;
- робота електропривода в неререверсивному режимі;
- високі показники енергоефективності та надійності.

Для привода насосних агрегатів найбільш доцільним є використання частотно-регульованого електропривода системи «перетворювач частоти – асинхронний двигун» (ПЧ–АД).

Основними перевагами такого електропривода є:

- плавна зміна швидкості обертання та жорсткі механічні характеристики, що забезпечують стабільну роботу в широкому діапазоні регулювання;

- робота асинхронного двигуна з малими значеннями ковзання, завдяки чому енергетичні втрати залишаються близькими до номінальних.

До недоліків частотно-регульованого електропривода можна віднести:

- високу вартість перетворювачів частоти, особливо для електроприводів великої потужності;
- складність побудови та налаштування систем керування.

1.7 Розрахунок перетворювача та елементів силової частини

Вибір перетворювача частоти проводимо, виходячи з таких умов:

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

Для керування асинхронним двигуном WEG W22 180 M4 потужністю 18,5 кВт обрано перетворювач частоти Schneider Electric Altivar Process ATV630D18N4. 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 - Загальний вид перетворювача частоти Schneider ATV630

Паспортні дані перетворювача частоти Schneider Electric ATV630D18N4 зведено до табл. 1.4.

Таблиця 1.4 – Паспортні дані перетворювача частоти Schneider ATV630

№ з/п	Параметри перетворювача	Значення параметру / одиниця вимірювання
1	Серія	Altivar Process ATV600
2	Номінальна потужність	18,5 кВт
3	Напруга живлення	380–480 В
4	Вихідна напруга	0–400 В

№ з/п	Параметри перетворювача	Значення параметру / одиниця вимірювання
5	Вихідна частота	0,1–500 Гц
6	Номинальний вихідний струм	39,2 А
7	Лінійний струм	33,4 А
8	Перевантажувальна здатність	110 %
9	Спосіб керування	скалярне та векторне
10	Частота ШІМ	2–12 кГц
11	Кількість аналогових входів/виходів	3 / 2
12	Кількість дискретних входів	6-8
13	Кількість релейних виходів	3
14	Вартість	112740 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 струмообмежуючого 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.

1.8 Висновки за розділом 1

У даному розділі наведена технологічна схема котлотурбінного цеху конденсатного насоса АТ Криворізька теплоцентраль та виконано огляд класичного дня такого цеху ТЕЦ обладнання та вимірювальних пристроїв:

датчиків рівня, регуляторів рівня, виконавчих механізмів (магнітних пускачів, контакторів, електромагнітних реле та регулюючих клапанів).

Виконано вибір основного обладнання електропривода конденсатних насосів котлотурбінного цеху. За технічними параметрами насоса WILO BL100/300 визначено необхідну потужність привода та обрано асинхронний двигун WEG W22 180 M4, який забезпечує надійну й ефективну роботу насосної установки.

Для керування насосним агрегатом прийнято систему «перетворювач частоти – асинхронний двигун» (ПЧ–АД). Як засіб регулювання обрано перетворювач частоти Schneider Electric ATV630D18N4, призначений для насосних установок.

Застосування частотного регулювання забезпечує плавне керування швидкістю двигуна, зниження пускових струмів, зменшення механічних навантажень та підвищення енергоефективності системи. Використання асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором у поєднанні з сучасним перетворювачем частоти дозволяє отримати високі регулювальні характеристики при простій конструкції, високій надійності та економічності електропривода.

2.1 Схема заміщення та розрахунок механічних характеристик електропривода конденсатного насоса КН-1 (WILO BL100/300)

2.1.1 Параметри схеми заміщення двигуна WEG W22 180 M4

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).

За паспортними даними електродвигуна WEG W22 180 M4 (див. табл. 1.2) проведемо розрахунок параметрів вище наведеної схеми заміщення (табл. 2.2, 2.3).

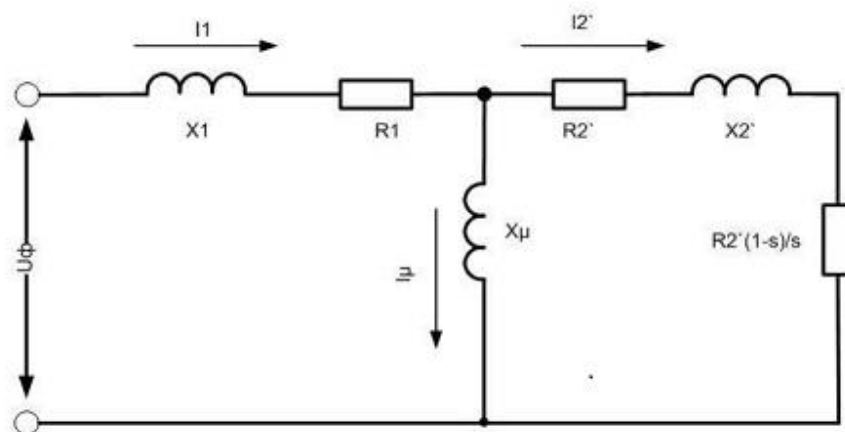


Рисунок 2.2 - Т-подібна схема заміщення асинхронного двигуна WEG W22 180 M4

Таблиця 2.2 – Необхідні розрахункові параметри схеми заміщення
двигуна WEG W22 180 M4

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

№ з/п	Назва параметру	Формула	Номер формули
8	Критичне ковзання	$s_{\kappa} = s_{\mu} \times$ $\times \frac{\left(k_m + \sqrt{k_m^2 - [1 - 2 \cdot s_{\mu} \cdot \beta \cdot (k_m - 1)]} \right)}{1 - 2 \cdot s_{\mu} \cdot \beta \cdot (k_m - 1)}$ де k_m – перевантажувальна здатність АД; $\beta = 1,3$ – коефіцієнт, що залежить від типів АД.	(2.8)
9	Конструктивний коефіцієнт C_1	$C_1 = 1 + \frac{I_0}{2 \cdot k_i \cdot I_{1n}}$ де k_i – кратність пускового струму	(2.9)
10	Конструктивний коефіцієнт A_1	$A_1 = \frac{3 \cdot U_{1n}^2 \cdot (1 - s_{\mu})}{2 \cdot C_1 \cdot k_m \cdot P_n}$	(2.10)
11	Активний опір ротора, приведений до обмотки статора АД	$R_2' = \frac{A_1}{(\beta + 1/s_{\kappa}) \cdot C_1}$	(2.11)
12	Активний опір обмотки статора	$R_1 = C_1 \cdot R_2' \cdot \beta$	(2.12)
13	Конструктивний параметр γ	$\gamma = \sqrt{(1/s_{\kappa}^2) - \beta^2}$	(2.13)
14	Індуктивний опір короткого замикання $X_{\kappa\kappa}$	$X_{\kappa\kappa} = \gamma \cdot C_1 \cdot R_2'$	(2.14)
15	Індуктивний опір розсіювання фази роторної обмотки,	$X_1 = 0,42 \cdot X_{\kappa\kappa}$	(2.15)

№ з/п	Назва параметру	Формула	Номер формули
	приведеної до статорної		
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 – Необхідні розрахункові параметри схеми заміщення двигуна WEG W22 180 M4

№ з/п	Назва параметру	Формула	Номер формули
1	Синхронна швидкість	$\omega_0 = \frac{3,14 \cdot 1500}{30} = 157,08$	1/с
2	Номінальна швидкість	$\omega_n = \frac{3,14 \cdot 1460}{30} = 152,9$	1/с
3	Номінальне ковзання	$s_n = \frac{157,08 - 152,9}{157,08} = 2,67$	в.о.
4	Номінальний момент	$M_n = 1000 \cdot \frac{18,5}{152,9} = 121$	Н·м
5	Номінальний струм статора	$I_{1n} = \frac{18500}{3 \cdot 380 \cdot 0,912 \cdot 0,85} = 36,3$	А
6	Струм статора при	$I_{1p} = \frac{0,75 \cdot 18500}{3 \cdot 380 \cdot 0,912 \cdot 0,85} = 28,4$	А

№ з/п	Назва параметру	Формула	Номер формули
	завантаженні 75%		
7	Струм неробочого ходу статора	$I_0 = \sqrt{\frac{28,4^2 - 36,3^2 \cdot [0,75 \cdot (1 - 2,67) / (1 - 0,75 \cdot 2,67)]^2}{1 - [0,75 \cdot (1 - 2,67) / (1 - 0,75 \cdot 2,67)]^2}} = 13,07$	А
8	Критичне ковзання	$s_k = 2,67 \times \frac{\left(2,8 + \sqrt{2,8^2 - [1 - 2 \cdot 2,67 \cdot 1,3 \cdot (2,8 - 1)]}\right)}{1 - 2 \cdot 2,67 \cdot 1,3 \cdot (2,8 - 1)} = 0,0166$	В.О.
9	Конструктивний коефіцієнт C_1	$C_1 = 1 + \frac{13,07}{2 \cdot 6,6 \cdot 36,3} = 1,0273$	В.О.
10	Конструктивний коефіцієнт A_1	$A_1 = \frac{3 \cdot 380^2 \cdot (1 - 2,67)}{2 \cdot 1,0273 \cdot 2,8 \cdot 18500} = 1,3206$	В.О.
11	Активний опір ротора, приведений до обмотки статора АД	$R_2' = \frac{1,3206}{(1,3 + 1/2,67) \cdot 1,0273} = 0,1753$	Ом
12	Активний опір обмотки статора	$R_1 = 1,0273 \cdot 0,1753 \cdot 1,3 = 0,2341$	Ом
13	Конструктивний параметр γ	$\gamma = \sqrt{(1/0,0166^2) - 1,3^2} = 5,89$	
14	Індуктивний опір короткого замикання $X_{кн}$	$X_{кн} = 5,89 \cdot 1,1753 \cdot 1,0272 = 1,061$	Ом

№ з/п	Назва параметру	Формула	Номер формули
15	Індуктивний опір розсіювання фази роторної обмотки, приведеної до статорної	$X_1 = 0,42 \cdot 1,061 = 0,446$	Ом
16	ЕРС ланки намагнічування	$E_m = \sqrt{(380 \cdot 0,85 - 0,2341 \cdot 36,3)^2 + \sqrt{+(380 \cdot \sqrt{1 - 0,85^2} - 0,446 \cdot 33,3)^2}} = 203,9$	В
17	Індуктивний опір контуру намагнічування	$X_\mu = \frac{203,9}{13,07} = 15,6$	Ом

2.2.2 Природні характеристики електродвигуна насосної установки

Для визначення необхідних характеристик асинхронного електродвигуна використовується символний (комплексний) метод розрахунку кіл змінного струму (табл. 2.4). Обчислення (2.18)-(2.30) виконані за допомогою програмного середовища MATLAB.

На рис. 2.3–2.9 представлені результати розрахунків швидкісних, електромеханічних та енергетичних характеристик приводного електродвигуна насосної установки.

Таблиця 2.4 - Розрахункові параметри схеми двигуна WEG W22 180 M4
символьним (комплексним) методом

№ 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)
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	$k_m(s) = \cos \left(\arg \left(z_0(s) \right) \right)$	(2.30)

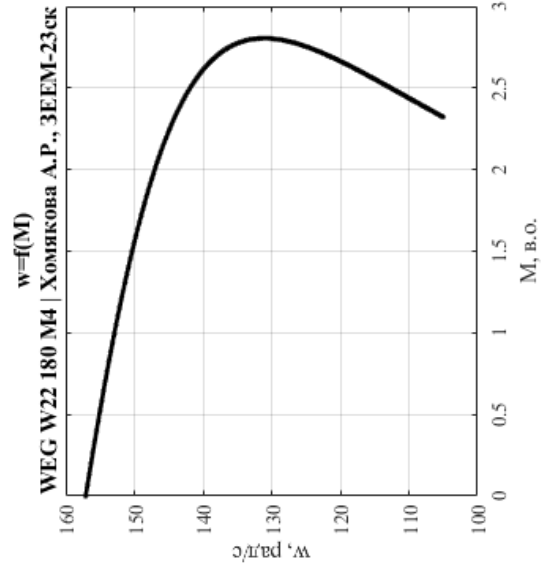
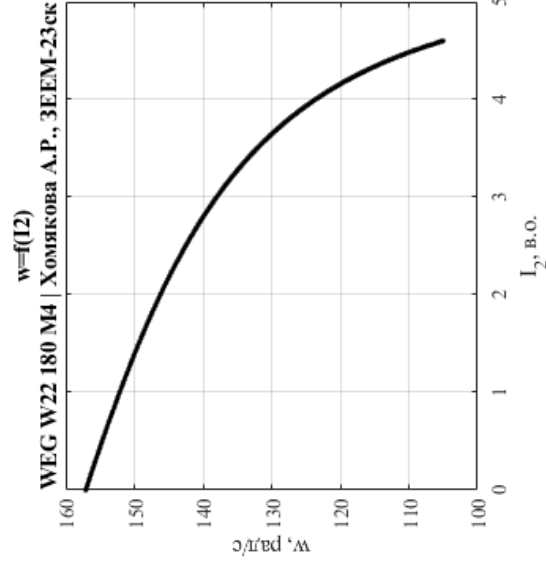
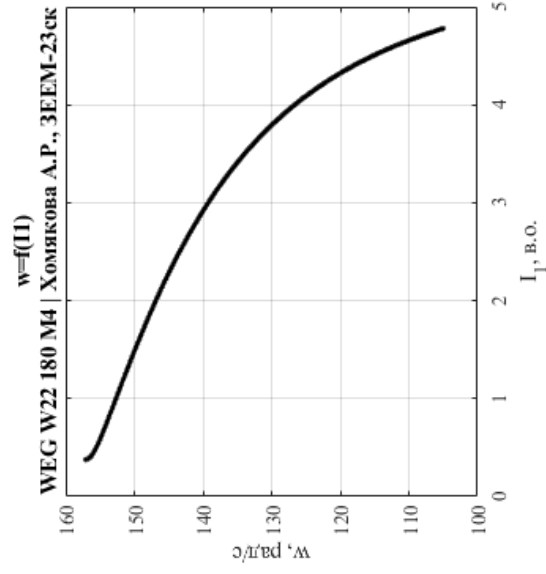


Рисунок 2.1 – Природні характеристики електродвигуна конденсатного насоса: а – швидкісна характеристика за струмом статора; б - швидкісна характеристика за струмом ротора; в – механічна характеристика

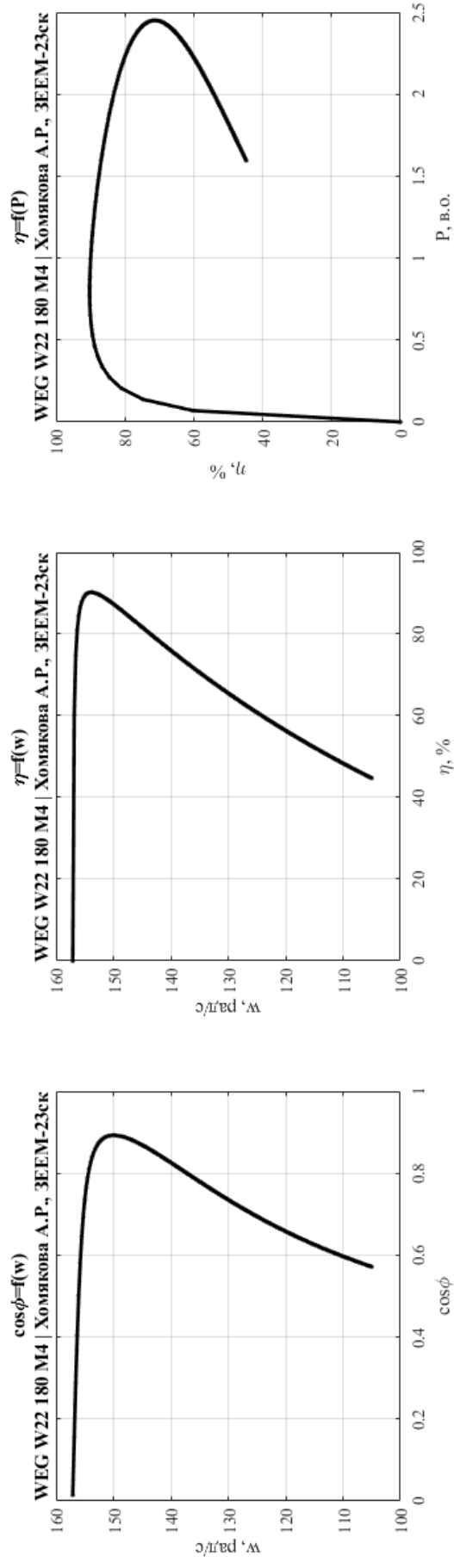


Рисунок 2.2 – Природні характеристики електродвигуна конденсатного насоса: Γ – коефіцієнт потужності;

δ – коефіцієнт корисної дії; ϵ – залежність коефіцієнта корисної дії від механічної потужності на валу

2.2.3 Штучні характеристики електропривода ПЧ-АД насосної установки

У разі частотного керування АД необхідно враховувати:

- 1) Індуктивні опори змінюються пропорційно зміні частоти живлення.
- 2) В розімкненій системі керування взаємопов'язане регулювання напруги та частоти:

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

де $m = 2$ – для насосних установок.

Розрахунок штучних характеристик виконується також за допомогою символного (комплексного) методу аналізу кіл змінного струму. (табл. 2.4). Обчислення (2.18)-(2.30) виконані за допомогою програмного середовища MATLAB при частотах від 50 Гц до 10 Гц з кроком $\Delta f = 10$ Гц та показані на рис. 2.3 – 2.6.

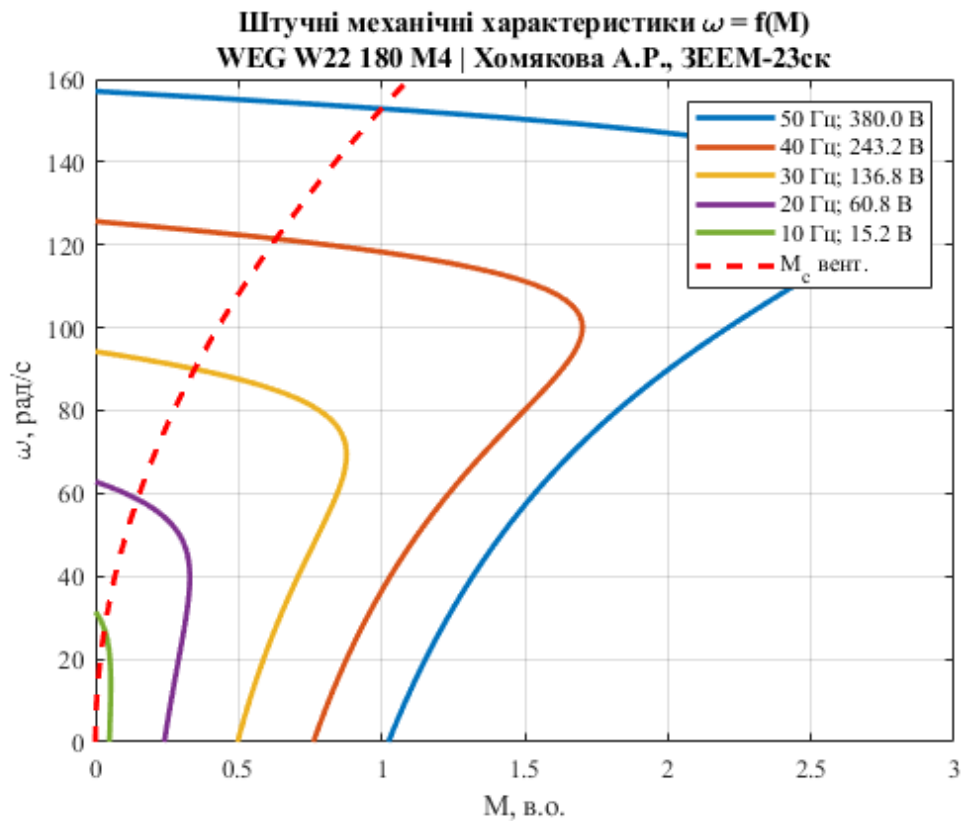


Рисунок 2.3 – Механічні характеристики при частотному регулюванні

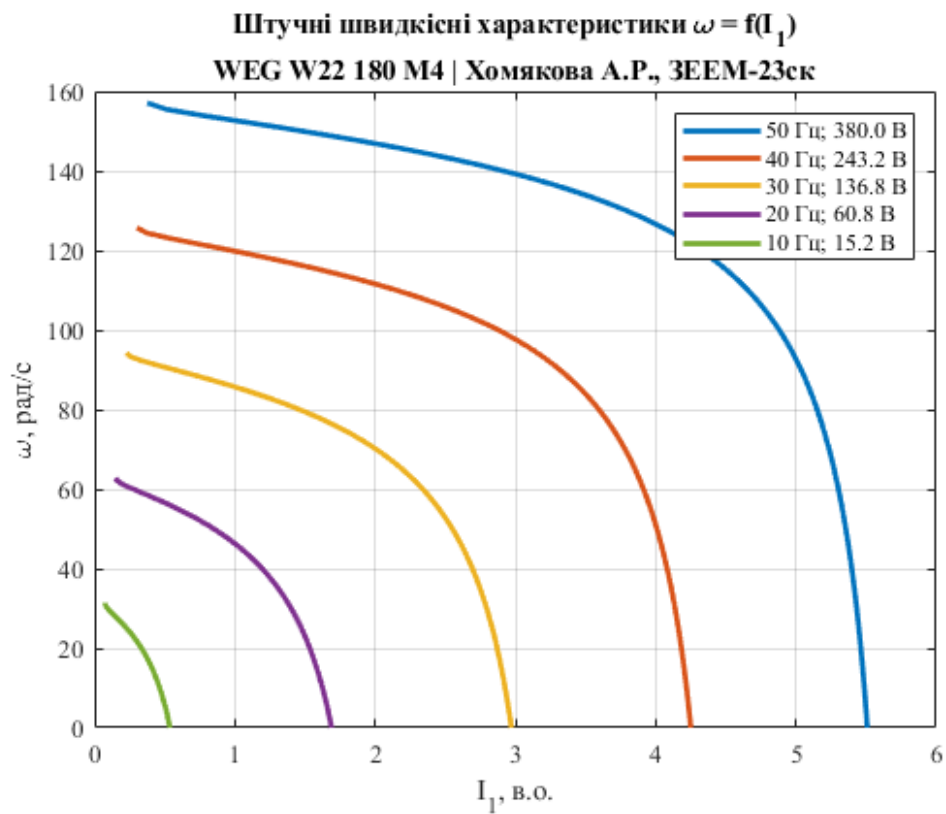


Рисунок 2.4 - Швидкісні характеристики при частотному регулюванні
(за струмом статора)

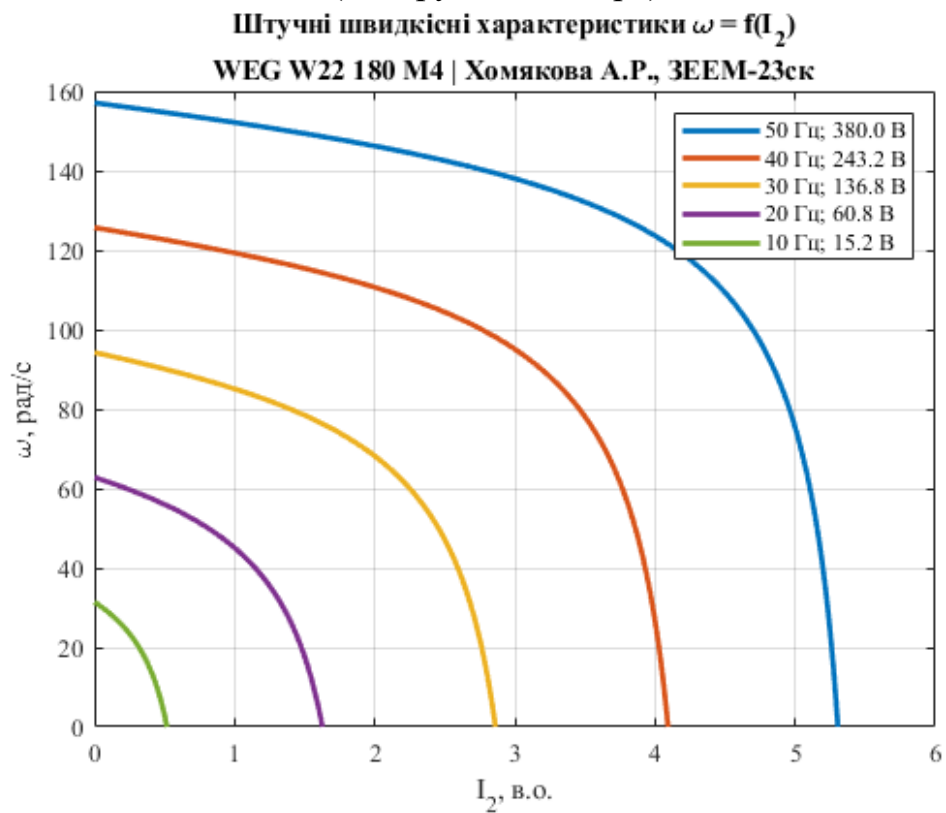


Рисунок 2.5 - Швидкісні характеристики при частотному регулюванні
(за струмом ротора)

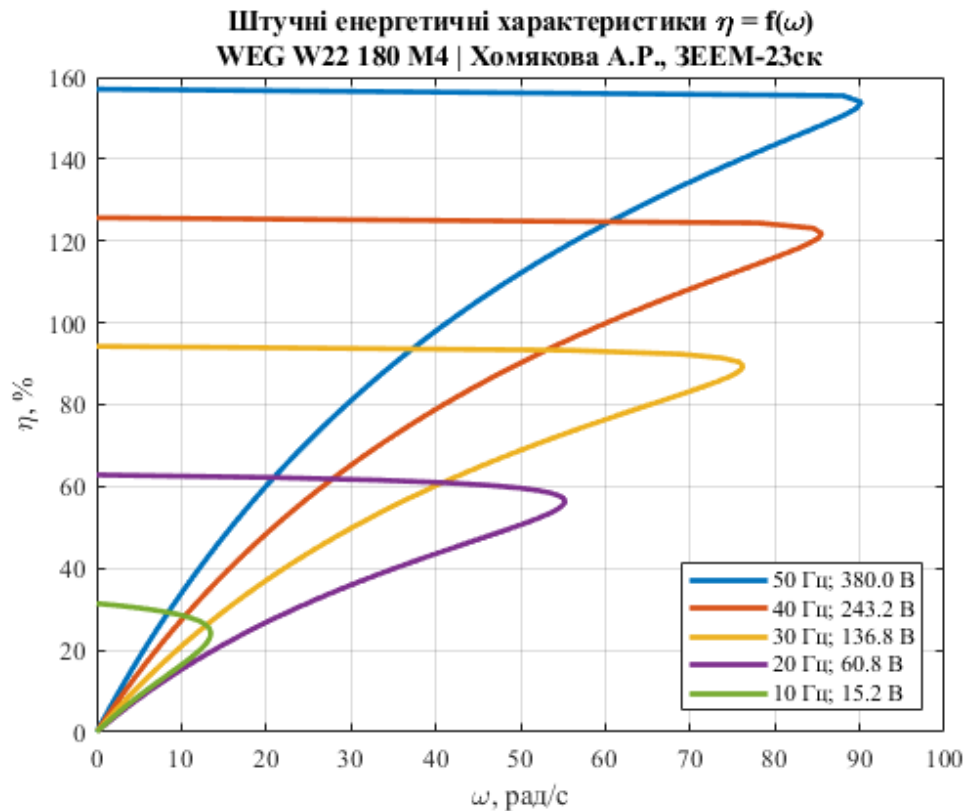


Рисунок 2.6 - Енергетичні характеристики при частотному регулюванні

2.3 Моделювання роботи насосної установки в середовищі MATLAB/Simulink

Розроблена математична модель прямого пуску приводного двигуна насосної установки з урахуванням (2.31). При моделюванні використовувались елементи з бібліотеки SimPower. Сама модель зображено на рис. 2.7, а результати моделювання – на рис. 2.8. На рис. 2.15 спостерігаються осцилограми зміни швидкості АД, електромагнітного моменту, струмів ротора та статора.

На рис. 2.9 представлена віртуальна математична модель частотно-керованого асинхронного електропривода насосного агрегату з векторною системою керування.

На рис. 2.10 наведено часові діаграми струму статора, частоти обертання та електромагнітного моменту під час пуску, а також при зниженні швидкості електропривода насоса з 1500 об/хв до 1000 об/хв протягом 2 с за наявності вентиляторного моменту опору.

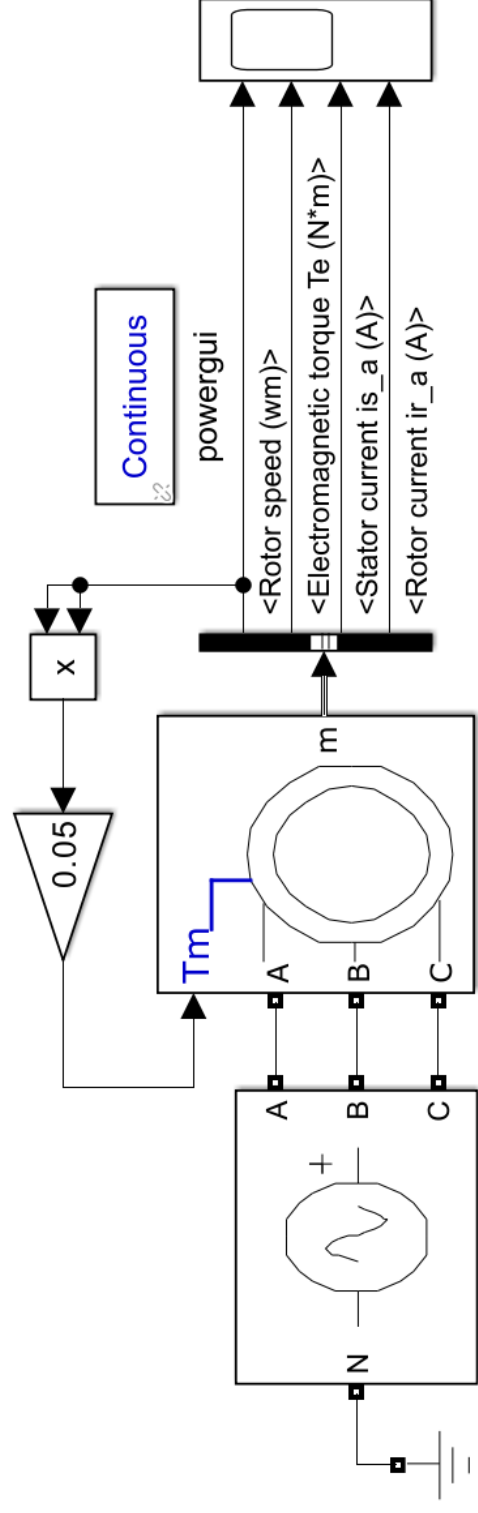


Рисунок 2.7 – Імітаційна модель асинхронного електропривода насосної установки з урахуванням реактивного моменту опору

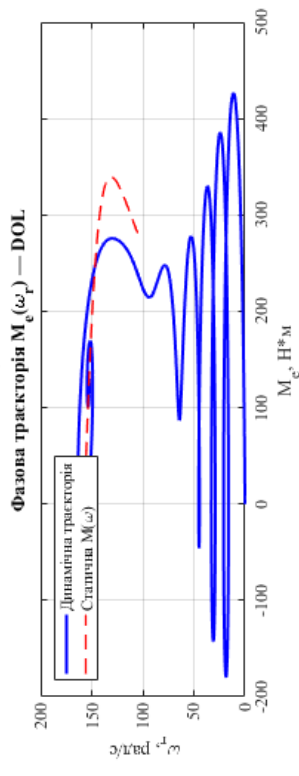
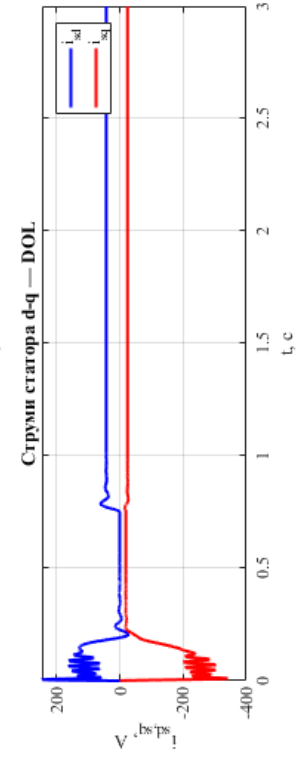
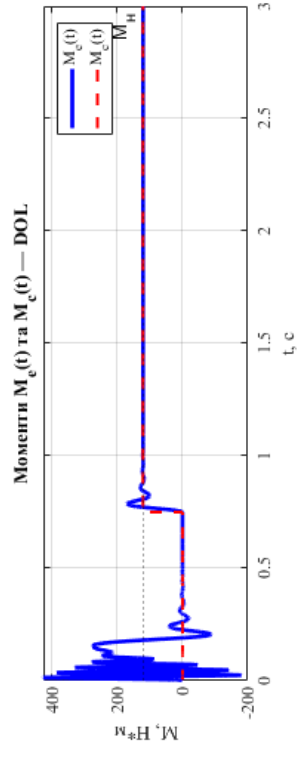
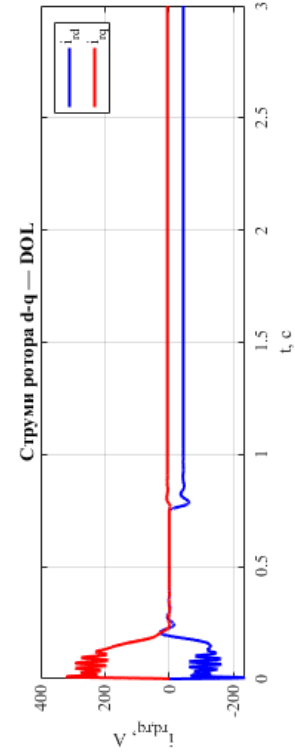
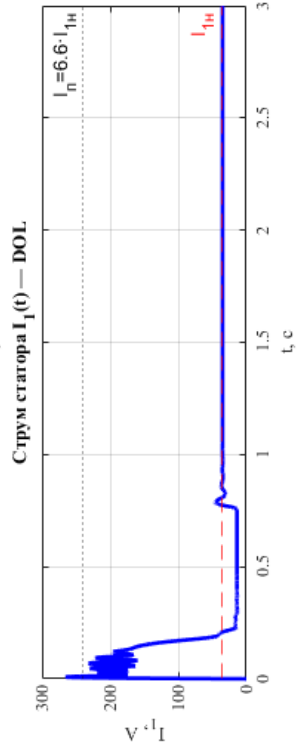
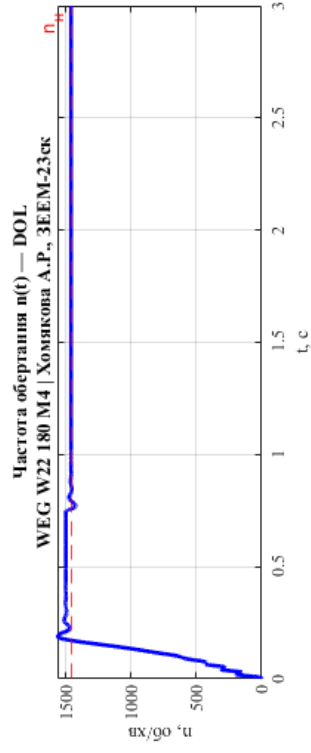


Рисунок 2.8 – Моделювання прямого пуску електропривода насосної установки з вентиляторним характером моменту опору

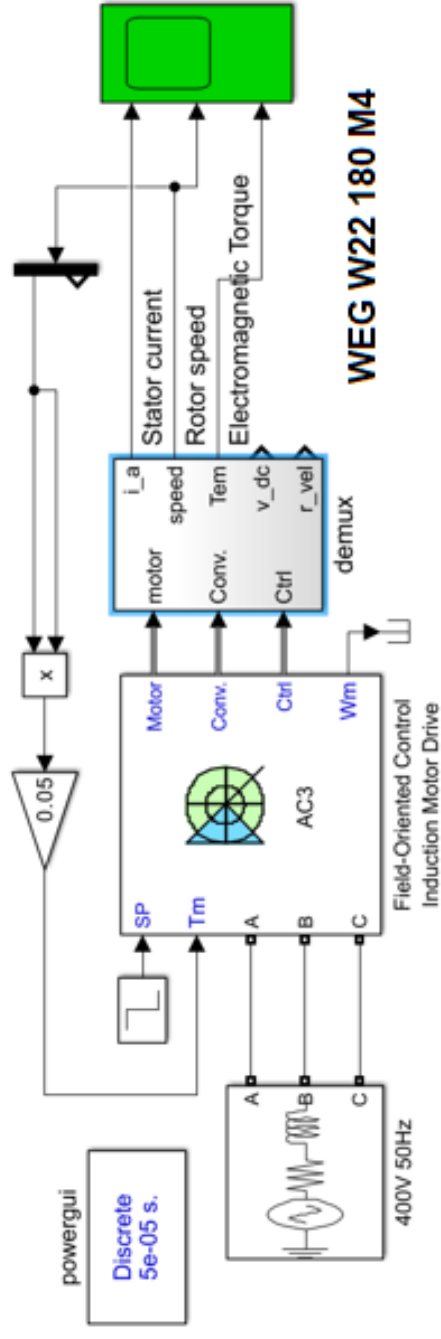


Рисунок 2.9 – Імітаційна реалізація математичної моделі асинхронного електропривода насосної установки з частотним регулюванням

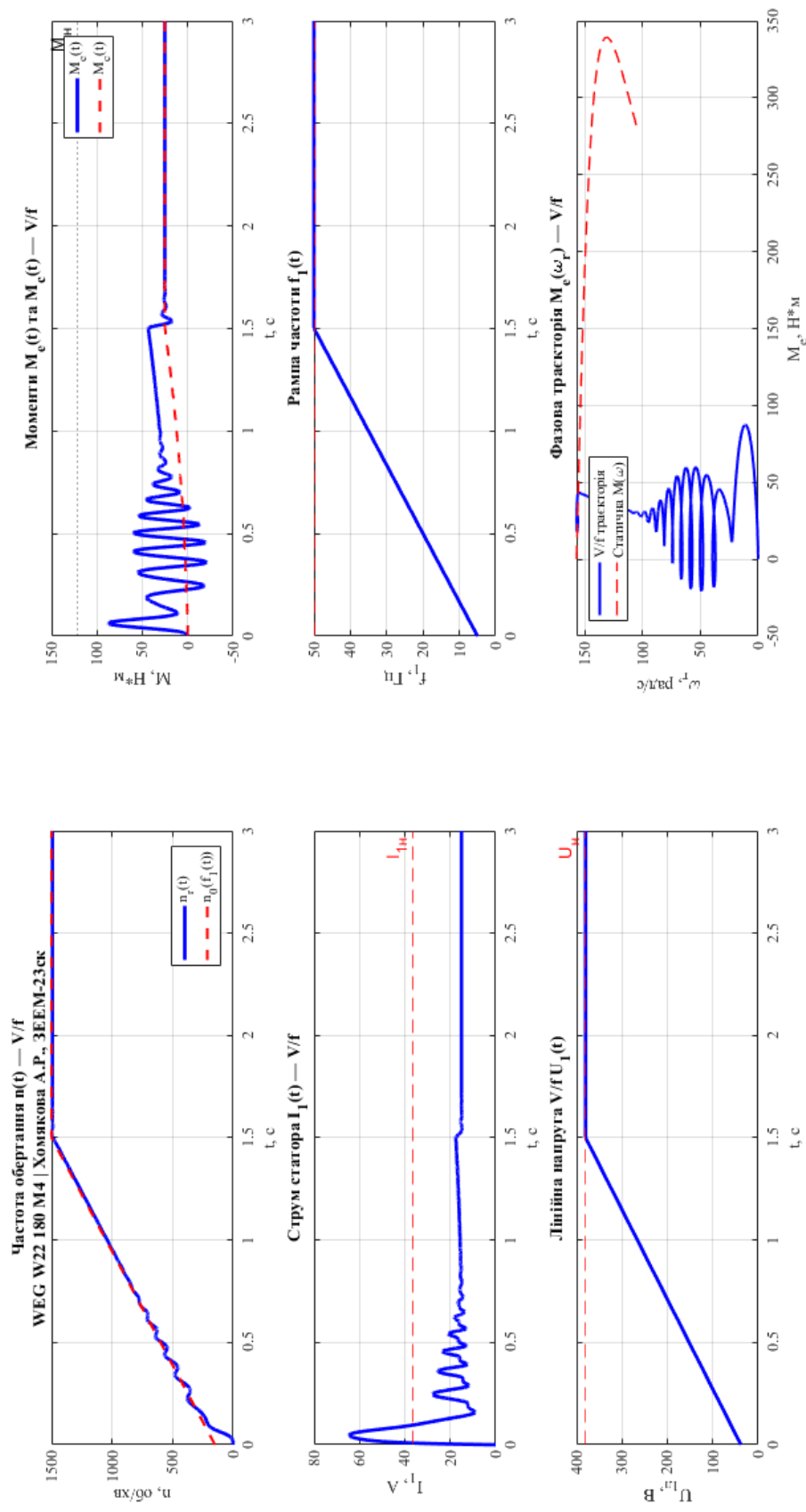


Рисунок 2.10 – Графіки зміни струму статора, частоти обертання та електромагнітного моменту в процесі пуску насосної установки

За результатами моделювання прямого пуску асинхронного двигуна насосної установки встановлено, що в початковий момент часу виникають значні пускові струми статора та ротора, які у декілька разів перевищують номінальні значення. Одночасно спостерігається різке зростання електромагнітного моменту, що забезпечує розгін двигуна до усталеної швидкості. Частота обертання ротора зростає плавно та після завершення перехідного процесу досягає номінального значення. Після завершення пуску струми та електромагнітний момент стабілізуються, що свідчить про вихід електропривода на усталений режим роботи.

Аналіз осцилограм частотно-керованого асинхронного електропривода показав, що застосування векторної системи керування забезпечує плавний пуск насосного агрегату без значних перевантажень по струму та моменту. Під час розгону електромагнітний момент змінюється без різких коливань, а струм статора не перевищує допустимих значень. При зниженні швидкості обертання з 1500 об/хв до 1000 об/хв протягом 2 с електропривод забезпечує стійкий перехідний процес без втрати стійкості та зриву регулювання. Наявність вентиляторного моменту опору впливає на характер зміни моменту, однак система керування підтримує задану швидкість із достатньою точністю. Отримані результати підтверджують ефективність застосування частотного регулювання для насосних установок, оскільки забезпечується зменшення пускових струмів, підвищення плавності роботи та покращення енергетичних показників електропривода.

Висновки за розділом 2

У даному розділі виконано розрахунок параметрів схеми заміщення асинхронного двигуна та побудовано його статичні характеристики. Встановлено, що система «перетворювач частоти – асинхронний двигун» має більш жорсткі механічні характеристики порівняно зі звичайним асинхронним приводом, що забезпечує стабільну роботу насосного агрегата та плавне регулювання швидкості у широкому діапазоні.

Для електропривода обрано двигун WEG W22 180 M4 класу енергоефективності IE3, який характеризується підвищеним ККД та зниженими втратами електроенергії. Його застосування дозволяє підвищити енергоефективність установки та зменшити експлуатаційні витрати.

Аналіз енергетичних характеристик показав, що при зниженні частоти регулювання ККД дещо зменшується, однак у режимах, близьких до номінальних, система зберігає високі показники ефективності. Дослідження перехідних процесів засвідчило їх плавний аперіодичний характер тривалістю близько 1–2 с без значних коливань струму та швидкості.

Отримані результати підтверджують відповідність електропривода вимогам технологічного процесу та його високу надійність і енергоефективність.

3.1 АТ Криворізька теплоцентральної схеми електропостачання та вибір трансформатора

Однолінійні схеми електропостачання Криворізької ТЕЦ (6 кВ та 0,4 кВ) наведені на рис. 3.1, 3.2.

Електропостачання Криворізької теплоцентралі здійснюється від Енергосистеми України по повітряним лініям електропостачання (ЛЕП) напругою 110 кВ. Схема має 1 ввід, 2 трансформатори паралельно включені 110/6 кВ.

Розрахунок потужності, що споживається електроприймачами, виконується за значенням їх установленної потужності та коефіцієнта попиту для кожного окремого споживача. Для визначення необхідної потужності трансформаторів проводиться розрахунок електричних навантажень за сумарною установленною потужністю всіх споживачів.

Для однорідних груп електроспоживачів робоче навантаження визначається за активною P , реактивною Q та повною S споживаною потужністю.

Потужність трансформаторів розраховується з урахуванням повної спожитої потужності:

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

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

Таблиця 3.1 - Паспортні параметри встановлених на Криворізькій ТЕЦ трансформаторів

Тип	S_N , кВА	U_N , кВ		Втрати, кВт		Напруга КЗ, u_k , %	Струм НХ, $I_{НХ}$, %
		U_{1N}	U_{2N}	ΔP_{xx}	$\Delta P_{кз}$		
ТДН-25000/110	25000	110	6	25	120	10,5	0,7
ТМГ-400/6	400	6	0,4	0,75	5,5	4,5	1,3

СХЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ КРИВОРІЗЬКОЇ ТЕПЛОЦЕНТРАЛІ

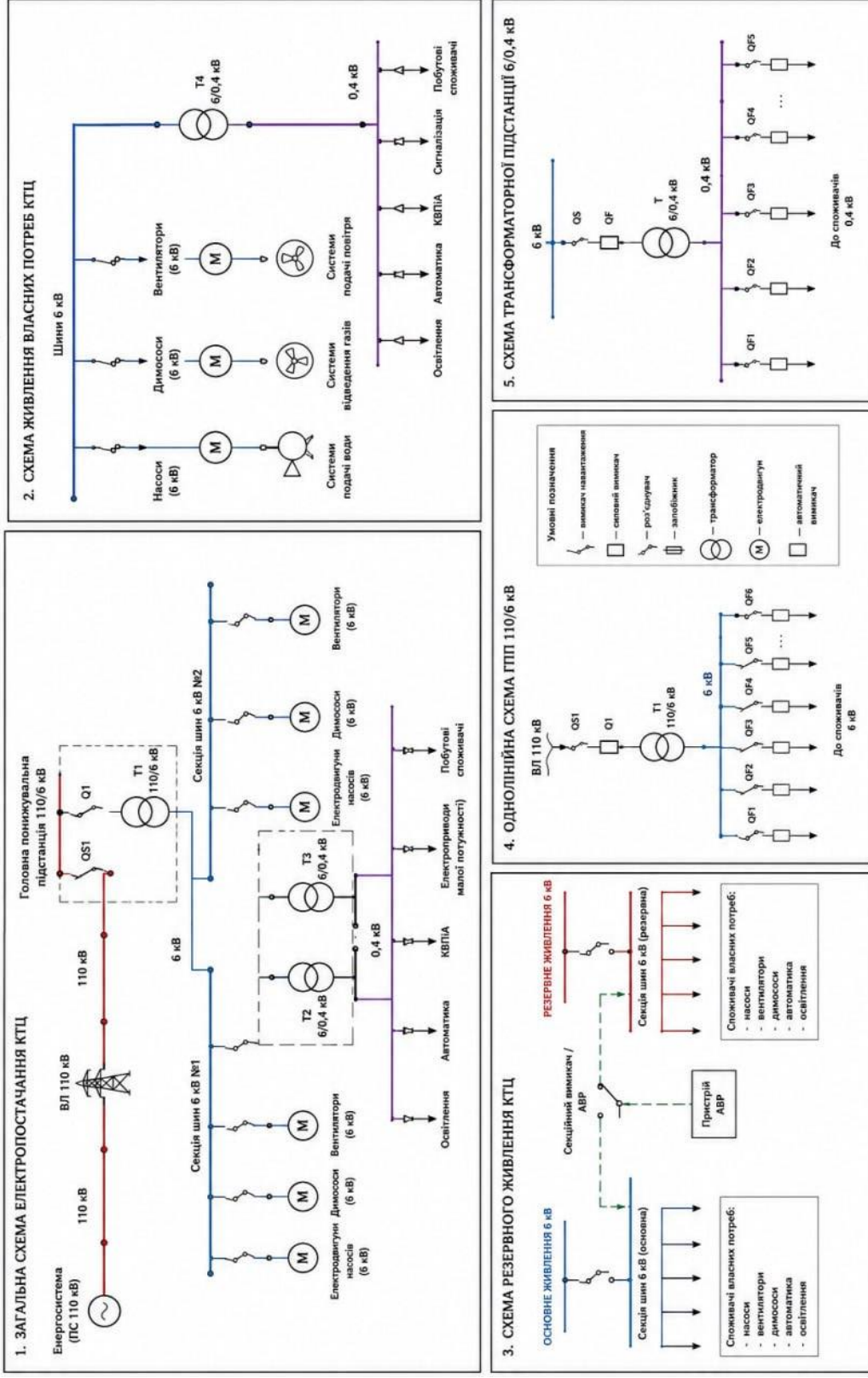
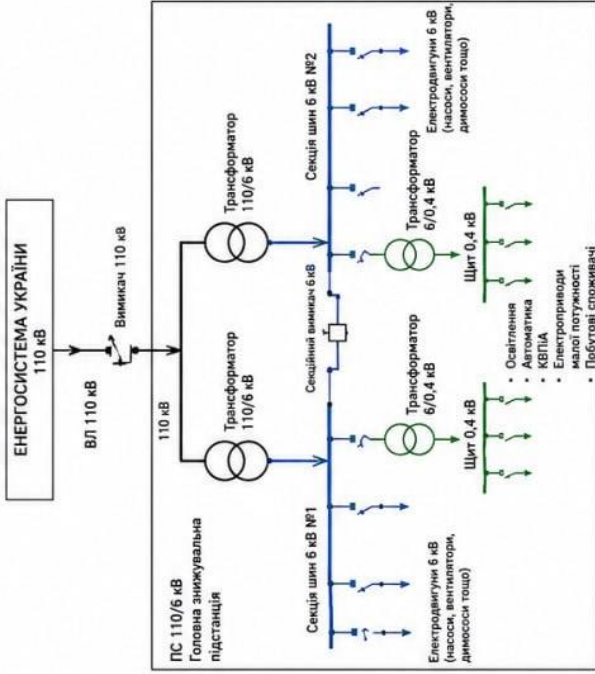


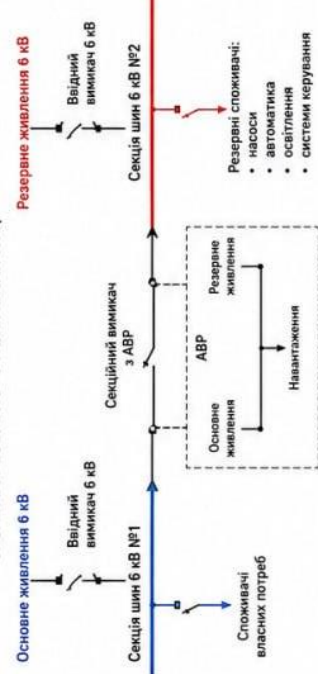
Рисунок 3.1 – Однолінійна схема електропостачання Криворізької теплоцентралі

СХЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ КРИВОРІЗЬКОЇ ТЕПЛОЦЕНТРАЛІ (КТЦ)

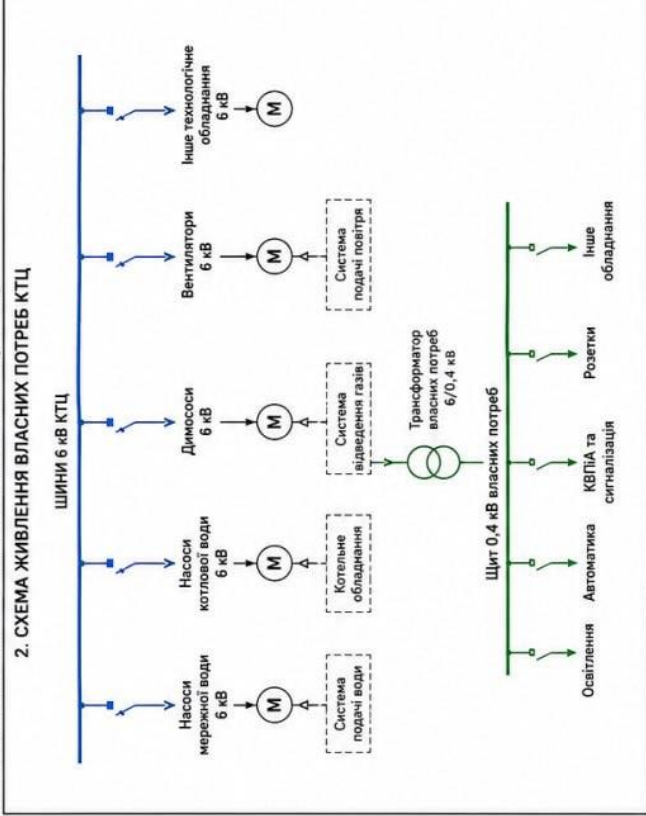
1. ЗАГАЛЬНА СХЕМА ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ КТЦ



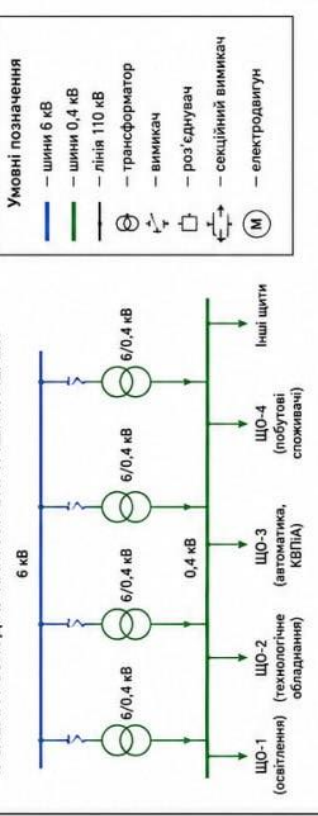
3. СХЕМА РЕЗЕРВНОГО ЖИВЛЕННЯ КТЦ



2. СХЕМА ЖИВЛЕННЯ ВЛАСНИХ ПОТРЕБ КТЦ



4. СХЕМА РОЗПОДІЛУ НАПРУГИ ВІНУТРІШНІХ МЕРЕЖ



Примітка: Схеми виконані для навчальних цілей.

Рисунок 3.2 – Однолінійна схема електропостачання Криворізької теплоцентралі

3.2 Основна силова апаратура РУ-6 кВ ТЕЦ

На стороні 6 кВ ТЕЦ встановлюється комплекс силової апаратури, призначеної для приймання та розподілу електроенергії, захисту обладнання, комутації силових кіл, забезпечення надійної та безпечної роботи електроустановки.

3.2.1 Вимикачі високої напруги

Основний комутаційний апарат для ввімкнення/вимкнення навантаження, відключення струмів короткого замикання.

Найчастіше застосовують вакуумні або елегазові вимикачі (BB/TEL-10, Siemens 3AH, Schneider Electric Evolis). Вакуумний вимикач BB/TEL-10 призначений для комутації силових кіл 6–10 кВ, захисту електроустановок при коротких замиканнях, роботи в комірках КРУ та КСО, комутації трансформаторів, електродвигунів і шинних секцій.

Встановлюємо вакуумний вимикач BB/TEL-10-20/1000 У2, паспортні дані якого приведені у табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Параметри BB/TEL-10-20/1000 У2

№ з/п	Параметри	Значення
1	Номінальна напруга	10 кВ
2	Найбільша робоча напруга	12 кВ
3	Номінальний струм	1000 А
4	Номінальний струм відключення КЗ	20 кА
5	Струм термічної стійкості	20 кА
6	Струм електродинамічної стійкості	51 кА
7	Час протікання струму КЗ	3 с
8	Кількість полюсів	3
9	Тип приводу	Електромагнітний
10	Власний час вимикання	0,03–0,05 с
11	Повний час вимикання	до 0,08 с

№ з/п	Параметри	Значення
12	Механічний ресурс	до 100 000 циклів
13	Комутаційний ресурс	до 50 000 операцій

Вакуумний вимикач ВВ/TEL-10 забезпечує надійну комутацію та захист електрообладнання мереж 6–10 кВ, має високий ресурс роботи та широко застосовується на ТЕЦ, підстанціях і промислових підприємствах.

3.2.2 Роз'єднувачі

Для РУ-6 кВ ТЕЦ доцільно застосувати роз'єднувачі внутрішньої установки з заземлювальними ножами. Для комірок КРУ-6 кВ встановлюють роз'єднувачі серії РВЗ-10 (див. табл. 3.3).

Таблиця 3.3 – Параметри роз'єднувача РВЗ-10/630

№ з/п	Параметри	Значення
1	Номінальна напруга	6-10 кВ
2	Найбільша робоча напруга	12 кВ
3	Номінальний струм	630 А
4	Струм термічної стійкості	20 кА (3 с)
5	Струм електродинамічної стійкості	50 кА

3.2.3 Заземлювачі

Для ТЕЦ на стороні 6 кВ застосовуються вбудовані заземлювачі в комірках КРУ та заземлювальні ножі роз'єднувачів типу РВЗ-10/630. Вони забезпечують безпечне заземлення відключених ділянок, виконання ремонтних робіт та підвищують загальну електробезпеку електроустановки.

Класифікація заземлювачів показана у табл. 3.4.

Таблиця 3.4 - Класифікація заземлювачів ТЕЦ

Вбудовані заземлювачі КРУ	Заземлювачі роз'єднувачів РВЗ-10	Заземлювачі повітряних ліній (для РП 6–10 кВ)
Використовуються у всіх сучасних КРУ-6 кВ (типу К-104, КРУ-2-10, ЗЕТО тощо)	РВЗ-10/630 із заземлювальними ножами - номінальна напруга: 6– 10 кВ - струм: до 630 А - термічна стійкість: 20 кА / 3 с - динамічна стійкість: до 50 кА	Якщо є відкриті приєднання: - РЗ-10, РЛНД із заземленням; - встановлюються на опорах ЛЕП; - використовуються для секціонування мережі.

3.2.4 Вимірювальні трансформатори та обмежувачі перенапруг

Трансформатори струму (ТПЛ-10, ТОЛ-10) та напруги (НТМИ-6, ЗНОЛ-6).

Для ТЕЦ на стороні 6 кВ доцільно застосовувати обмежувачі перенапруг типу ОПН-6/7,2/10/400 УХЛ1, які забезпечують надійний захист електрообладнання від грозових і комутаційних перенапруг та підвищують загальну електробезпеку системи електропостачання (див. табл. 3.5).

Таблиця 3.5 – Параметри обмежувача перенапруг типу ОПН-6/7,2/10/400 УХЛ1

№ з/п	Параметри	Значення
1	Клас напруги мережі	6 кВ
2	Найбільша робоча напруга	7,2 кВ

№ з/п	Параметри	Значення
3	Номінальна напруга	9 кВ
4	Номінальний розрядний струм	10 кА
5	Пропускна здатність	400 А
6	Імпульс 8/20 мкс	до 20–22 кВ (залишкова напруга)

ОПН встановлюють на вводах 6 кВ, секціях шин, біля трансформаторів власних потреб, на приєднаннях двигунів та ліній.

3.2.6 Реактори

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

При струмі $KЗ = 5 \text{ кА}$ вибираємо реактор РТСТ-6(10)-630-0,4 (див. табл. 3.6).

Таблиця 3.6 – Параметри реактора РТСТ-6(10)-630-0,4

№ з/п	Параметри	Значення
1	Номінальна напруга	6-10 кВ
2	Індуктивний опір	0,4 Ом
3	Номінальний струм	630 А
4	Струм термічної стійкості	до 20-31,5 кА (3 с)
5	Струм динамічної стійкості	до 50 кА

Для ТЕЦ на стороні 6 кВ при струмі короткого замикання 5 кА доцільно встановити сухий струмообмежувальний реактор типу РТСТ-6(10)-630-0,4 Ом, який забезпечує зниження струму КЗ до допустимого рівня та підвищує термічну і електродинамічну стійкість обладнання РУ-6 кВ.

3.2.7 Комірки КРУ-6 кВ

На ТЕЦ комірки КРУ-6(10) кВ призначені для приймання та розподілу електроенергії, захисту та комутації приєднань 6 кВ.

Встановимо комірку КРУ К-104-6(10)-20-630 УЗ (див. табл. 3.7).

Таблиця 3.7 – Параметри комірки КРУ К-104-6(10)-20-630 УЗ

№ з/п	Параметри	Значення
1	Номінальна напруга	6/10 кВ
2	Найбільша робоча напруга	7,2 / 12 кВ
3	Номінальний струм головних кіл	630 А
4	Номінальний струм збірних шин	до 1250–1600 А
5	Відключаюча здатність вимикача	20 кА
6	Термічна стійкість (3 с)	20 кА
7	Динамічна стійкість	51 кА
8	Тип вимикача	вакуумний (ВВ/TEL)

Для РУ-6 кВ ТЕЦ рекомендується застосовувати комірку КРУ К-104-6(10)-20-630 УЗ, яка забезпечує надійну комутацію, захист і розподіл електроенергії, має достатню термічну та електродинамічну стійкість і повністю відповідає умовам експлуатації на теплових електростанціях.

3.2.8 Вибір шин струмоведучих 6 кВ

Для установок доцільно застосовувати алюмінієві шини.

Визначимо лінійний струм вторинної обмотки трансформатора ТДН-25000/110, до якого підключена шини секції №1 та №2:

$$I_H = \frac{S_H}{\sqrt{3} \cdot U_H} = \frac{25000}{\sqrt{3} \cdot 6} = 2406 \text{ А.} \quad (3.2)$$

Вибираємо подвійні струмоведучі шини типу РУ-6 кВ (жорсткі шини) на струм 3000 А двосмугові, розмір 2х(120х10 мм), відстані при установці: $L=250$ мм (між ізоляторами), $a=150$ мм (між самими шинами).

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

$$S_{EK} = \frac{I_H}{J_{EK}} = \frac{2406}{1,3} = 1851 \text{ мм}^2,$$

де $J_{EK}=1,3 \text{ А/мм}^2$ – задана економічна щільність струму.

Умова виконується:

$$1851 < 2400 \text{ мм}^2$$

2) Перевірка шин струмоведучих до механічних навантажень:

Електродинамічна сила, яка діє на шину:

$$F = 1,76 \cdot I_y^2 \cdot \frac{l}{a} \cdot 0,1 = 1,76 \cdot 17^2 \cdot \frac{25}{15} \cdot 0,1 = 84,773 \text{ Н,} \quad (3.3)$$

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

l – відстань між ізоляторами, см;

a – відстань між шинами, см.

Вигинаючий момент:

$$M = F \cdot l = 84,773 \cdot 25 = 2119 \text{ Нсм;} \quad (3.4)$$

момент опору шини відносно вісі:

$$W = \frac{b \cdot h^2}{6} = \frac{1,0 \cdot 12,0^2}{6} = 24 \text{ см}^3. \quad (3.5)$$

Напруження, що виникає в шині:

$$\sigma_{роз} = \frac{M}{W} = \frac{2119}{24} = 88,292 \text{ Н/см}^2. \quad (3.6)$$

Умова виконується:

$$176 < 16000 \text{ Н/см}^2,$$

де $\sigma_{\text{дон}} = 16000 \text{ Н/см}^2$ – допустиме напруження в шині.

3) Перевірка шин струмоведучих на термічну стійкість:

$$S_{III} = \frac{I_{\infty} \cdot \sqrt{t}}{C} = \frac{6690 \cdot \sqrt{0,5}}{85} = 55,653 \text{ мм}^2. \quad (3.7)$$

Умова виконується:

$$112 < 120 \text{ мм}^2.$$

Алюмінієві шини $2 \times (120 \times 10 \text{ мм})$ мають значний запас термічної стійкості. При розрахунковому струмі короткого замикання 25 кА та часі його відключення 1 с умова термічної стійкості виконується з великим запасом.

Тому шинні конструкції типу РУ-6 кВ $2 \times (120 \times 10 \text{ мм})$ прийнятні для використання на ТЕЦ.

3.3 Розрахунок струмів короткого замикання в мережі АТ «Криворізька теплоцентраль» 0,4 кВ

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

Розрахунок опорів схеми заміщення мережі зведено у табл. 3.8 та 3.9.

Таблиця 3.8 – 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-25000/110, ТМГ-400/6	$X_{TP} = \frac{u_{\kappa} \% \cdot S_B}{100 \cdot S_H}$	(3.9)

№ з/п	Назва параметру	Розрахунковий вираз	Номер виразу
3	Активний опір трансформатора ТДН-25000/110, ТМГ-400/6	$r_{TP} = \frac{\Delta P_M \cdot S_B}{S_H \cdot S_H}$	(3.10)
4	Індуктивний опір кабельної лінії	$X_{*L} = \frac{X_{ол} \cdot l_l \cdot S_B}{U_B^2}$	(3.11)
5	Активний опір кабельної лінії	$r_{*L} = \frac{r_{ол} \cdot l_l \cdot S_B}{U_B^2}$	(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 3.9 – 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-25000/110, ТМГ-400/6	$X_{tp1} = \frac{10,5 \cdot 100 \cdot 10^6}{100 \cdot 25000 \cdot 10^3} = 0,42$ $X_{tp2} = \frac{4,5 \cdot 100 \cdot 10^6}{100 \cdot 400 \cdot 10^3} = 11,25$	0,42 11,25

№ з/п	Назва параметру	Розрахунковий вираз та величина параметру	Одиниця вимірювання
3	Активний опір трансформатора ТДН-25000/110, ТМГ-400/6	$r_{\text{тр1}} = \frac{120000 \cdot 100 \cdot 10^6}{25000 \cdot 25000 \cdot 10^6} = 0,019$ $r_{\text{тр2}} = \frac{5500 \cdot 100 \cdot 10^6}{400 \cdot 400 \cdot 10^6} = 3,438$	0,019 1,839
4	Індуктивний опір кабельної лінії ВВГнг-LS 4х25 мм ² , де $X_{0\text{к}}$ питомий опір	$X_L = \frac{0,08 \cdot 0,03 \cdot 100}{0,4^2} = 1,5$ $X_0 = 0,08 \text{ Ом/км,}$ $l = 0,03 \text{ км}$	1,5
5	Активний опір кабельної лінії ВВГнг-LS 4х25 мм ² , де $r_{0\text{к}}$ питомий опір	$r_L = \frac{0,727 \cdot 0,03 \cdot 100}{0,4^2} = 13,631$ $R_0 = 0,727 \text{ Ом/км,}$ $l = 0,03 \text{ км}$	13,631
6	Результуючий реактивний опір до точки КЗ	$X_{\sum 0,4} = 0,42 + 11,25 + 1,5 = 13,17$	13,17
7	Результуючий активний опір до точки КЗ	$r_{\sum 0,4} = 0,019 + 3,438 + 13,631 = 17,088$	17,088
8	Повний опір до точки КЗ	$z = \sqrt{13,17^2 + 17,088^2} = 21,574$	21,574
9	Сталий струм короткого замикання в точці КЗ	$I_{\text{КЗ}} = \frac{144,338}{21,574} = 6,69$	6,69 кА

№ з/п	Назва параметру	Розрахунковий вираз та величина параметру	Одиниця вимірювання
10	Ударний струм в точці КЗ	$I_y = 1,41 \cdot 1,8 \cdot 6,69 = 16,979 \approx 17$	17 кА

3.2 Розрахунок кабельної мережі Криворізької ТЕЦ 0,4 кВ

На Криворізькій ТЕЦ встановлено споживані, які споживають електричну енергію напругою 0,4 кВ.

Проведемо вибір кабелю насосної установки КН-1 (насос WILO BL100/300), де встановлено приводний двигун насоса WEG W22 180 М4 потужністю 18,5 кВт.

Струм двигуна WEG W22 180 М4 згідно з табл. 1.2 – 37 А.

Для живлення асинхронного двигуна WEG W22 180 М4 потужністю 18,5 кВт та номінальним струмом 37 А приймаємо мідний кабель типу ВВГнг-LS 4х6 мм². Такий кабель застосовується для стаціонарного прокладання у промислових мережах напругою до 1 кВ та має такі параметри: $R_0 = 3,08$ Ом/км, $X_0 = 0,08$ Ом/км.

Основні технічні характеристики кабелю ВВГнг-LS 4х6 мм²: допустимий тривалий струм для кабелю перерізом 4х6 мм² (довжина до 50 м) становить 40-50 А (залежно від способу прокладки).

1) Перевірка кабелю за допустимим тривалим струмом:

$$I_{доп} \geq I_p, \quad (3.18)$$

де $I_p = 37$ А – розрахунковий струм двигуна;

$I_{доп} \approx 40 - 50$ А – струм для кабелю ВВГнг-LS 4х6 мм².

Умова виконується:

$$40 > 37 \text{ А.}$$

2) Перевірка за допустимими втратами напруги.

Припустима втрата напруги:

$$\Delta U = \frac{\sqrt{3} \cdot I \cdot L \cdot (R \cdot \cos \varphi + X \cdot \sin \varphi)}{U_H} \cdot 100\% =$$

$$= \frac{1,73 \cdot 37 \cdot 0,03 \cdot (3,08 \cdot 0,85 + 0,08 \cdot 0,53)}{380} \cdot 100\% \approx 1,4\%$$
(3.19)

де $L = 30$ м - довжина кабелю;

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

$U_H = 380$ В – номінальна напруга.

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

$$1,4\% < 5\%.$$

3) Перевірка за економічною густиною струму.

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

$$S_{ек} = \frac{I}{J_{ЕК}} = \frac{37}{3,5} = 10,57 \text{ мм}^2.$$
(3.20)

Прийнятий стандартний переріз 10 мм² $S = 240$ мм². Отримане значення не відповідає економічному перерізу, тому необхідно вибрати кабель ВВГнг-LS 4х10 мм².

4) Перевірка на термічну стійкість до струмів короткого замикання.

Умова перевірки:

$$S_{\min} \geq \frac{I_{\infty} \cdot \sqrt{t}}{C} = \frac{6690 \cdot \sqrt{0,2}}{115} = 26,016 \text{ мм}^2,$$
(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 не виконується:

$$10 < 26 \text{ мм}^2.$$

Збільшуємо переріз кабелю та вибираємо ВВГнг-LS 4x25 мм².

Отже, для живлення двигуна WEG W22 180 M4 доцільно застосувати кабель ВВГнг-LS 4x25 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 WEG W22 180 M4

Для асинхронного двигуна WEG W22 180 M4 потужністю 18,5 кВт, напругою 380 В та номінальним струмом 37 А необхідно передбачити комплекс електричних захистів, які забезпечують безпечну та надійну роботу електропривода.

До основних захистів двигуна належать:

- захист від коротких замикань;
- захист від перевантаження;
- захист від обриву та перекосу фаз;
- мінімальний захист напруги;
- тепловий захист обмоток двигуна;
- захист від затягнутого пуску;
- захист від заклинювання ротора.

Для двигунів потужністю 18,5 кВт застосовуються автоматичні вимикачі, теплові та мікропроцесорні реле захисту двигунів.

1) Захист АД від короткого замикання.

Номінальний струм двигуна WEG W22 180 M4:

$$I_H = 37 \text{ А.}$$

Струм спрацювання автоматичного вимикача:

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

$$I_{ABT} = 1,25 \cdot I_H = 1,25 \cdot 37 = 46,25 \text{ А.}$$

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 C50 3P з характеристикою D:

- кількість полюсів – 3P;
- номінальний струм 50 А;
- вимикальна здатність 6-10 кА;
- тепловий та електромагнітний розчеплювач;
- механічна зносостійкість – до 20000 циклів;
- електрична зносостійкість – до 10000 циклів.

2) Вибір електромагнітного розчіплювача.

Пусковий струм асинхронного двигуна WEG W22 180 M4:

$$I_{II} = 6,6 \cdot I_H = 6,6 \cdot 37 = 244,2 \text{ А.} \quad (3.23)$$

Уставка миттєвого електромагнітного захисту:

$$I_{EM} = 1,2 \cdot I_{II} = 1,2 \cdot 244,2 = 293 \text{ А.} \quad (3.24)$$

Приймаємо:

$$I_{EM} = 500 \text{ А.}$$

Електромагнітний розчіплювач автоматичного вимикача з уставкою спрацювання близько 500 А забезпечує надійний захист двигуна від струмів короткого замикання та не спрацює під час пуску електродвигуна, для якого розрахунковий струм уставки становить 293 А.

3) Тепловий захист від перевантаження двигуна насоса WEG W22 180 М4.

Теплове реле вибирають за умовою:

$$I_{TP} = 1,1 \cdot I_H = 1,1 \cdot 37 = 40,7 \text{ А.} \quad (3.25)$$

Приймаємо уставку теплового реле:

$$I_{уст} = 50 \text{ А.}$$

Для захисту асинхронного двигуна WEG W22 180 від тривалих перевантажень вибрано теплове реле Schneider Electric LRD35 (або ABB TA75DU-50, або ІЕК 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.

Для асинхронного двигуна WEG W22 180 з номінальним струмом 37 А захист від обриву фаз доцільно виконати за допомогою реле контролю фаз, яке контролює наявність трьох фаз, чергування фаз, перекося напруг, пропадання однієї з фаз.

Для захисту електродвигуна WEG W22 180 вибрано реле контролю фаз моделі CZF-332 з часом спрацьовування 0,1-10 с.

5) Мінімальний захист напруги

Мінімальний захист напруги необхідний для запобігання самозапуску двигуна, відключення двигуна при зниженні напруги, захисту обмоток статора від перегріву.

Уставка мінімальної напруги:

$$U_{\min} = 0,7 \cdot U_H = 0,7 \cdot 380 = 266 \text{ В.} \quad (3.26)$$

Для захисту асинхронного двигуна WEG W22 180 від роботи при зниженій напрузі вибрано реле контролю напруги DigiTOP VP-380V з діапазоном контролю 50-400 В та часом спрацьовування 0,02-5 с.

6) Захист від затягнутого пуску двигуна WEG W22 180

Для керування пуском асинхронного двигуна WEG W22 180 вибрано реле часу Schneider Electric RE22R1QCMU на напругу 380 В.

Реле часу сумісне з системами автоматизації насосних установок. Використовується для затримки запуску насоса, автоматичного ввімкнення резервного насоса, обмеження частоти пусків електродвигуна, реалізації алгоритмів автоматичного керування.

Реле забезпечує діапазон витримки часу: $t = 0,1 \text{ с} - 100 \text{ год}$.

7) Захист від перегріву обмоток двигуна WEG W22 180

Для захисту двигуна WEG W22 180 M4 від перегріву обмоток доцільно застосувати реле температурного контролю ETI TER-7 з РТС-датчиками. Такий захист забезпечує своєчасне відключення двигуна при перевищенні допустимої температури та підвищує надійність роботи насосної установки.

Висновки за розділом 3

У даному розділі виконано аналіз та проєктування системи електропостачання АТ Криворізька теплоцентраль.

Обрано силові трансформатори ТДН-25000/110 та ТМГ-400/6. Проаналізовано роботу системи в нормальних та аварійних режимах, включаючи короткі замикання, що дозволило оцінити її надійність та стійкість.

Виконано розрахунок струмів короткого замикання на клеммах двигуна WEG W22 180 M4 та на його основі підібрано кабельні лінії, струмопровідні шини та комутаційну апаратуру.

Також здійснено вибір і перевірку захистів електродвигунів від перевантажень, КЗ, обриву фаз і зниження напруги, що підвищує надійність та безпеку роботи насосних агрегатів.

У результаті сформовано систему електропостачання, яка забезпечує надійну, безпечну та енергоефективну роботу об'єкта.

ВИСНОВКИ

1. Проведено аналіз технологічного процесу котлотурбінного цеху АТ Криворізька теплоцентраль та розглянуто конструкцію і принцип роботи конденсатного насоса WILO BL100/300. Досліджено основне технологічне обладнання, засоби автоматизації, контрольно-вимірювальні прилади та виконавчі механізми системи керування насосною установкою.

2. За технічними параметрами насосного агрегата виконано вибір електропривода та обрано асинхронний двигун WEG W22 180 M4 класу енергоефективності IE3, який забезпечує необхідну потужність, надійність роботи та знижене споживання електроенергії.

3. Для керування насосною установкою прийнято систему ПЧ – АД із застосуванням перетворювача частоти Schneider Electric ATV630D18N4, що дозволяє реалізувати плавне регулювання швидкості, знизити пускові струми та зменшити механічні навантаження на обладнання.

4. Виконано розрахунок параметрів схеми заміщення асинхронного двигуна та побудовано механічні й енергетичні характеристики електропривода. Встановлено, що частотно-регульований електропривод має жорсткі механічні характеристики та забезпечує стабільну роботу насосного агрегата у широкому діапазоні регулювання швидкості.

5. Проведено математичне моделювання електропривода у середовищі MATLAB Simulink із використанням бібліотеки SimPowerSystems. Дослідження перехідних процесів показало плавний аперіодичний характер

пуску та регулювання швидкості без значних коливань струму і швидкості, що підтверджує високу стійкість системи.

6. Аналіз енергетичних характеристик показав, що у режимах, близьких до номінальних, система зберігає високі показники ККД та забезпечує ефективне використання електричної енергії. Використання двигуна класу ІЕ3 сприяє зменшенню втрат електроенергії та експлуатаційних витрат.

7. Виконано проектування системи електропостачання котлотурбінного цеху з вибором силових трансформаторів ТДН-25000/110 та ТМГ-400/6, кабельних ліній, струмопровідних шин і комутаційної апаратури. Проведено аналіз роботи системи в нормальних та аварійних режимах.

8. Розраховано струми короткого замикання та на їх основі виконано вибір і перевірку елементів системи електропостачання, а також засобів релейного захисту електродвигунів від перевантажень, коротких замикань, обриву фаз і зниження напруги.

9. Отримані результати підтверджують, що застосування сучасного частотно-регульованого електропривода для конденсатних насосів забезпечує підвищення надійності, енергоефективності та безпеки роботи насосних агрегатів теплоелектроцентралей.