

Міністерство освіти і науки України  
ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
Кафедра АТРС



**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА  
ДО КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ БАКАЛАВРА  
на тему «Модернізація електропривода живильного насоса  
промислового котла»**

Здобувача СВО «Бакалавр»  
Попович Є. М. , студента  
3 курсу групи АЕМзт-31

Керівник проф. Осадчук П. І.

**Кваліфікаційна робота допускається до захисту**

Рішення кафедри від 16 червня 2026 р., протокол № 8.

Завідувач кафедри АТЕРС \_\_\_\_\_ Олексій ЖИГАЙЛО

Одеса – 2026 рік

# ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інститут: *Навчально-науковий інститут комп'ютерної інженерії, автоматизації, робототехніки та програмування ім. П.М. Платонова*

Кафедра: *АТЕРС*

Ступінь вищої освіти: *Бакалавр*

Галузь знань: *14 – Електрична інженерія*

Спеціальність: *141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка*

Освітня програма: *Екоенергетика та інтелектуальна електромеханіка*

## **ЗАТВЕРДЖУЮ**

Зав. кафедри ЕтаМ

д.т.н., проф. Осадчук П.І.

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2026 р.

## **ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА СВО**

**Попович Євген Михайлович**

1. Тема роботи: «Модернізація електропривода живильного насоса промислового котла»

Затверджено наказом ОНТУ № 641-03 від 21.11.2025 р.

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

2. Термін здачі здобувачем закінченої роботи: 15.06.2026 р.

3 Вихідні дані до роботи: Живильний насос парового котла котел ДЕ-4-14ГМО продуктивністю  $Q_n = 4,0$  т/год, тиск 1,4 МПа. Режим роботи – безперервний.

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

Вступ. 1. Загальна характеристика роботи, актуальність теми, об'єкт і мета роботи.

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

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

4. Організаційна та технологічна частина. Організація та технологія монтажу, ремонту і обслуговування та техніка безпеки праці при обслуговуванні електропривода насоса.

5 Економічна частина. Розрахунок економічної ефективності від модернізації електроприводу.

6. Висновки і рекомендації за прийнятими в роботі рішеннями. Список використаних джерел. Додатки.

5 Перелік демонстраційного матеріалу: слайди презентації (12-15 шт.): Титульний. Мета, задачі, методи. Технологічна схема живильного тракту котла. Розрахунок потужності двигуна, технічні характеристики. Статичні характеристики електропривода. Структурна схема перетворювача частоти. Принципова електрична схема силової частини. Модель електроприводу насосу з прямим пуском. Результати

модельовання приводу з прямим пуском. Модель модернізованого електроприводу живильного насоса. Результати модельовання приводу після модернізації. Висновки.

6. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи, що стосуються їх

| Розділ | Консультант | Підпис, дата   |                  |
|--------|-------------|----------------|------------------|
|        |             | Завдання видав | Завдання прийняв |
|        |             |                |                  |
|        |             |                |                  |

7 Дата видачі завдання: 22.11.2025 р.

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| №<br>з<br>/<br>п | Назва етапів кваліфікаційної роботи                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | Термін виконання етапів роботи | Прим. |
|------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|-------|
| 1                | Вступ. Загальна характеристика роботи, актуальність теми, об'єкт і мета роботи.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 05.04.2026                     |       |
| 2                | Розрахунково-конструкторська частина. Опис технологічної схеми котла. Загальна характеристика електропривода живильного насоса, як об'єкта управління. Опис принципу дії, конструкції та кінематичної схеми живильного насоса. Методи регулювання швидкості обертання електроприводу насоса. Формулювання вимог до електроприводу насоса, обґрунтування типу двигуна, розрахунок його потужності. Розрахунок статичних характеристик двигуна. | 30.04.2026                     |       |
| 3                | Модельовання динамічних режимів електромеханічної системи насоса до і після модернізації. Обґрунтування вибору, розробка структурних і функціональних схем та розрахунок параметрів окремих елементів системи електроприводу насоса. Опис системи ПЧ-АД.                                                                                                                                                                                      | 25.05.2026                     |       |
| 4                | Організаційна та технологічна частина. Організація та технологія монтажу, ремонту і обслуговування та техніка безпеки праці при обслуговуванні електропривода                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 03.06.2026                     |       |
| 5                | Економічна частина. Розрахунок економічної ефективності від модернізації електроприводу.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 10.06.2026                     |       |
| 6                | Висновки і рекомендації за прийнятими в роботі рішеннями. Розробка графічної частини роботи.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                |       |
| 7                | Попередній захист кваліфікаційної роботи бакалавра                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 16.06.2026                     |       |
| 8                | Захист кваліфікаційної роботи бакалавра                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 22.06.2025                     |       |

Здобувач-дипломник \_\_\_\_\_ Попович Є. М.  
Керівник роботи \_\_\_\_\_ Осадчук П. І..

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

*Підтверджую, що в кваліфікаційній роботі відсутні порушення норм академічної доброчесності.*

Здобувач-дипломник \_\_\_\_\_ Попович Є. М

## РЕФЕРАТ

Попович Є. М. «Модернізація електропривода живильного насоса промислового котла». Кваліфікаційна робота бакалавра. Одеса: ОНТУ, 2026. – 72 с. Іл.: 31. Табл.: 7.

У кваліфікаційній роботі представлено характеристику автоматизованого електроприводу живильної установки пароводяного шляху парового котла, сфера використання та його конструктивні риси. Були визначені вимоги до електроприводу, виконано розрахунок навантажень і підібрано двигун приводу живильного насоса.

В роботі було обґрунтовано вибір схеми електроприводу «перетворювач частоти – асинхронний двигун», проаналізовано принципи керування за допомогою перетворювача частоти та обрано алгоритм управління.

Здійснено розрахунки електричних параметрів схеми заміщення двигуна, розраховані механічні та електромеханічні статичні характеристики. Виконано моделювання перехідних процесів у двигуні під час прямого пуску та в комбінації з перетворювачем частоти зі скалярним та векторним керуванням.

Обчислено економічну вигоду від модернізації даної установки.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** паровий котел, живильний насос, електропривод насоса, перетворювач частоти, системи регулювання обертів.

## ABSTRACT

Popovich E. M. "Modernization of the electric drive of the feed pump of the industrial boiler." Bachelor's qualification. Odessa: ONTU, 2026. – 72 p. Ill.: 31. Table: 7.

The qualification work presents a description of the automated electric drive of the feedwater system of the steam-water path of a steam boiler, the scope of its use, and its design features. The requirements for the electric drive were determined, the load calculation was performed, and the motor for the feedwater pump drive was selected.

The work substantiates the choice of the electric drive scheme "frequency converter - asynchronous motor", analyzes the principles of control using a frequency converter, and selects a control algorithm.

Calculations of the electrical parameters of the motor equivalent circuit were carried out, and mechanical and electromechanical static characteristics were calculated. The modeling of transient processes in the motor during direct starting and in combination with a frequency converter with scalar and vector control was performed.

The economic benefit of modernizing this system has been calculated.

**KEYWORDS:** steam boiler, feedwater pump, pump electric drive, frequency converter, speed control systems.

## ЗМІСТ

|                                                                                                                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ВСТУП.....                                                                                                                                                                  | 8  |
| 1 ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ .....                                                                                                                                      | 10 |
| 1.1 Класифікація та загальні характеристики промислових котлів .....                                                                                                        | 10 |
| 1.2 Котли з природною циркуляцією низького тиску .....                                                                                                                      | 13 |
| 1.3 Паровий котел серії котел ДЕ-4-14ГМО.....                                                                                                                               | 15 |
| 2 РОЗРАХУНКОВО-КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА.....                                                                                                                                 | 20 |
| 2.1 Конструкція і технічні характеристики живильного насоса .....                                                                                                           | 20 |
| 2.2 Вибір живильного насоса .....                                                                                                                                           | 23 |
| 2.3 Прямий запуск нерегульованого електроприводу насосу .....                                                                                                               | 23 |
| 2.4 Вибір способу регулювання продуктивності живильного насоса .....                                                                                                        | 26 |
| 2.5 Вибір перетворювача частоти.....                                                                                                                                        | 28 |
| 2.6 Розрахунок параметрів схеми заміщення асинхронного двигуна .....                                                                                                        | 31 |
| 2.7 Побудова механічної характеристики електропривода .....                                                                                                                 | 37 |
| 2.8 Побудова природної механічної характеристики двигуна .....                                                                                                              | 37 |
| 2.9 Побудова сімейства механічних характеристик.....                                                                                                                        | 40 |
| 3 МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА .....                                                                                                                | 42 |
| 3.1 Дослідження динамічних характеристик асинхронного електропривода при<br>прямому пуску .....                                                                             | 42 |
| 3.2 Моделювання асинхронного електроприводу за скалярним законом з<br>блоком 6-пульсного частотного перетворювача <i>Six Step VSI Induction Motor</i><br><i>Drive</i> ..... | 44 |
| 4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА.....                                                                                                                                                   | 50 |
| 4.1 Визначення величини капітальних витрат нового варіанту .....                                                                                                            | 51 |
| 4.2 Розрахунок фонду заробітної платні.....                                                                                                                                 | 52 |
| 4.3 Розрахунок експлуатаційних витрат для базового і нового варіантів.....                                                                                                  | 53 |

|             |      |                |        |      |                                                                        |                |       |         |
|-------------|------|----------------|--------|------|------------------------------------------------------------------------|----------------|-------|---------|
|             |      |                |        |      | <b>КРБ.АТЕРС.1.641-03.6.1</b>                                          |                |       |         |
| Зм.         | Арк. | № докум.       | Підпис | Дата |                                                                        |                |       |         |
| Розробив    |      | Попович Є. М.. |        |      | Модернізація<br>електроприводу живильного<br>насоса промислового котла | Літ.           | Аркуш | Аркушів |
| Керівник    |      | Осадчук П. І.. |        |      |                                                                        |                | 6     |         |
|             |      |                |        |      |                                                                        | ОНТУ, АЕМзм-31 |       |         |
|             |      |                |        |      |                                                                        | 6              |       |         |
| Зав.кафедри |      | Жигайло О. М.  |        |      |                                                                        |                |       |         |

|                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.4 Розрахунок витрат на поточний ремонт обладнання .....               | 54 |
| 4.5 Розрахунок економічної ефективності.....                            | 55 |
| 4.6 Техніко-економічне обґрунтування вибору системи електроприводу..... | 55 |
| 5 ОРГАНІЗАЦІЙНА ТА ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА.....                            | 58 |
| 5.1 Загальні вказівки .....                                             | 58 |
| 5.2. Підготовка котла до роботи .....                                   | 61 |
| 5.3. Пуск котла.....                                                    | 63 |
| 5.4. Робота котла.....                                                  | 65 |
| 5.5. Зупинка парового котла.....                                        | 69 |
| 5 РЕЗУЛЬТАТИВНА ЧАСТИНА .....                                           | 71 |
| Висновки щодо кваліфікаційної роботи та рекомендації .....              | 71 |
| ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....                                       | 72 |

## ВСТУП

Автоматизація котелень – ключовий вектор підвищення ефективності, оптимізації споживання палива та забезпечення безперебійної роботи. Це надає значні переваги, зокрема, зменшення потреби в обслуговуючому персоналі, що сприяє підвищенню продуктивності праці та змінам у характері роботи обслуги, а також покращенню зручності праці. Крім того, підвищується точність підтримки параметрів пари, яка відпускається, збільшується безпека праці та надійність функціонування обладнання. Ефективність впровадження засобів автоматизації суттєво залежить від якості налаштування автоматичних регуляторів. Наразі в теорії автоматичного управління розроблено велику кількість інженерних методів налаштування автоматичних систем, опубліковано багато літератури щодо визначення оптимальних параметрів налаштування регуляторів.

Паровий котел призначено для виробництва насиченої пари, яка з барабану котла направляється споживачам. Для підтримання стабільного рівня води в барабані котла живильна вода подається в котел за допомогою живильного насоса. Під час роботи котельні в реальних умовах навантаження постійно змінюється, тому для точного підтримання рівня води у верхньому барабані котла необхідно відповідним чином змінювати продуктивність живильного насоса. Вирішити цю проблему в сучасних реаліях можливо не шляхом дроселювання потоку води, а через регулювання продуктивності насоса живильної води, тобто використовуючи регульований електропривод насосу.

У даній кваліфікаційній роботі розробляється система автоматизованого електроприводу живильних насосів для парових котлів ДЕ-4-14ГМО з продуктивністю 4,0 т/год. Для реалізації даного проекту необхідно розрахувати потужність привода живильного насосу, здійснити вибір електродвигуна та системи управління, розробити базову електричну схему електроприводу, розробити математичну модель системи автоматичного електроприводу, дослідити її роботу на комп'ютері, розглянути проект з точки зору економічної доцільності та забезпечення безпеки.

### **Актуальність теми**

Актуальність теми визначається потребою у забезпеченні стабільної та економічної роботи живильних насосів з використанням сучасних методів частотного регулювання

### **Мета дослідження**

Метою роботи є дослідження електропривода живильної насосної установки зі скалярним та векторним частотним керуванням, що дозволяє покращити показники якості регулювання та енергозбереження.

### **Об'єкт дослідження**

Об'єктом дослідження є процеси керування асинхронним електроприводом.

### **Предмет дослідження**

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

### **Цілі дослідження**

1. Проаналізувати технічні характеристики, проблеми керування та експлуатаційні особливості насосного агрегату.
2. Запропонувати структуру системи керування та оптимізувати параметри схеми керування електроприводом.
3. На основі запропонованої структури системи керування розробити математичну модель асинхронного електроприводу з використанням скалярного і векторного частотного регулювання.
4. Здійснити дослідження та аналіз динамічних характеристик електроприводу насосного агрегату при зміні навантаження.

# 1 ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

## 1.1 Класифікація та загальні характеристики промислових котлів

Котельний агрегат складається з парового котла, топки, водяного економайзера, забудови та арматури. У промисловості та на теплових електростанціях активно застосовуються котли для генерування водяної пари різних параметрів, що використовують природну або примусову циркуляцію. У деяких випадках для отримання пари використовуються котли спеціальної конструкції та специфічного призначення: котли з проміжними теплоносіями, котли з тиском у газовому тракті; реактори й парогенератори атомних електростанцій; котли, що використовують теплоту газів технологічних та енерготехнологічних агрегатів, утилізаційні та інші.

Стаціонарні котли, призначені для продукування пари, що використовується технологічними та побутовими споживачами, а також у турбоагрегатах для виробництва електроенергії, стандартизовані за параметрами й потужністю (ГОСТ 3619-82).

Позначення типів котлів: з природною циркуляцією – Е, з проміжним перегрівом – ЕПр, прямоточні – П, з проміжним перегрівом – ППр.

До основних параметрів парових котлів ГОСТ відносить: номінальну продуктивність  $D$ , кг/с; номінальний тиск пари  $p$ , МПа (кгс/см<sup>2</sup>); температуру перегрітої пари –  $t_{п.п.}$  °С; номінальну температуру живильної води –  $t_{ж.в.}$  °С; ККД брутто.

Випускаються наступні типи стаціонарних котлів:

– **котли низького тиску з природною та примусовою циркуляцією**, серед них котли з тиском пари 0,88 МПа (9 кгс/см<sup>2</sup>), продуктивністю 0,16...1 т/год насиченої пари, температурою живильної води 50 °С; пара використовується виробничими та побутовими споживачами;

– **котли середнього тиску**, до яких відносяться котли з природною циркуляцією з тиском пари для виробництва насиченої та слабо перегрітої пари

тиском 1,36 МПа (14 кгс/см<sup>2</sup>), продуктивністю 2,5...160 т/год та температурою живильної води 105 °С;

– **котли з природною циркуляцією** для генерування насиченої та слабо перегрітої пари з тиском 2,36 МПа (24 кгс/см<sup>2</sup>), продуктивністю 50...160 т/год та температурою живильної води 105 °С;

– **котли середнього тиску** 3,9 МПа (40 кгс/см<sup>2</sup>), з природною циркуляцією, що виробляють перегріту пару з тиском 3,9 МПа (40 кгс/см<sup>2</sup>), з температурою 440 °С, продуктивність котлів 10...160 т/год при температурі живильної води 150 °С;

– **котли високого тиску з природною та примусовою циркуляцією** продуктивністю 220...820 т/год. Ці котли виробляють перегріту пару з тиском 9,8 МПа (100 кгс/см<sup>2</sup>) температурою 540 °С при температурі живильної води 215 °С;

– **котли високого тиску** – 13,8 МПа (140 кгс/см<sup>2</sup>), температура перегрітої пари 540...560 °С, продуктивність 210...1000 т/год, температура живильної води 215 °С;

– **котли надкритичного тиску прямооточні**, продуктивністю 1000...3950 т/год, що виробляють пару з тиском 25 МПа (255 кгс/см<sup>2</sup>), з температурою перегрітої пари 540...560 °С, температура живильної води 270 °С.

Перша ступінь енергетичних параметрів пари (3,90 МПа, 440 °С) прийнята, виходячи з можливості виконання пароперегрівача та ступенів високого тиску турбіни з вуглецевої сталі. Температура труб пароперегрівача повинна бути не вищою за 500 °С. Тиск 3,90 МПа прийнято за умовою допустимої кінцевої вологості пари в ступенях низького тиску турбіни 10...12 %. Тиск 9,80 МПа відповідає максимально допустимій при прийнятій температурі пари 540 °С, вологості пари у турбіні, яка в цьому випадку не перевищує 12 %.

Параметри 13,8 МПа, 560 °С обрані, виходячи з умов можливого підвищення початкового тиску за наявності проміжного перегріву пари та збереження при цьому допустимої кінцевої вологості пари.

Значення надвисоких параметрів пари визначаються умовами надійної роботи сучасних легованих марок сталі. Ведуться роботи щодо застосування пари та більш високих параметрів. Є дослідні установки з тиском пари 29,4 МПа та температурою 600 °С.

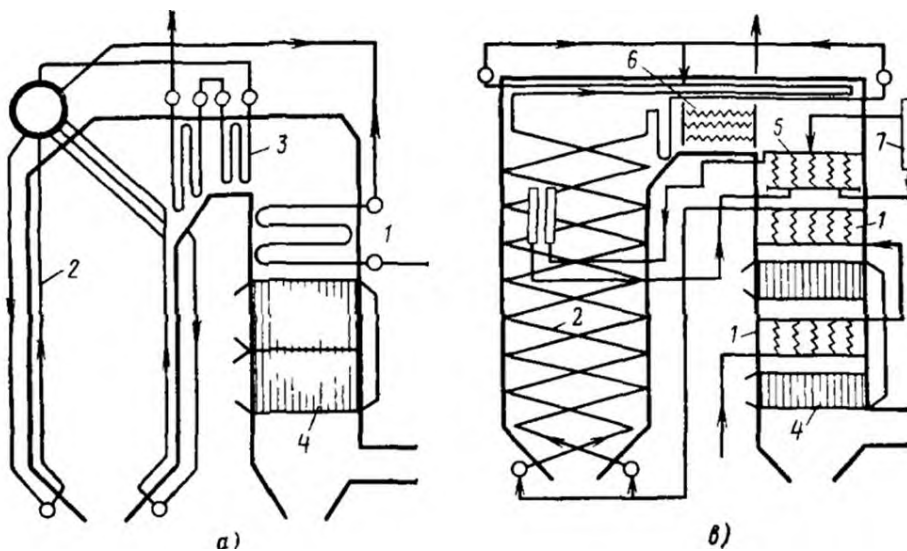
Котли для отримання пари високого та надкритичного тиску (25 МПа) проектується для теплових електростанцій середньої та великої енергетичної потужності. Діапазон тиску і продуктивності енергетичних котлів у відповідності з ГОСТ визначено з урахуванням параметрів пари та потужності стандартизованих турбоагрегатів, виходячи з встановлення одного-двох котлів на один турбоагрегат.

Стандартизація параметрів пари і потужності стаціонарних котлів дала можливість організувати серійне виробництво енергетичного устаткування, що істотно знизило вартість виробництва котлів і необхідного для них допоміжного обладнання, а також сприяло застосуванню найефективніших рішень в енергетичній галузі.

Найбільш поширені у промисловості котли з природною і примусовою циркуляцією відрізняються принципово тільки організацією гідродинаміки у випарних нагрівальних поверхнях. Схеми організації руху води, пароводяної суміші та пари в цих котлах ілюстровано на рисунку 1.1.

У котлах з природною циркуляцією (рисунок 1.1,а) живильна вода подається насосом в економайзер, а з нього – у верхній барабан. Під час природної циркуляції, що виникає у випарних поверхнях нагрівання, сформована пароводяна суміш направляється в барабан, де відбувається розподіл пари та води. З барабана пар спрямовується на перегрівання в пароперегрівач і далі – до споживачів. При критичному тиску в котлі природна циркуляція неможлива. Це, а також вимоги надійності циркуляції, збільшення маси та вартості конструкції зі збільшенням тиску в котлі обумовили використання котлів з природною циркуляцією при тиску до 13,8 МПа.

Котли, що працюють на низькому та середньому тиску, здебільшого будуються з природним рухом рідини. Це зумовлено кількома факторами: менш суворими вимогами до чистоти води, якою живлять котел, простою автоматикою контролю процесів спалювання палива та подачі води, а також відсутністю потреби у споживанні електроенергії для підтримки циркуляції теплоносія у випарній системі.



**Рисунок 1.1 – Типи парових котлів:**

**а – барабанний з природною циркуляцією, в – з багаторазово примусовою циркуляцією; 1 – економайзер; 2 – випарні поверхні нагріву 3 – пароперегрівач, 4 – повітропідігрівач, 5 – перехідна зона випарної поверхні нагріву, 6 – конвективний пароперегрівач**

У котлах з примусовим багаторазовим обігом вода для живлення подається насосом до економайзера, а потім до барабана. У випарних ділянках нагрівання циркуляція здійснюється примусово, за допомогою насоса, який інтегровано в циркуляційний контур. Розділення пари та води відбувається в

барабані, звідки пара прямує до пароперегрівача та далі до користувачів.

У прямоточних котлах економайзер, поверхня випаровування та пароперегрівач конструктивно об'єднані. Проходячи їх послідовно, вода нагрівається, перетворюється на пару, а пара перегрівається, після чого направляється до споживачів (рисунок 1.1,б).

Повне перетворення води на пару реалізується за час однократного проходження води крізь випарну зону поверхні нагріву. Відсутність барабана у прямоточних котлах високого тиску значно (на 8...10 %) зменшує витрати металу при їх виготовленні. Котли, що працюють при тиску 25 МПа, виготовляють виключно прямоточними.

## **1.2 Котли з природною циркуляцією низького тиску**

Наразі виробляються різноманітні конструкції котлів низького тиску. До них належать котли з димогарними та жаровими трубами, де продукти згоряння рухаються всередині труб, а вода омиває їх зовні. Також є водотрубні котли, в

яких вода, що випаровується, циркулює в трубах, а продукти згоряння омивають їхню зовнішню поверхню.

Особливостями водотрубних котлів малої паропродуктивності та низького тиску, які використовуються в промисловості, є:

- розвиток конвективних випарних поверхонь нагріву, що обумовлено меншим, ніж потрібно для випаровування води при низькому тиску, теплосприйняттям екранів та економайзера.

- завершення охолодження продуктів згоряння в конвективному водяному пучку або економайзері, що стає можливим за низької температури живильної води (80...100 °С) та економічно виправданої підвищеної температури газів на виході, що властиво котлам з малою паропродуктивністю.

- відсутність підігріву повітря, що полегшує конструкцію котла і прийнятно при шаровому спалюванні твердого палива, а також при факельному спалюванні газу та мазуту.

- двобарабанна схема включення випарних поверхонь нагріву та розташування опускних труб, що обігріваються, циркуляційного контуру конвективного пучка в зоні низьких температур газів.

- відсутність пристрою для регулювання температури перегріву пари.

Котли продуктивністю 2,5...25 т/год серії КЕ випускаються з топками для спалювання твердого шарового палива. Робочий тиск пари становить 1,37...2,36 МПа, температура пари – 194...225 °С, температура живильної води – 105 °С.

Котли з продуктивністю до 4 т/год оснащуються топками з пневмомеханічними закидачами та решітками з поворотними колосниками.

Котли продуктивністю понад 4 т/год комплектуються топками з ланцюговими решітками прямого та зворотного ходу. Живильна вода з економайзера надходить у верхній барабан. Вода в нижній барабан спускається по задніх трубах конвективного пучка, передні труби якого використовуються як випарні. Окрім цього, котлова вода з верхнього барабана надходить по опускним стоякам, які винесені за межі обігріву колектори бічних екранів.

Пара, що відділена в жалюзійному сепараторі у верхньому барабані, прямує у паропровід. Бічні стіни котлів захищені натрубною обмуровкою, яка

складається з шару та кількох ізоляційних плит, зовні закритих металевою обшивкою. Котли обладнані системою повернення виносів та гострим дуттям.

### **1.3 Паровий котел серії котел ДЕ-4-14ГМО**

Двобарабанні вертикальні водотрубні котли серії ДЕ виробляються з номінальною паропродуктивністю 4,0; 6,5; 10; 16, 25 т/год для забезпечення потреб промислових підприємств, транспортних компаній та сільськогосподарських організацій у виробничих та опалювальних цілях.

Котли призначені для роботи на мазуті, дизельному паливі та природному газі. Конструктивною особливістю котлів ДЕ з тиском до 2,4 МПа від виробника ТОВ «Монастирищенський котельний завод «Енергетик» (Україна) [https://energetik.ua/catalog/parovi\\_kotly/e-de-1-4-gaz-mazut/](https://energetik.ua/catalog/parovi_kotly/e-de-1-4-gaz-mazut/) є модифікована конструкція фронтального екрану котла та геометрії камери згоряння, що дозволяє без обмежень використовувати палинкові пристрої вітчизняного та імпорного виробництва. Додатково, в конструкцію котла введено опускний контур, який підвищує надійність природної циркуляції та гарантує високі показники якості пари.

Конструкція трубної системи котлів витримує короточасний тиск газів у топці до 3000 Па та розрідження в топці до 400 Па. За стійкістю до впливу температури та вологості навколишнього повітря парові котли виготовляються у кліматичному виконанні УХЛ категорії розміщення 4 за ГОСТ 15150. Конструкція котлів забезпечує сейсмостійкість 6 балів за шкалою MSK-64.

Середній строк експлуатації до списання щонайменше 20 років, за умови напруцювання не більше 80000 годин.

#### **1.3.1 Склад, будова та принцип дії котла**

Паровий котел котел ДЕ-4-14ГМО включає в себе основні компоненти (рисунок 1.4): трубну систему; теплоізоляцію з обшивкою; систему живлення; сходи з платформою; систему керування.

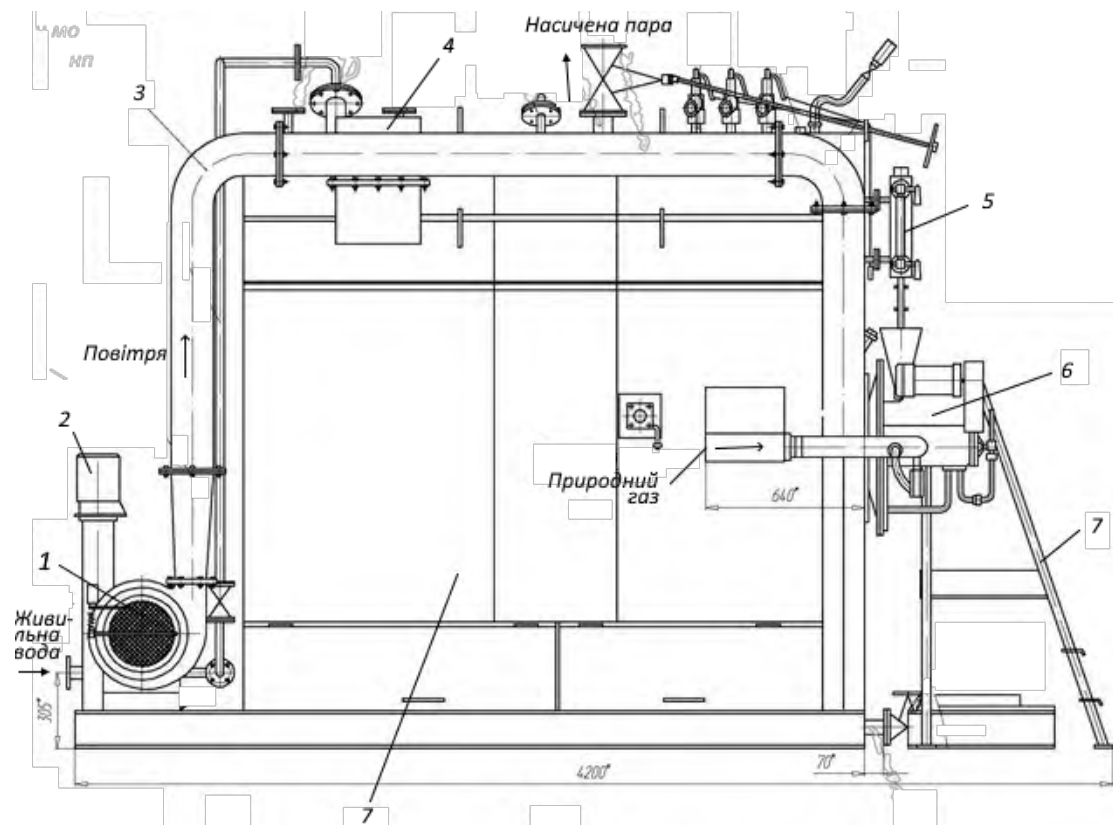


Рисунок 1.2 – Зовнішній вигляд парового котла котел ДЕ-4-14ГМО

1 – дуттьовий вентилятор; 2 – живильний насос; 3 – повітропровід; 4 – запобіжний вибуховий клапан; 5 – водомірне скло; 6 – пальник; 7 – сходи з платформою; 8 – теплоізоляція з обшивкою

Трубна система (рисунок 1.4) реалізована в газонепроникному варіанті з використанням суцільнозварних екранів топки як радіаційної поверхні і складається з таких елементів:

- верхнього та нижнього барабанів, які розташовані на одній вертикальній осі і сполучені між собою пучком труб, що формують конвекційну поверхню нагріву;
- переднього та заднього екранів, виготовлених з гладких труб, сполучених між собою мембранами зі смуги.

Екрани включені в циркуляційний контур за допомогою верхнього та нижнього колекторів, що вваренні у барабани. С-подібний екран, виконаний з гладких труб з мембранами, що закриває стелю, під і ліву бічну стінку камери згоряння. На верхньому барабані розміщено патрубки водовказівної арматури і рівневимірювальної колонки.

Таблиця 1.1 – Технічні характеристики котла котел ДЕ-4-14ГМО

| Найменування                                           | Ном. значення  |
|--------------------------------------------------------|----------------|
| Паливо                                                 | Газ, мазут     |
| Номінальне виробництво пари, т/год                     | 4,0            |
| Робочий тиск насиченої пари, МПа                       | 1,3            |
| Розрахункова температура насиченої пари, °С            | 195            |
| Температура живильної води, °С                         | 50             |
| Температура димових газів на виході котла, °С          | 260            |
| Розрахункова витрата палива, м <sup>3</sup> /год       | 326            |
| Розрахункова витрата палива, кг/год                    | 278            |
| Коефіцієнт корисної дії, %,                            |                |
| – позиційний                                           | 89,5           |
| – плавний                                              | 91             |
| Маса котла (зі змонтованим обладнанням), кг, не більше | 9340           |
| Габарити котла, мм, не більше: довжина, ширина, висота | 4880×3820×3600 |

Система живлення парового котла створена для поповнення котла водою та забезпечення його функціонування, складається з насосів подачі з електричними приводами, трубопроводів і запірної арматури. Воду насосний агрегат забирає з живильного бака та транспортує до нагнітального трубопроводу. Тиск, який створює насос, контролюється за допомогою манометра.

Під час зупинки насосних установок, вплив зворотного тиску води з котла на насоси запобігається зворотним клапаном. Вода в барабан подається через спеціальну трубу, яка знаходиться всередині барабана і має ряд радіальних отворів.

Система управління розроблена для автоматичного контролю та захисту парового котла. Набір засобів керування, разом із датчиками, забезпечує реалізацію таких функцій:

- автоматичний запуск та зупинку котла згідно з встановленою програмою;
- регулювання рівня води у барабані котла;
- контроль тиску пари в котлі;
- активація захисту та включення аварійної сигналізації при: згасанні полум'я пальника; аварійному підвищенні тиску пари; зниженні рівня води в котлі; припинення подачі води до котла; критичне збільшення або падіння тиску

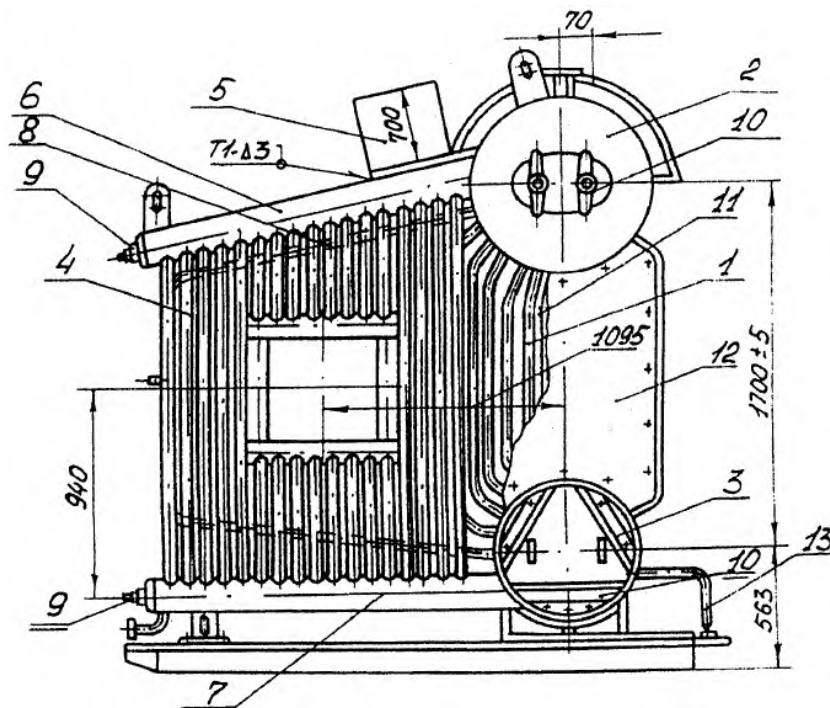


Рисунок 1.4 – Трубна система котла котел ДЕ-4-14ГМО:

1 – конвективний пучок; 2 – верхній барабан; 3 – нижній барабан; 4 – фронтовий екран; 5 – захисний короб; 6 – колектор верхній; 7 – колектор нижній; 8 – С-подібний топковий екран; 9 – люки колекторів; 10 – люки барабанів; 11 – перегородка; 12 – притискний лист; 13 – репер

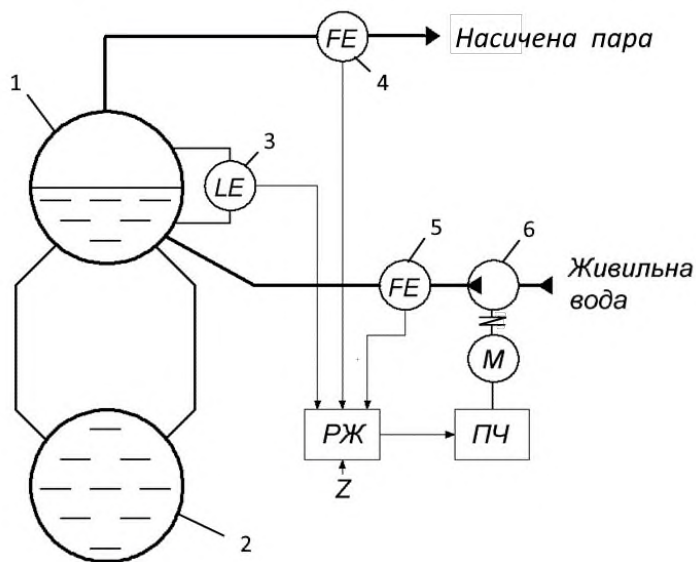
палива перед пальником; небезпечне зменшення тиску повітря перед пальником; несправності основних складових блоку; зростання тиску в топці, або вибух газів у топці чи газоходах; перенавантаження або коротке замикання електродвигунів; збереження інформації про першопричину аварії.

### 1.3.2 Опис автоматичної системи регулювання живлення парового котла

Паровий котел як об'єкт контролю є складною динамічною системою з декількома, взаємопов'язаними, вхідними і вихідними фізичними параметрами.

Проте, чітко виражена направленість окремих ділянок за ключовими каналами регулюючих впливів, як-от витрата живильної води  $D_{ж.в.}$ , рівень води в барабані  $H_6$ , витрата пари  $D_{ж.в.}$ , та ін., дозволяє проводити стабілізацію контрольованих величин через незалежні одноконтурні системи, що взаємодіють лише через об'єкт управління.

Структурна схема АСР живлення котла зображена на рисунку 1.5.



**Рисунок 1.5 – Структурна схема АСР**

**живлення котла**

**1, 2 – верхній і нижній барабани котла; 3 – датчик рівня води в барабані; 4, 5 – датчики витрати пари та живильної води; 6 – живильний насос; РЖ – регулятор живлення; частоти; М – асинхронний електродвигун; LE, FE – датчики рівня та витрат**

Для контролю продуктивності насосу живильної води використано перетворювач частоти ПЧ. Як триімпульсний регулятор живлення (регулятор рівня) у регуляторі живлення РЖ котла використано мікропроцесорний контролер, котрий приймає на вхід аналогові уніфіковані струмові сигнали 0...5 мА від датчика рівня води у верхньому барабані котла 3 та від датчиків витрати пари 4 і живильної води 5.

Два останні сигнали призначені для покращення перехідних процесів регулювання рівня в барабані котла з урахуванням явища «набухання» рівня. Вихідний

уніфікований струмовий сигнал 4...20 мА від регулятора РЖ надходить на аналоговий вхід перетворювача частоти ПЧ.

Мікропроцесорний контролер типу МТР-8 виконує такі функції:

- 8-ми канальний вимірник;
- 8-ми канальний дво- або трипозиційний ПІД-ШІМ або ПІД-імпульсний регулятор;
- 4-х канальний ПІД-аналоговий регулятор;
- 8-ми канальний сигналізатор виходу параметрів за допустимої межі;
- 8-ми канальний прилад захисного відключення за параметром;

Кожен з каналів терморегулятора МТР-8 може виконувати будь-яку з перерахованих функцій.

## 2 РОЗРАХУНКОВО-КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА

### 2.1 Конструкція і технічні характеристики живильного насоса

Живильні насоси належать до числа найбільш важливого допоміжного обладнання котельні, оскільки вони забезпечують безперервну подачу води в котел. Запас води в котлі незначний, тому припинення живлення його водою може призвести до повного її випаровування, інтенсивного розігріву і руйнування поверхонь нагріву і котла в цілому. Як сучасні живильні пристрої застосовують відцентрові насоси високого тиску, розраховані на роботу при температурі води 105...150 °С. Щоб уникнути кавітації, на вході в насос повинен бути забезпечений підпір рідини, що досягається встановленням деаератора та насосів на різних відмітках (поверхах) котельні. Відцентрові насоси мають електричний привід змінного струму. Для роботи в аварійному режимі може бути передбачений і паротурбінний привід.

Розрахунок продуктивності живильних пристроїв виконують за максимальним навантаженням котельні з запасом не менше 10 %. При визначенні необхідної подачі (продуктивності) живильних пристроїв слід враховувати витрату води на власні потреби котельні. Сумарна подача всіх живильних насосів повинна бути такою, щоб у разі виходу з ладу одного з них інші змогли забезпечити роботу котлоагрегатів з номінальним навантаженням. Для гарантування нормального живлення котлів, та відповідно до Правил експлуатації котлів, на парові котли необхідно встановлювати основний і резервний живильний насоси парового котла.

Розрахункова максимальна витрата живильної води від живильного насоса з урахуванням запасу за виробництвом пари:

$$Q_{\text{н}} = K_{\text{п}} \cdot Q_{\text{жв}}^{\text{розр}} = \frac{1,1 \cdot 4,0 \cdot 1000}{3600} = 1,22 \text{ кг/с},$$

де  $K_{\text{п}} = 1,1$  – коефіцієнт запасу з паропроductивності;

$Q_{\text{в}}^{\text{розр}} = 4,0 \text{ т/год}$  – розрахункова (номінальна) годинна масова продуктивність котла по парі.

Барабан котла і деаератор, як правило, розміщені у верхній частині котельні, тому позначки рівнів води в них приблизно співпадають. Перепад тиску  $\Delta P$ , спричинений різницею відміток рівнів води в барабані котла і в деаераторі  $h = 3,5 \text{ м}$ :

$$\Delta P = \rho \cdot g \cdot h = 910,7 \cdot 9,81 \cdot 3,5 = 3124 \text{ Па.}$$

де  $\rho = 910,7 \text{ кг/м}^3$  – густина живильної води при температурі  $104 \text{ }^\circ\text{C}$  та тиску  $0,02 \text{ МПа}$  в атмосферному деаераторі;

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

Сумарний опір всмоктувального та напірного трактів живильної води:

$$h_c = l_{\text{тр}} \cdot \Delta h_c = 20 \cdot 80 = 1600 \text{ Па,}$$

де  $l_{\text{тр}}$  – довжина живильного трубопроводу від деаератора до котла.

$\Delta h_c$  – питома втрата тиску у трубопроводі. Для трубопроводів гарячої води допускається приймати  $\Delta h_c = 80 \frac{\text{Па}}{\text{м}}$ .

Напір, що повинен забезпечити живильний насос, визначається за формулою:

$$\begin{aligned} H_{\text{н}} &= P_{\text{б}} - P_{\text{д}} + \Delta h + h = \\ &= 0,9 \cdot 10^6 - 0,02 \cdot 10^6 + 3124 + 1600 = 1384724 \text{ Па} = 138,5 \text{ м вод. ст.} \end{aligned}$$

де  $P_{\text{б}}, P_{\text{д}}$  – надлишковий тиск в барабані котла і в деаераторі, Па.

Розрахункова потужність електродвигуна для приводу живильного насоса:

$$N_{\text{н}} = \frac{\rho \cdot g \cdot Q_{\text{н}} \cdot H_{\text{н}}}{\eta_{\text{н}} \cdot 1000} = \frac{910,7 \cdot 9,81 \cdot 4 \cdot 140}{0,78 \cdot 1000} = 6,41 \text{ кВт.}$$

де  $Q_{\text{н}}$  – витрата живильної води,  $\text{м}^3/\text{год}$ ;

$\eta_{\text{н}}$  – коефіцієнт корисної дії (ККД) живильного насоса (для сучасних типів живильних пристроїв  $\eta_{\text{н}} = 0,74 \dots 0,8$ ).

За розрахованою потужністю привода насоса підбирається тип електродвигуна та його характеристики.

За отриманими даними обираю асинхронний електродвигун типу АІР112М2 категорії розміщення У2, виконання ІМ1082 потужністю 7,5 кВт, дані якого наведено у таблиці 2.1, а зовнішній вигляд – на рисунку 2.1.

Таблиця 2.1 – Основні характеристики електродвигуна АІР112М2У2

| Тип                                    | АІР112М2У2 |
|----------------------------------------|------------|
| Потужність $P$ , кВт                   | 7,5        |
| Номінальна частота обертання, об/хв    | 2900       |
| ККД, %                                 | 87         |
| $\cos \varphi$                         | 0,9        |
| Номінальний струм $I_n$ , А            | 14,9       |
| Номінальний момент $M_n$ , Н·м         | 18,43      |
| $I_p/I_n$                              | 7,5        |
| $M_p/M_n$                              | 2,2        |
| $M_{\max}/M_n$                         | 2,3        |
| $M_{\min}/M_n$                         | 1,6        |
| Момент інерції $J$ , кг*м <sup>2</sup> | 0,0185     |
| Маса, кг                               | 49         |

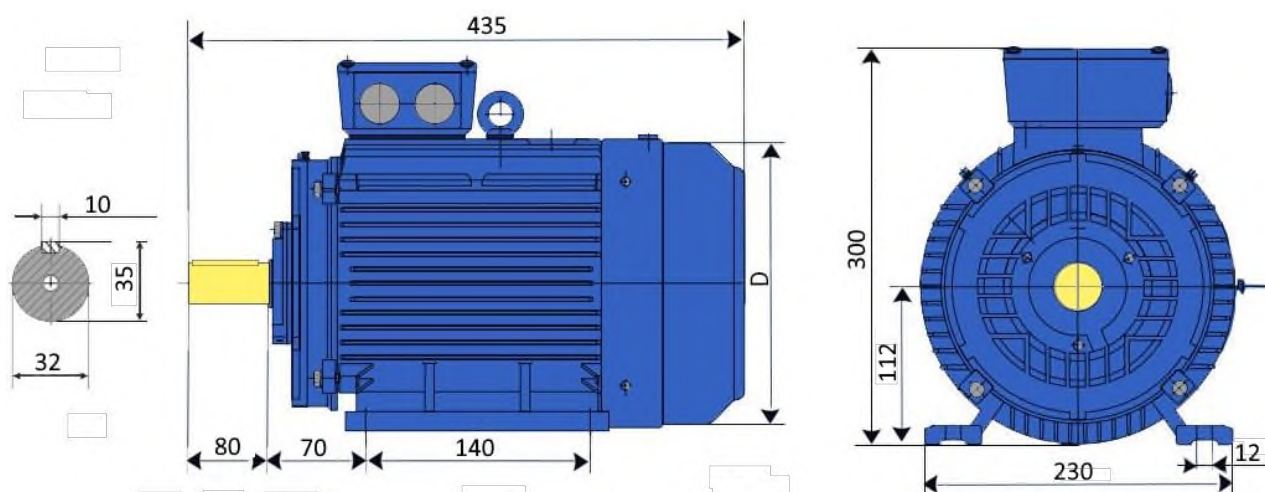


Рисунок 2.1 – Електродвигун АІР112М2У2 виконання ІМ1081

## 2.2 Вибір живильного насоса

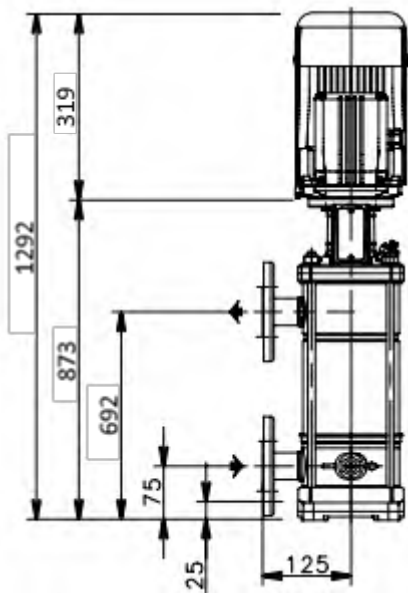


Рисунок 2.2 – Зовнішній вигляд та розміри насосної установки 5SV25

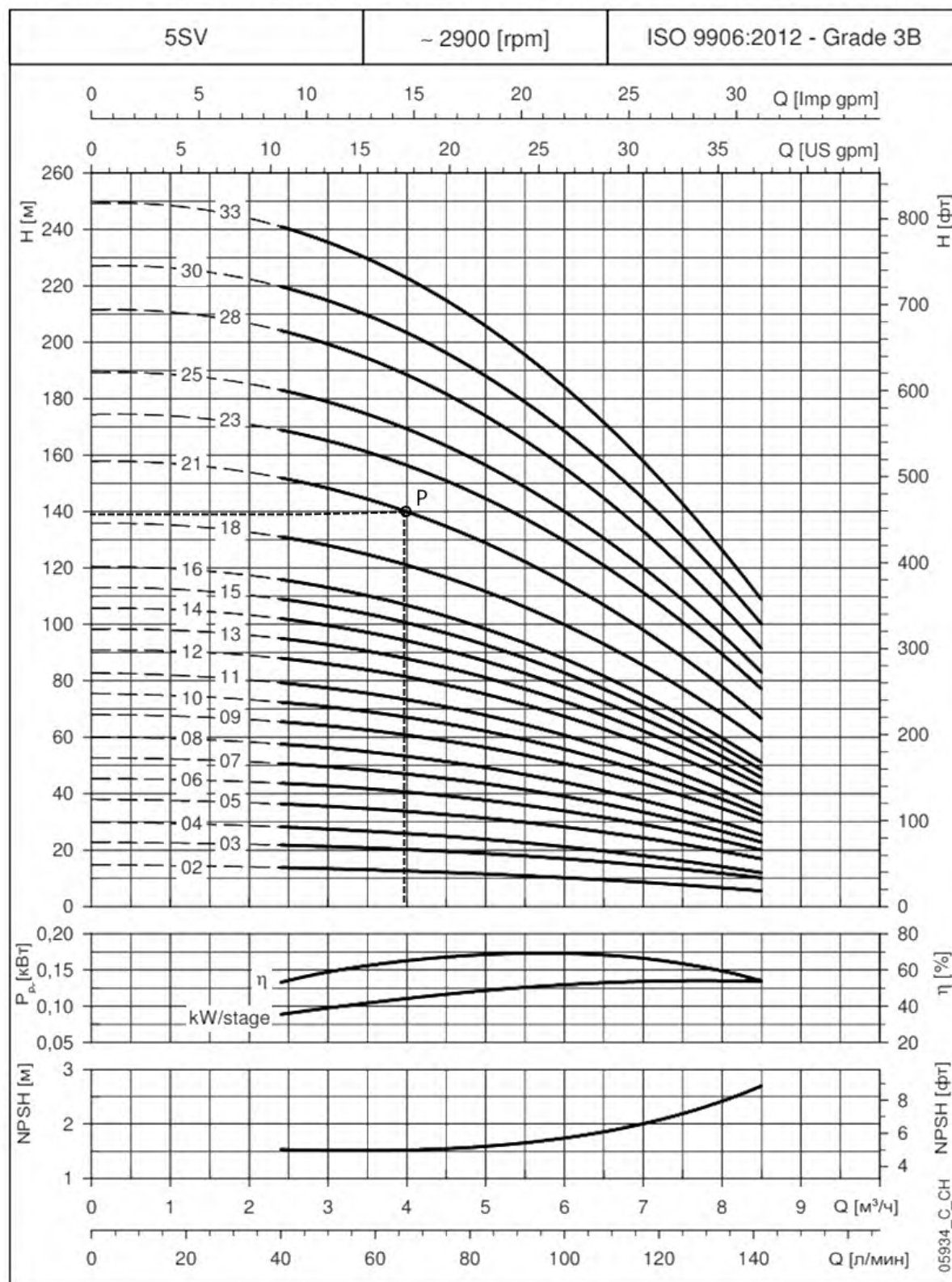
Парові котли типу котел ДЕ-4-14ГМО зазвичай постачаються з вертикальними чи горизонтальними багатоступеневими живильними насосами від Xylem Inc., торговими марками якої є Lowara, e-SV, HYDROVAR, Xylect [9].

За гідравлічними параметрами (рисунок 2.3) з каталогу насосів Lowara [10] визначаємо робочу точку  $P$ , де витрата води становить  $1,1 \cdot Q_{\text{в}}^{\text{розр}} = 4,0 \text{ м}^3/\text{год}$  при щільності води  $\rho = 965 \text{ кг/м}^3$  та напорі  $H_{\text{н}} = 140 \text{ м}$ . Оскільки робоча точка розміщена найближче до гідравлічної характеристики насоса моделі 1SV19, то його і обираємо. З графіка видно, що ККД насоса за параметрами робочої точки досягає найбільшого значення  $\eta = 0,7$ . Зовнішній вигляд насоса показано на рисунку 2.2.

## 2.3 Прямий пуск нерегульованого електроприводу насосу

Прямий пуск асинхронного двигуна реалізується за допомогою нескладної схеми з'єднання, що застосовує стандартні релейно-контакторні комутаційні пристрої (рисунок 2.4). Цей електропривод відноситься до нерегульованих типів, його швидкість обертання визначається точкою перетину механічних характеристик двигуна та навантаження при стандартній частоті мережі 50 Гц.

Ці електроприводи використовуються у схемах, де передбачено дросельний принцип регулювання технологічного параметра, наприклад, з гідравлічною засувкою, яка включена послідовно з живильним насосом для підтримки заданого значення тиску води у котлі. Головною перевагою такого приводу є простота схеми підключення електроприводу насосу.

**СЕРИЯ 5SV**
**РАБОЧИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МОДЕЛЕЙ НА 50 Гц, 2-ПОЛЮСНЫХ**


Эти показатели действительны для жидкостей плотностью  $\rho = 1,0 \text{ кг/дм}^3$  с кинематической вязкостью  $\nu = 1 \text{ мм}^2/\text{с}$ .

Рисунок 2.3 – Гидравлические характеристики насосов серии 1SV

Недоліком прямого пуску є значні пускові струми та моменти, які переважають номінальні в 5...8 разів. Це може призводити до механічних та гідравлічних ударів в електричних та гідравлічних мережах.

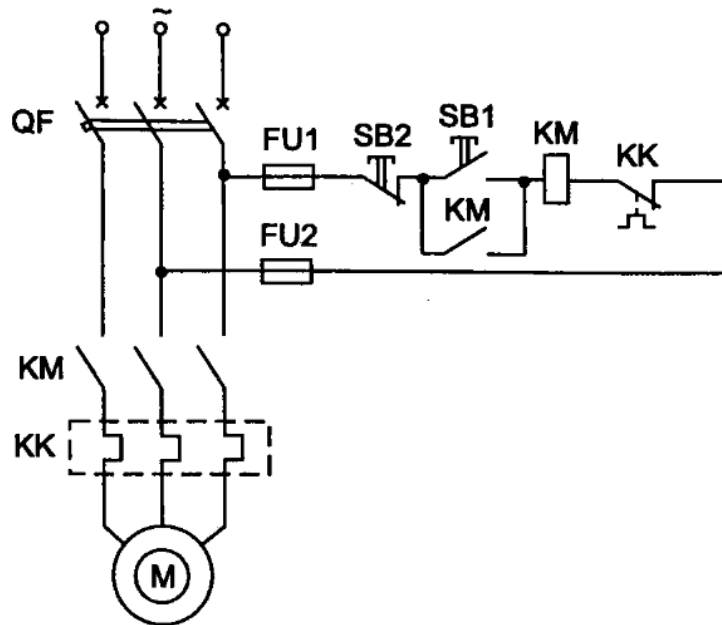


Рисунок 2.4 – Принципова електрична схема нерегульованого асинхронного електроприводу

Запуск електроприводу відбувається через натискання кнопки «Пуск» SB1, що активує напругу на обмотку магнітного контактора KM. Три контакти контактора з'єднують трифазну напругу з обмотками статора двигуна М, а четвертий контакт – шунтує кнопку SB1, реалізуючи самопідхоплення контактора KM. Оберти ротора двигуна залишаються стабільними та не підлягають регулюванню, тому необхідна витрата води корегується зміною гідравлічного опору системи за допомогою гідравлічної засувки, що неефективно з погляду енергоощадження. Захист двигуна від надмірного струму з боку електричної мережі забезпечується автоматичним вимикачем QF, а від перегріву при тривалих перевантаженнях – тепловим реле KK. Зупинка двигуна виконується натисканням кнопки «Стоп» SB2.

## 2.4 Вибір способу регулювання продуктивності живильного насоса

Продуктивність насоса живильної води потребує змін у великому діапазоні, відповідно до необхідної продуктивності котла.

Всі регулювальні пристрої, з огляду на їхній вплив на характеристику мережі чи нагнітача, поділяються на три основні групи.

**До першої групи** відносяться пристрої, що дроселюють мережу живлення, тобто ті, що змінюють характеристику мережі, не змінюючи при цьому характеристику нагнітача. До них належать клапани, шибери, засувки, діафрагми та інші. При дроселюванні параметри робочої точки (подача, тиск, потужність та ККД) визначаються на характеристиці нагнітача, за умови незмінної частоти обертання робочого колеса насоса.

**Другу групу** утворюють пристрої, які змінюють частоту обертання робочого колеса насоса (характеристику нагнітача). При цьому, характеристика мережі залишається без змін. Відомо чимало пристроїв, що забезпечують зміну частоти обертання робочого колеса: електродвигуни постійного та змінного струму, фрикційні передачі, гідромумфи, індукторні мумфи ковзання тощо.

**Третя група** містить у собі пристрої, які одночасно змінюють як характеристику нагнітача, так і мережі. Прикладом такого пристрою є вхідний напрямний апарат, який встановлюють у вентиляційному агрегаті. Опір самого напрямного апарата потрібно враховувати під час зняття характеристики вентиляційного агрегата.

Зміна подачі або тиску нагнітача під час регулювання, співвіднесена до подачі або тиску у вихідному режимі, визначає глибину регулювання.

Залежності між продуктивністю  $Q$ , напором  $H$ , потужністю  $N$  та числом обертів  $n$  насосної установки виглядають таким чином:

$$\frac{Q}{Q_1} = \frac{n}{n_1}; \quad \frac{H}{H_1} = \frac{n^2}{n_1^2}; \quad \frac{N}{N_1} = \frac{n^3}{n_1^3}.$$

Регулювання продуктивності насосного обладнання можливе шляхом зміни характеристик мережі (дросельне регулювання) або шляхом зміни параметрів самого насоса (наприклад, шляхом коригування частоти обертання).

Стабільний режим роботи комплексу «насос-мережа» визначається точкою перетину їхніх кривих залежності, тобто  $H$  і  $H_c$  (точка  $A$  на рисунку 2.5).

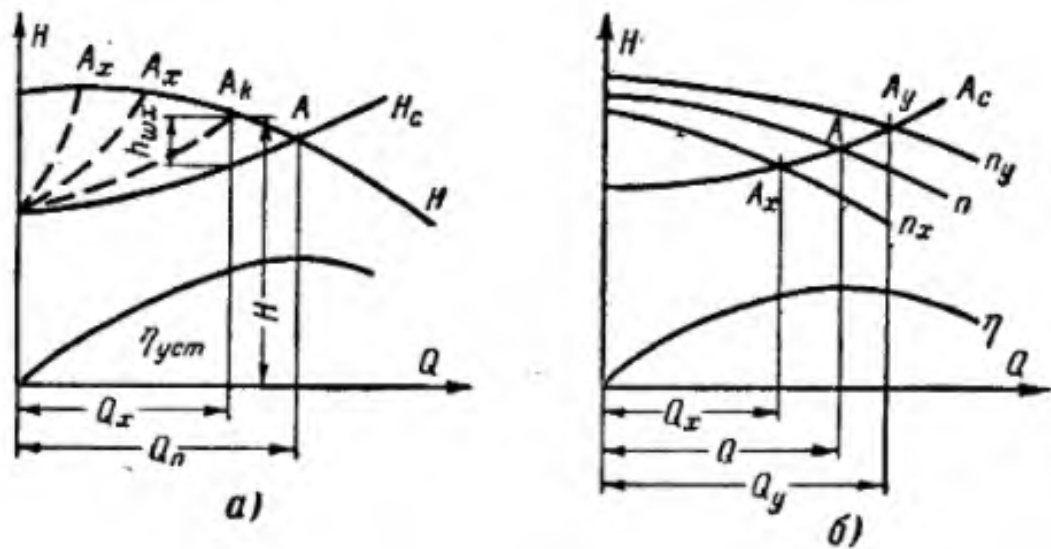


Рисунок 2.5 – Регулювання продуктивності живильного насоса

а) дросельне; б) зміною числа обертів

У разі дросельного регулювання кожному положенню засувки відповідає нова характеристика мережі (рисунки 2.5,а).

Рівняння енергетичної рівноваги системи

$$H = H_c + h_{wx}, \text{ м вод. ст.},$$

де  $H_c$  – постійний опір мережі, м вод.ст.;

$h_{wx}$  – змінний опір засувки, м вод.ст.;

$H$  – напір, що створює насос, м вод.ст.

Регулюючи гідравлічний опір засувки, можливо досягти будь-якого значення продуктивності, в діапазоні від нульового до максимального. Коефіцієнт корисної дії насосної установки при дросельному регулюванні:

$$\eta_{уст} = \eta \frac{H_0}{H}.$$

Дросельне регулювання не потребує додавання до системи насосної установки жодних нових компонентів, що становить ключову перевагу цього способу регулювання, але він малоефективний з точки зору енергоспоживання.

Регулювання шляхом зміни частоти обертання насоса (рисунк 2.5,б) реалізується за допомогою двигуна зі змінною швидкістю (електродвигуни постійного струму, змінного струму з частотним керуванням) або ж з'єднанням насоса з двигуном за допомогою гідравлічної муфти. У цьому випадку змінюється характеристика насоса. Робоча точка визначається точкою перетину характеристик насоса та мережі. Споживана потужність насоса при зміні частоти обертання

$$N_x = N \left( \frac{n_x}{n} \right)^2.$$

Регулювання шляхом зміни кількості обертів не спричиняє втрат у системі насос-мережа, адже за всіх режимів напір насоса і мережі збігаються. ККД насосної установки  $\eta_{уст}$  дорівнює ККД насоса. Під час визначення ККД насосної установки слід враховувати зміну ККД двигуна зі зміною обертів.

## 2.5 Вибір перетворювача частоти

Під час вибору перетворювача частоти за потужністю потрібно враховувати наступне:

- паспортна потужність частотного перетворювача в кВт повинна бути більшою або дорівнювати паспортній потужності двигуна. Водночас потрібно враховувати, що згідно з міжнародними стандартами для електродвигунів поняття потужність стосується механічної потужності двигуна на валу, а не споживаної від джерела живлення активної потужності, як це прийнято для інших споживачів електричної енергії.

- номінальний робочий струм частотного перетворювача завжди має бути більшим за номінальний струм, споживаний електродвигуном, інакше електропривод блокуватиметься помилково за «перевищенням струму».

– необхідно також враховувати, що пусковий струм двигуна обмежується перетворювачем за рівнем (120...170 % від номінального струму частотного перетворювача) та за часом дії (звичайно до 60 с), тому, умови прямого пуску двигуна і пуску двигуна від перетворювача частоти відрізняються. При подачі номінальної напруги від мережі на двигун пускачем, пусковий струм може досягати  $7 \cdot I_n$ , а в умовах «важкого пуску»  $12 \cdot I_n$ .

Обираємо перетворювач частоти виробництва фірми *LG Starvert iG5A*, технічні характеристики якого наведено в таблиці 2.2, зовнішній вигляд і розміри – в таблиці 2.3 та на рисунку 2.6, приєднання до двигуна – на рисунку у.7..

Таблиця 2.2 – Основні параметри перетворювача частоти *LG Starvert iG5A*

| Параметр                           | Значення                                                                                         |
|------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Тип                                | SV055 iG5A-4                                                                                     |
| Номінальна потужність двигуна, кВт | 7,5 кВт                                                                                          |
| Вихідні параметри                  |                                                                                                  |
| Навантажувальна здатність          | 9,1 кВА                                                                                          |
| Струм при повному навантаженні     | 16 А                                                                                             |
| Напруга                            | 3 фази, 380...480 В                                                                              |
| Частота                            | 0...400 Гц                                                                                       |
| Вхідні параметри                   |                                                                                                  |
| Напруга                            | 3 фази, 380...480 В                                                                              |
| Частота                            | 50...60 Гц ( $\pm 5\%$ )                                                                         |
| Керування                          | – V/f керування<br>– векторне керування без датчика                                              |
| Дискретність частоти налаштування  | – цифрова: 0,01 Гц (менше 99 Гц)<br>– 0,1 Гц (100 Гц і більше)<br>– аналогова: 0,06 Гц при 60 Гц |
| Точність налаштування частоти      | – цифрова: 0,01% від макс. частоти на виході<br>– аналогова: 0,1% від макс. частоти на виході    |
| U/f-характеристика                 | – лінійна, квадратична, користувача                                                              |
| Допустиме перевантаження           | – 1 хвилина при 150%<br>– 30 секунд при 200%                                                     |

| Параметр                  | Значення                       |
|---------------------------|--------------------------------|
| Форсування моменту        | – автоматичне, ручне (0...15%) |
| Багатофункціональні входи | 5 перепрограмованих входів     |
| Аналоговий вхід           | 0...10 В лінійний              |

Таблиця 2.3 – Геометричні розміри перетворювача частоти LG SV075iG5A-4

| $P$ , кВт | $W$ , мм | $W1$ , мм | $H$ , мм | $H1$ , мм | $D$ , мм | $\Phi$ | $A$ , мм | $B$ , мм | Вага, кг |
|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|--------|----------|----------|----------|
| 5.5       | 180      | 170       | 220      | 210       | 170      | 4.5    | 5.0      | 4.5      | 3.66     |

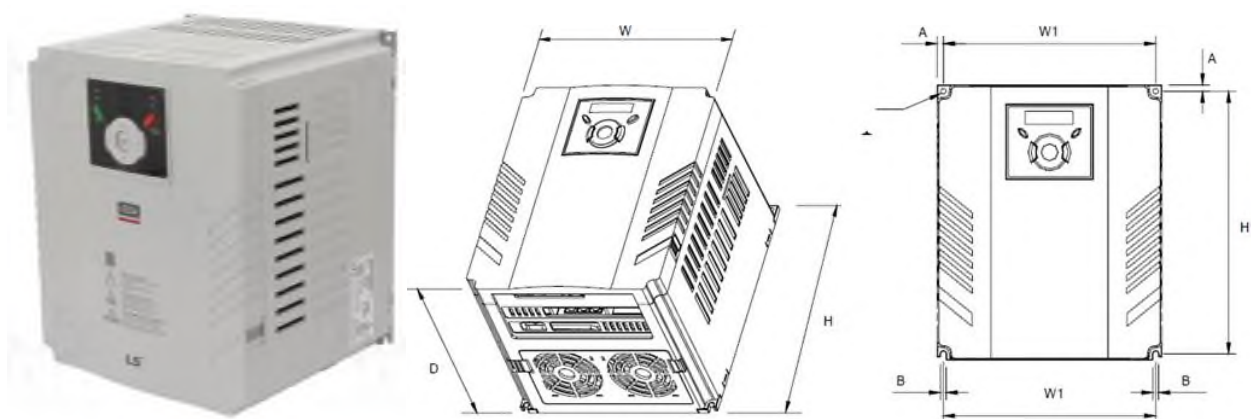


Рисунок 2.6 – Зовнішній вигляд та розміри перетворювача частоти LG SV075iG5A-4

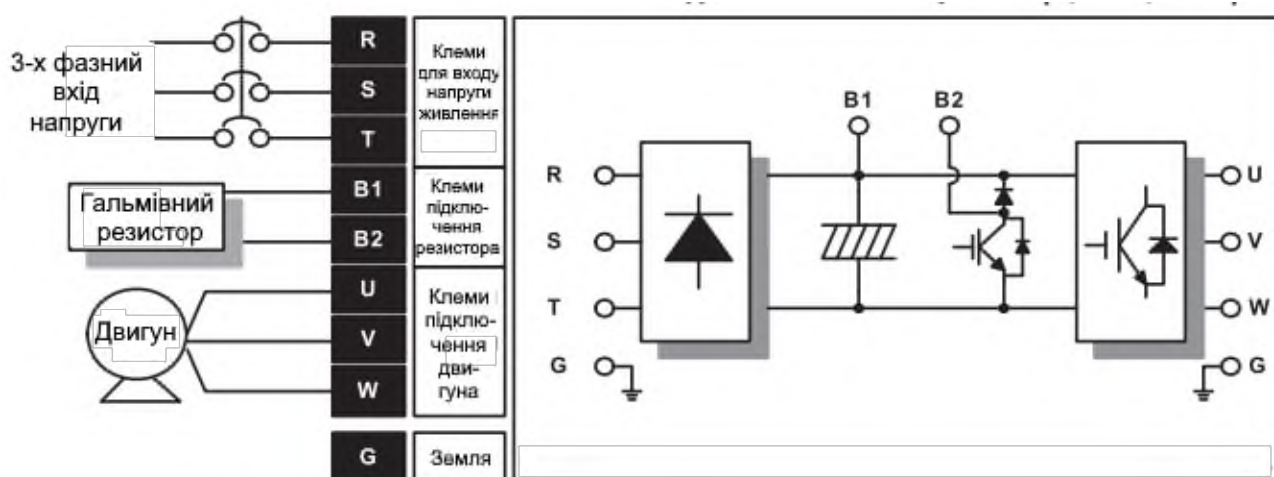


Рисунок 2.7 – Підключення перетворювача частоти LG SV075iG5A-4

## 2.6 Розрахунок параметрів схеми заміщення асинхронного двигуна

Схема заміщення асинхронного двигуна (АД) з ротором, що обертається, відрізняється від схеми заміщення двигуна зі загальмованим ротором присутністю в колі вторинному замість імпедансу навантаження  $Z_n$  активного опору, значення якого залежить від рівня навантаження (рисунок 2.8). Така схема заміщення дістала назву *Т-подібної*.

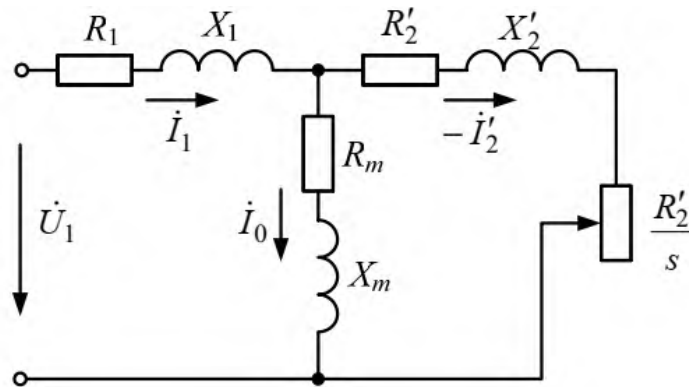


Рисунок 2.8 – Т-подібна схема заміщення АД

Цій схемі заміщення відповідає система рівнянь

$$\begin{cases} U_1 = (R_1 + jX_1) I_1 + Z_m (I_1 + I_2'); \\ 0 = \left( \frac{R_2'}{s} + jX_2' \right) I_2' + Z_m (I_1 + I_2'); \\ I_1 = I_0 + I_2', \end{cases} \quad (3.1)$$

де  $I_1$  – струм, що протікає по обмотці статора;

$U_2$  – напруга обмотки ротора, приведена до обмотки статора;

$E_2$  – ЕРС обмотки ротора, приведена до обмотки статора;

$I_2$  – струм, що протікає по обмотці ротора, приведений до обмотки статора;

$R_1, X_1$  – активний та індуктивний опори обмотки статора;

$R'_2$ ,  $X'_2$  – активний та індуктивний опори обмотки ротора, приведені до обмотки статора.

Після деяких перетворень системи (3.1) можна отримати схему заміщення АД, що показана на рисунку 2.9.

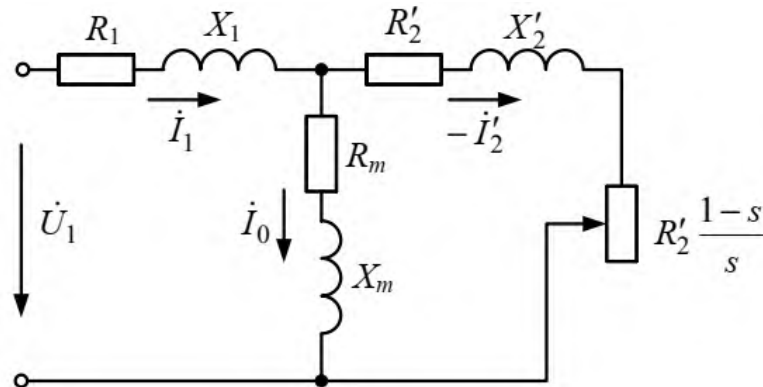
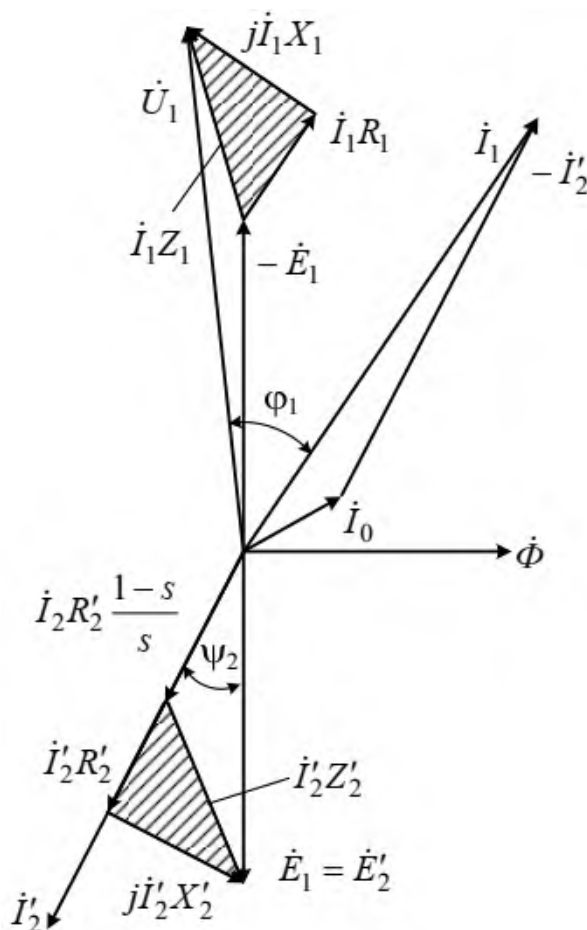


Рисунок 2.9 – Перетворена Т-подібна схема заміщення АД



Векторна діаграма АД, що відповідна наведена на рисунку 2.10.

Визначимо параметри Т-подібної схеми заміщення асинхронного двигуна, спираючись на його каталожні дані.

Синхронна кутова швидкість обертання двигуна:

$$\omega_0 = \frac{\pi \cdot n_0}{30} = \frac{3,14 \cdot 3000}{30} = 314,16 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$$

Номінальна кутова швидкість обертання двигуна:

Рисунок 2.10 – Векторна діаграма АД

$$\omega_{\text{H}} = \frac{\pi \cdot n_{\text{H}}}{30} = \frac{3,14 \cdot 2895}{30} = 303,16 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

Номінальне ковзання

$$s_{\text{H}} = 1 - \frac{f_{\text{H}}}{f_0} = 1 - \frac{2900}{3000} = 0,035$$

Номінальний момент двигуна:

$$M_{\text{дв.н}} = \frac{P_{\text{дв.н}}}{\omega_{\text{H}}} = \frac{7500}{303,16} = 24,74 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Номінальна фазна напруга і номінальний фазний та лінійний струми статора

$$U_{1\text{фн}} = \frac{U_{1\text{лн}}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220 \text{ В}$$

$$I_{1\text{фн}} = I_{1\text{лн}} = \frac{P_{\text{дв.н}}}{3 \cdot U_{1\text{фн}} \cdot \cos\varphi \cdot \eta} = \frac{7500}{3 \cdot 220 \cdot 0,84 \cdot 0,87} = 15,69 \text{ А}.$$

Струм фази статора при частковому завантаженні

$$I_{1p'} = \frac{p' \cdot P_{\text{дв.н}}}{3 \cdot U_{1\text{фн}} \cdot \cos\varphi_{p'} \cdot \eta_{p'}} = \frac{0,75 \cdot 7500}{3 \cdot 220 \cdot 0,84 \cdot 0,83} = 12,56 \text{ А}$$

де  $\eta_{p'} = 0,83$  – ККД при частковому завантаженні;

$\cos\varphi_{p'} = 0,84$  – коефіцієнт потужності при частковому завантаженні;

$p' = P/P_{\text{H}} = 0,75$  – коефіцієнт завантаження двигуна;

Коефіцієнт потужності при частковому завантаженні  $p' = 0,75$  значно відрізняється від коефіцієнта потужності при номінальному навантаженні, причому ця відмінність у значній мірі залежить від потужності двигуна і для відомих серій асинхронних двигунів з достатньою для практики точністю підпорядковується залежності, що наведена на рисунку 2.11

Критичне ковзання

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

$$= 0,0355 \cdot \frac{2,3 + \sqrt{2,3^2 - (1 - 2 \cdot 0,035 \cdot 1,5 \cdot (2,3 - 1))}}{1 - 2 \cdot 0,035 \cdot 1,5 \cdot (2,3 - 1)} = 0,179$$

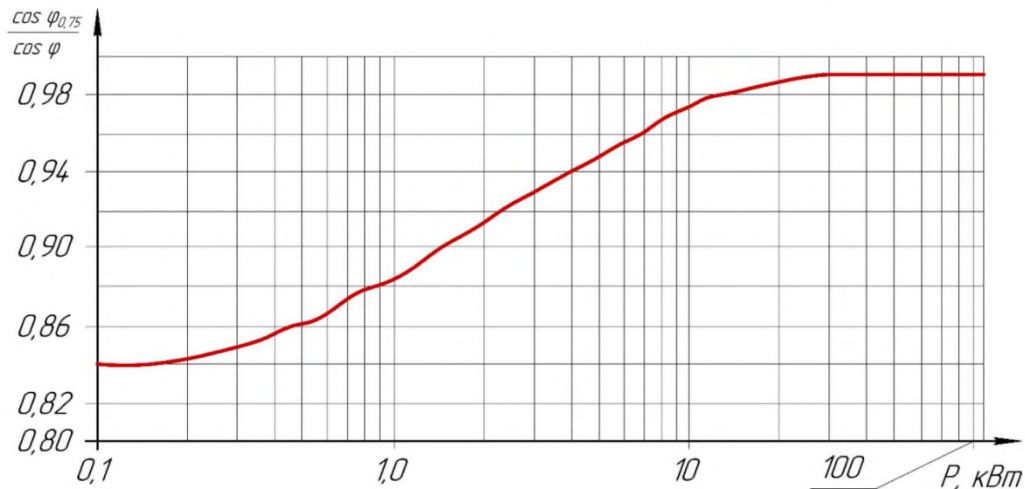


Рисунок 2.11 – Залежність  $\cos \varphi_{0,75} / \cos \varphi_H$  від потужності асинхронного двигуна

Струм холостого ходу асинхронного двигуна:

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

$$= \sqrt{\frac{12,258^2 - (15,59 \cdot 0,75 \cdot (1 - 0,035) / (1 - 0,75 \cdot 0,035))^2}{1 - (0,75 \cdot (1 - 0,035) / (1 - 0,75 \cdot 0,035))^2}} = 5,97 \text{ A}.$$

Активний опір обмотки ротора, приведений до обмотки статора.  
Визначаємо значення ряду проміжних коефіцієнтів:

$$C_1 = 1 + \frac{I_0}{2 \cdot k_i \cdot I_{1\phi H}} = 1 + \frac{5,96}{2 \cdot 7,5 \cdot 15,59} = 1,0255,$$

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

$$= \frac{3 \cdot 220^2 \cdot (1 - 0,035)}{2 \cdot 2,3 \cdot 5500 \cdot 1,0255^2 \cdot (1,5 + 1/0,1785)} = 0,5408 \text{ Ом}$$

Активний опір статора в номінальному режимі

$$R_1 = R'_2 \cdot \beta \cdot C_1 = 0,5408 \cdot 1,5 \cdot 1,0255 = 0,8318 \text{ Ом}$$

Параметр  $\gamma$ , який дозволяє знайти індуктивний опір короткого замикання в номінальному режимі:

$$\gamma = \sqrt{\frac{1}{s_K^2} - \beta^2} = \sqrt{1/0,1785 - 1,5^2} = 5,398$$

Опір короткого замикання:

$$X_{KH} = R'_2 \cdot \gamma \cdot C_1 = 0,5408 \cdot 5,398 \cdot 1,0255 = 2,993 \text{ Ом}$$

Індуктивний опір розсіювання статорної обмотки:

$$X_{1\sigma} = 0,42 \cdot X_{KH} = 0,42 \cdot 2,993 = 1,2572 \text{ Ом}$$

Індуктивність розсіювання обмотки статора:

$$L_{1\sigma} = \frac{X_{1\sigma}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1H}} = \frac{1,2572}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,0040 \text{ Гн}$$

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

$$X'_{2\sigma} = 0,58 \cdot \frac{X_{KH}}{C_1} = 0,58 \cdot \frac{2,993}{1,0255} = 1,692 \text{ Ом}$$

Індуктивність розсіювання роторної обмотки, приведена до статорної:

$$L'_{2\sigma} = \frac{X'_{2\sigma}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1H}} = \frac{1,693}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,0054 \text{ Гн}$$

ЕРС гілки намагнічування, наведена потоком повітряного зазору в обмотці статора при номінальному режимі:

$$E_1 = \sqrt{(U_{1\phi H} \cdot \cos\varphi - R_1 \cdot I_{1\phi H})^2 + (U_{1\phi H} \cdot \sin\varphi - X_{1\sigma} \cdot I_{1\phi H})^2} = \\ = \sqrt{(220 \cdot 0,84 - 15,592 \cdot 0,832)^2 + (220 \cdot 0,543 - 15,592 \cdot 1,257)^2} = 198,09 \text{ В}$$

Індуктивний опір намагнічування:

$$X_\mu = \frac{E_1}{I_0} = \frac{198,09}{5,969} = 33,186 \text{ Ом}$$

Результуюча індуктивність гілки намагнічування:

$$L_\mu = \frac{X_\mu}{2 \cdot \pi \cdot f_{1H}} = \frac{33,186}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,1056 \text{ Гн}$$

Значення номінального потокозчеплення:

$$\Psi_{2H} = \sqrt{2} \cdot I_0 \cdot I_M = \sqrt{2} \cdot 5,969 \cdot 0,1056 = 0,8917$$

Еквівалентна індуктивність обмотки статора:

$$L_1 = L_{1\sigma} + L_\mu = 0,004 + 0,1056 = 0,1096 \text{ Гн}$$

Еквівалентна індуктивність обмотки ротора:

$$L'_2 = L'_{2\sigma} + L_\mu = 0,0053 + 0,1056 = 0,1110 \text{ Гн}$$

Коефіцієнт розсіювання:

$$\sigma = 1 - \frac{L_\mu^2}{L_1 + L'_2} = 1 - \frac{0,1056^2}{0,1096 + 0,1110} = 0,9494.$$

Параметри схеми заміщення двигуна зведені в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Параметри схеми заміщення електродвигуна АІР1112М2

| $R_1$ , Ом | $X_{1\sigma}$ , Ом | $L_{1\sigma}$ , Гн | $X_\mu$ , Ом | $L_\mu$ , Гн | $R'_2$ , Ом | $X'_{2\sigma}$ , Ом | $L'_{2\sigma}$ , Гн | $X_{кн}$ , Ом |
|------------|--------------------|--------------------|--------------|--------------|-------------|---------------------|---------------------|---------------|
| 0,8318     | 1,2572             | 0,0040             | 33,186       | 0,1056       | 0,5408      | 1,6929              | 0,0054              | 2,9932        |

## 2.7 Побудова механічної характеристики електропривода

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

- номінальний ККД  $\eta_n = 85,7 \%$ ;
- номінальна швидкість обертання  $n_n = 2900$  об/хв,  $\omega_n = 303,53$  рад/с;

Вираз для механічної характеристики насоса при роботі з постійним значенням ККД  $\eta_i$  має такий вигляд:

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

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

Коефіцієнт змінних втрат насоса для навантаження 90 %:

$$a = \frac{0,9 \cdot M_n}{n_{\text{ном}}^2} = \frac{0,9 \cdot 24,739}{2895^2} = 0,00000266.$$

Коефіцієнт постійних втрат насоса:

$$c = 0,3 \cdot 24,739 = 7,422 .$$

Після підставлення чисельних значень коефіцієнтів рівняння механічної характеристики насоса в режимі роботи з номінальним ККД має вигляд:

$$M(n) = 0,00000266 \cdot n^2 + 7,422 \text{ Н} \cdot \text{м} . \quad (3.1)$$

Механічна характеристика насоса, розрахована за виразом (3.1), наведена на рисунку 2.18 лінією червоного кольору.

## 2.8 Побудова природної механічної характеристики двигуна

Задаючись діапазоном ковзання  $s$  від 1 до 0,00001 з кроком 0,01, побудуємо природну механічну характеристику асинхронного двигуна (при частоті 50 Гц) за виразом:

$$M_{em}(s) = \frac{3 \cdot U_{1\phi H}^2 \cdot R'_2}{\omega_0 \cdot s \cdot \left[ X_{KH}^2 + \left( R_1 + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + \left( \frac{R_1 \cdot R'_2}{s \cdot X_\mu} \right)^2 \right]}$$

Природна механічна характеристика  $M_{em}(n)$  електродвигуна АІР112М2 наведена на рисунку 2.2 для  $n(s) = n_0 \cdot (1 - s)$ .

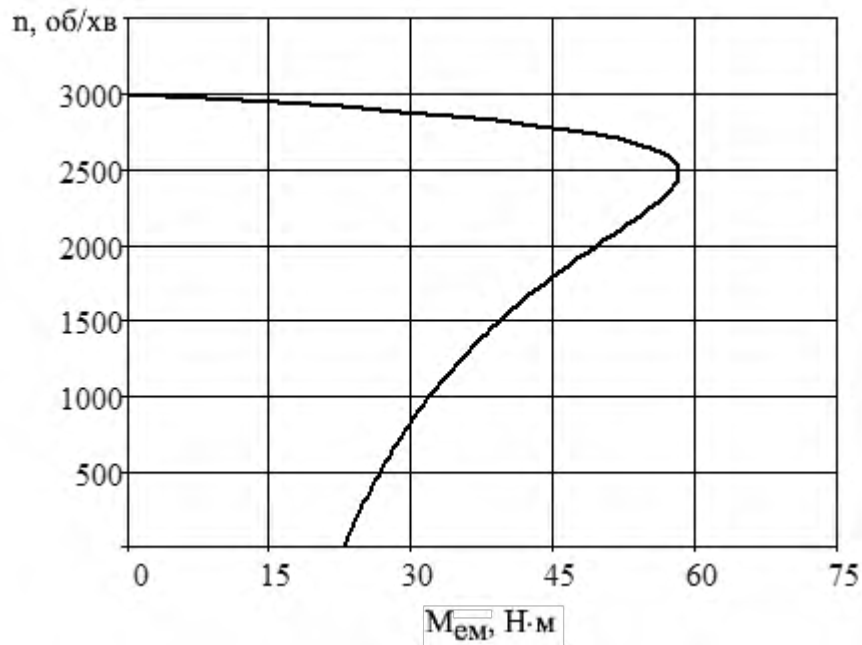


Рисунок 2.12 – Природна механічна характеристика  $M_{em}(n)$  електродвигуна АІР112М2

По збудованій механічній характеристиці проведемо аналіз основних даних, а також порівняємо їх з паспортними.

Номінальна швидкість двигуна:

$$\omega_H = \frac{\pi \cdot n_H}{30} = \frac{3,14 \cdot 2900}{30} = 303,69 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

Номінальний момент за паспортними даними:

$$M_{H(\text{паспорт})} = \frac{P_H}{\omega_H} = \frac{5500}{303,69} = 18,11 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Критичний момент за паспортними даними:

$$M_{\text{к(паспорт)}} = m_k \cdot M_{\text{н(паспорт)}} = 2,3 \cdot 18,11 = 41,65 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Пусковий момент за паспортними даними:

$$M_{\text{п(паспорт)}} = m_{\text{п}} \cdot M_{\text{н(паспорт)}} = 2,82 \cdot 18,11 = 39,84 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Критичний момент за формулою Клосса:

$$M_{\text{к}} = \frac{3 \cdot U_{1\text{фн}}^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot C_1 \cdot (R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_{\text{кн}}^2})} =$$

$$= \frac{3 \cdot 220^2}{2 \cdot 314,16 \cdot 1,0137 \cdot (1,099 + \sqrt{1,099^2 + 4,202^2})} = 41,65 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Номинальний момент за формулою Клосса:

$$M_{\text{н}} = \frac{2 \cdot M_{\text{к}} \cdot (1 + a \cdot s_{\text{к}})}{\frac{s_{\text{к}}}{s_{\text{н}}} + \frac{s_{\text{н}}}{s_{\text{к}}} + 2 \cdot a \cdot s_{\text{к}}} =$$

$$= \frac{2 \cdot 41,65 \cdot (1 + 1,520 \cdot 0,169)}{\frac{0,169}{0,033} + \frac{0,033}{0,169} + 2 \cdot 1,520 \cdot 0,169} = 18,14 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

де  $a = \frac{R_1}{R_2'} = \frac{1,099}{0,723} = 1,520$

Пусковий момент за формулою Клосса при  $s_{\text{п}} = 1$ :

$$M_{\text{п}} = \frac{2 \cdot M_{\text{к}} \cdot (1 + a \cdot s_{\text{к}})}{\frac{s_{\text{к}}}{s_{\text{п}}} + \frac{s_{\text{п}}}{s_{\text{к}}} + 2 \cdot a \cdot s_{\text{к}}} =$$

$$= \frac{2 \cdot 41,65 \cdot (1 + 1,520 \cdot 0,169)}{\frac{0,169}{1} + \frac{1}{0,169} + 2 \cdot 1,520 \cdot 0,169} = 15,84 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

З отриманих даних випливає, що побудована механічна характеристика справедлива тільки на робочій ділянці, тому що значення критичного і номінального моментів практично збігаються з розрахованими за паспортними даними, що говорить про правильність визначених параметрів схеми заміщення асинхронного двигуна. Однак, значення пускового моменту, розраховане за

паспортними даними, набагато більше величини розрахункового пускового моменту. Це пояснюється тим, що при розрахунках не було враховано ефект витіснення струму в обмотці ротора.

## 2.9 Побудова сімейства механічних характеристик

Побудова сімейства механічних характеристик виконується в робочому діапазоні обертів насоса 1000...3000 об/хв за рівнянням

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

Для побудови графіків механічних характеристик в пакеті Mathcad залежність швидкості двигуна від частоти та ковзання прийнята у вигляді

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

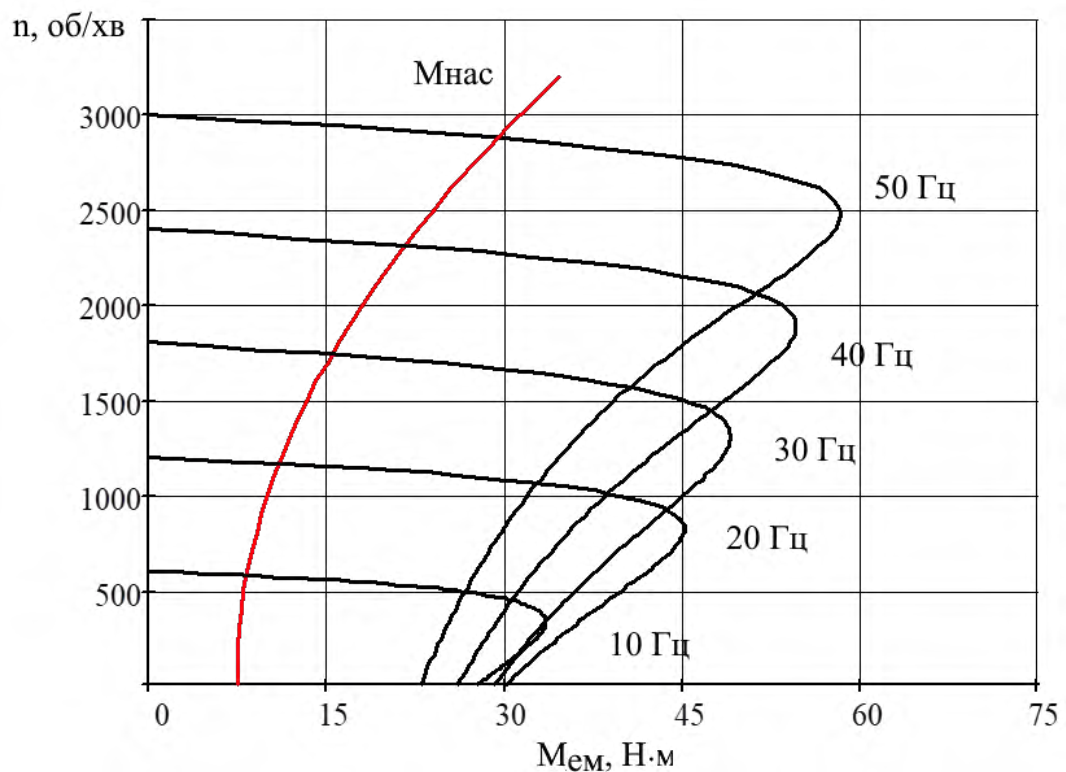


Рисунок 2.13 – Штучні механічні характеристики електродвигуна AIP112M2

Сімейство штучних механічних характеристик електродвигуна АІР100S2 наведено на рисунку 2.13.

З графіків рисунку 2.13 видно, що у всьому діапазоні обертів двигуна елетромеханічний момент двигуна більший за момент опору насосу. Таким чином, потужність двигуна обрана правильно.

## 3 МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА

### 3.1 Дослідження динамічних характеристик асинхронного електропривода при прямому пуску

Схема моделі прямого пуску електропривода насоса, реалізована в середовищі *Matlab-Simulink* з використанням бібліотеки *SimPowerSystem*, представлена на рисунку 3.1. Навантажувальний момент двигуна, що відповідає насосу, визначено відповідно до виразу (3.1).

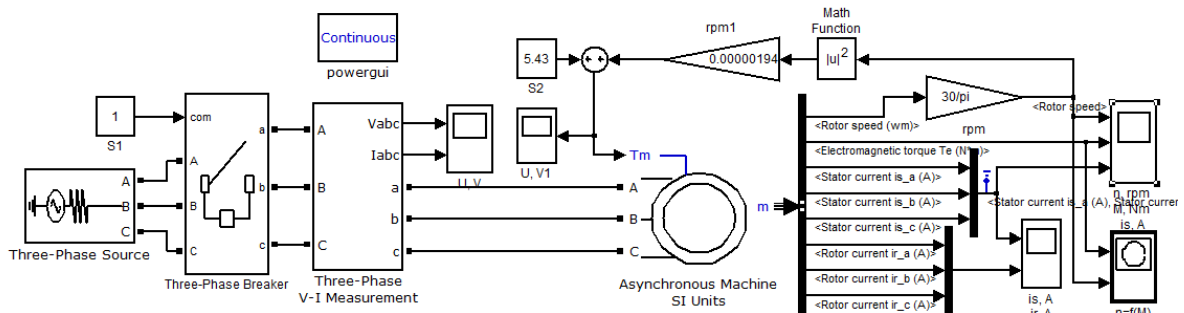


Рисунок 3.1 – Схема моделі прямого пуску електропривода насоса

Параметри схеми заміщення асинхронного двигуна АИР112М2, що були взяті з таблиці 2.8, де подано розрахункові параметри заміщення двигуна, можна побачити на рисунку 3.2. Розрахункове значення моменту інерції насосної станції обчислюється як сума моментів інерції двигуна та насоса:  $J = J_{\text{дв}} + J_{\text{н}} = 0,008 + 0,017 = 0,025 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ . На рисунку 3.3 зображено параметри трифазного джерела живлення *Three-Phase Source* та блоку двокоординатного будувача *XY-score*.

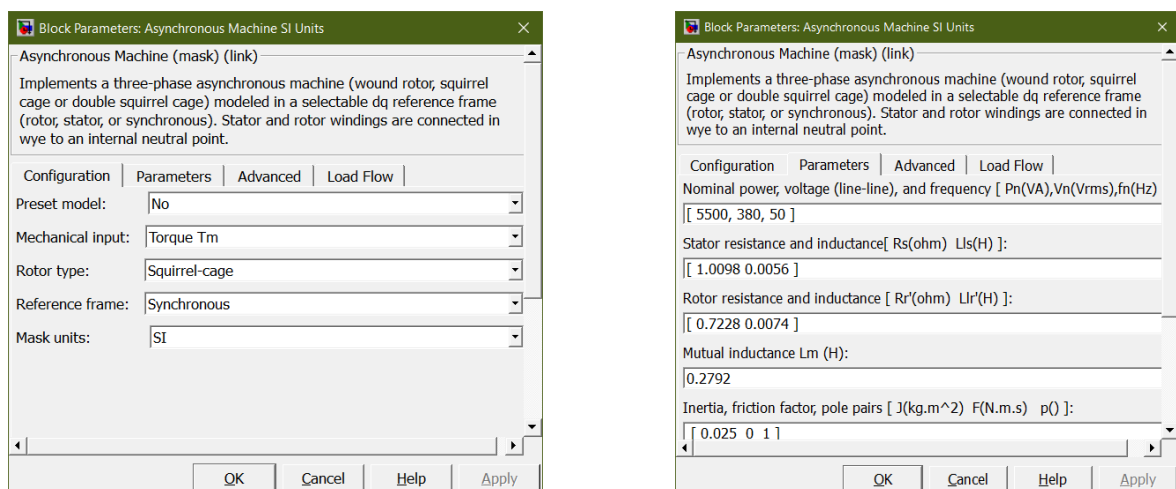


Рисунок 3.2 – Вікна параметрів асинхронного двигуна

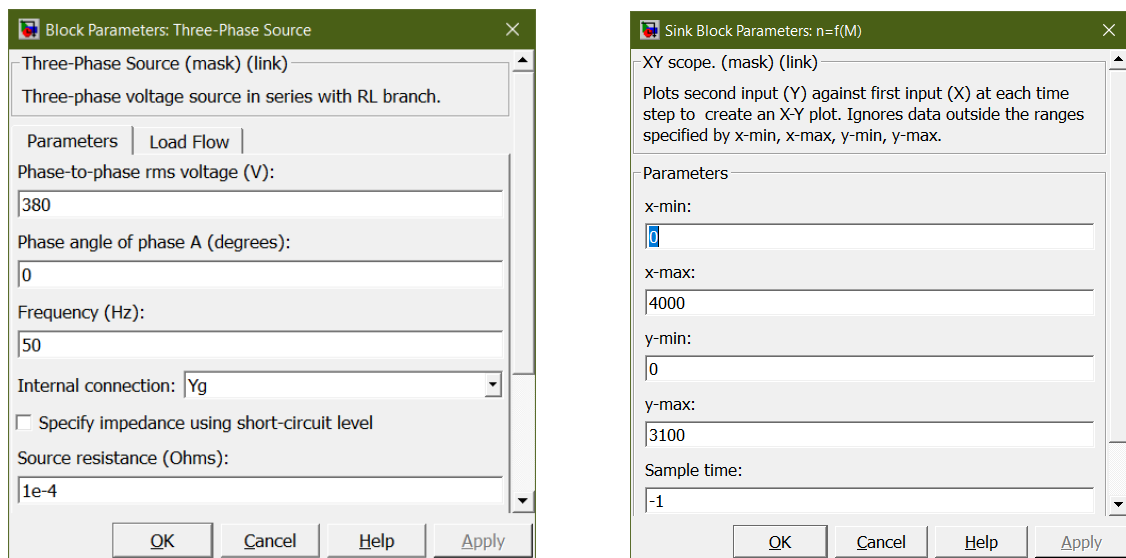


Рисунок 3.3 – Вікна параметрів трифазного блоку живлення *Three-Phase Source* і блоку двокоординатного будувача *XY-scope*

Результати моделювання електропривода насоса на базі трифазного асинхронного привода наведені на рисунку 3.4.

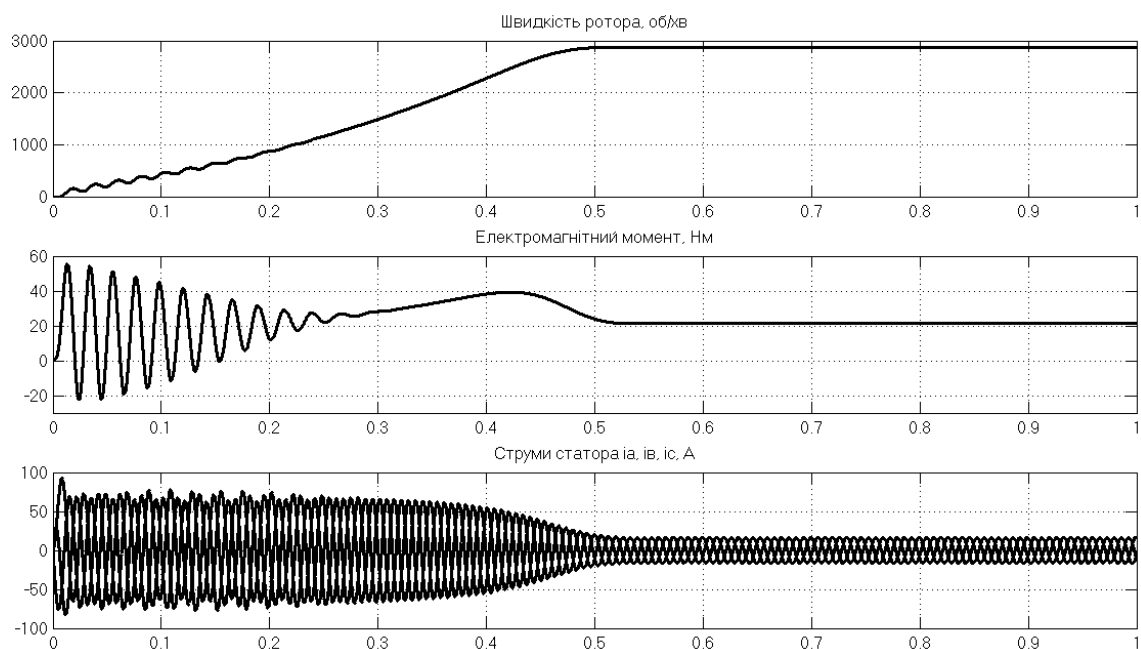


Рисунок 3.4 – Перехідні процеси зміни швидкості, електромагнітного моменту та струму статора при прямому пуску електропривода

Згідно з графіками на рисунках 3.4, 3.5, час для налаштування обертів і моменту під час прямого запуску електроприводу становить приблизно 0,5 с. Пусковий електромагнітний момент досягає приблизно 55 Н·м, що майже втричі

перевищує номінальний. Пусковий струм статора сягає 90 А, що майже у 7 разів більше за номінальний.

### 3.2 Моделювання асинхронного електроприводу за скалярним законом з блоком 6-пульсного частотного перетворювача *Six Step VSI Induction Motor Drive*

В основі електронної моделі електроприводу живильного насосу котла лежить блок частотного електроприводу з асинхронним двигуном *Six Step VSI Induction Motor Drive*, що міститься в бібліотеці *Sim Power Systems*.

*Six-Step VSI Induction Motor Drive* (асинхронний двигун з 6-пульсним керуванням) – функціональна схема системи високого рівня, представлена на рисунку 3.5. Вона складається з семи основних блоків, які доступні в бібліотеці *SimPowerSystems*:

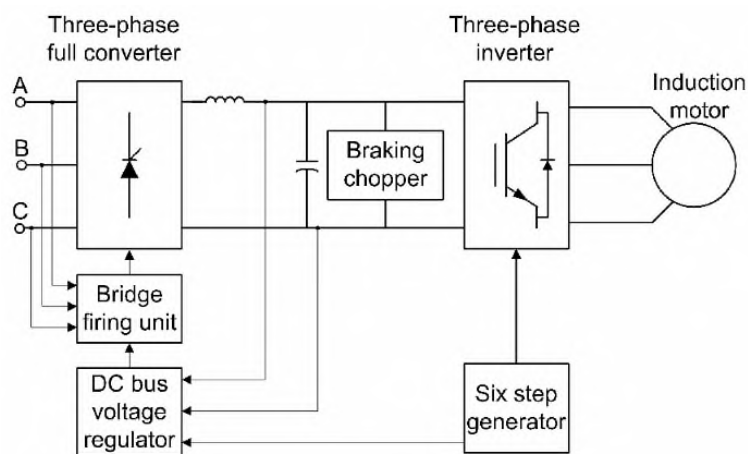


Рисунок 3.5 – Структурна схема блоку привода *Six-Step VSI Induction Motor Drive*

- 1) *Induction Motor* – асинхронний двигун;
- 2) *Tree-phase inverter* – трифазний інвертор;
- 3) *Tree-phase full converter* – трифазний тиристорний випрямляч;
- 4) *Bridge firing unit* – блок запуску моста.

Три інші блоки належать до бібліотеки *Electric Drives*.

- 5) *DC bus voltage regulator* – регулятор напруги на шині постійного струму;
- 6) *Six step generator* – 6-пульсний генератор;

7) *Braking chopper* – фільтр напруги на шині постійного струму.

Примітка. У програмному забезпеченні *SimPowerSystems* блок *Six-Step VSI Induction Motor Drive* звичайно називається приводом двигуна AC1.

Схема моделі привода в *Simulink* подана на рисунку 3.6.

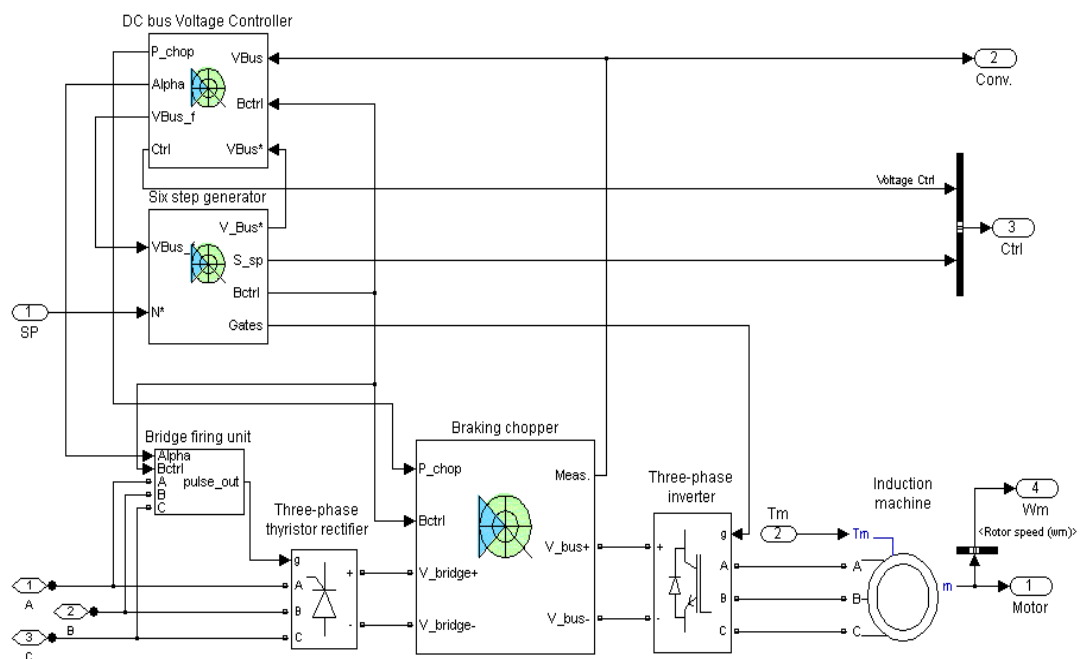


Рисунок 3.6 – Схема 6-пульсного управління асинхронного двигуна

Блок ініціювання моста *Bridge firing unit* виконує трансформацію кута відмикання тиристорів, що надходить від регулятора напруги на шині постійного струму, в імпульси, спрямовані на затвори тиристорів. У структурі блоку ініціювання моста інтегровані режекторні фільтри, призначені для опрацювання даних вимірювання напруги з метою ліквідації гармонік. Для формування імпульсів використовується дискретний синхронізований генератор шести імпульсів. Детальнішу інформацію про цей блок можна знайти в документації до блоку *Synchronized 6-Pulse Generator*.

Регулятор напруги на шині постійного струму *DC bus voltage regulator* (зображений на рисунку 3.7) базується на ПІ-регуляторі з інтегрованою логікою гістерезисного роз'єднувача. У разі зниження напруги на шині, ПІ-регулятор відповідним чином зменшує кут відмикання. Коли напруга на шині підвищується, ПІ-регулятор збільшує кут відмикання.

Логіка роз'єднувача реалізується на основі гістерезисного управління. У випадку досягнення напругою верхньої границі гістерезису, регулятор напруги постійного струму переходить у режим гальмування з активізацією роз'єднувача, що спричиняє вимкнення тиристорного моста.

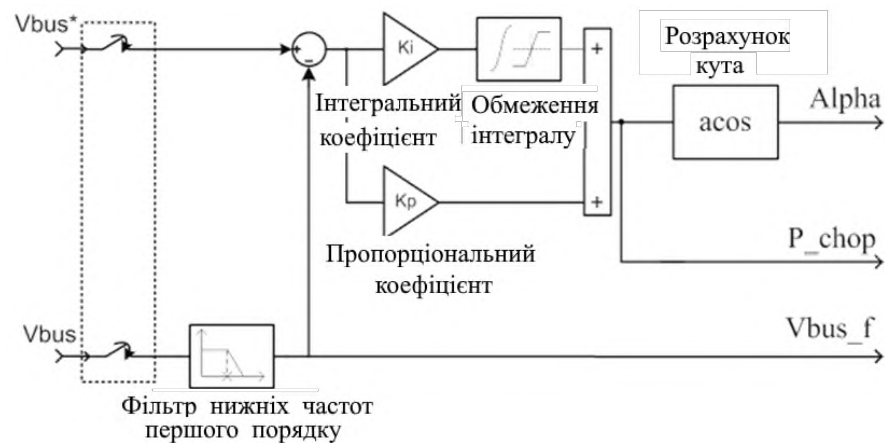


Рисунок 3.7 – Схема ПІ-регулятора напруги на шині постійного струму  
*DC bus voltage regulator*

В режимі переривника пропорційний вплив залишається чинним, але інтегральне підсилення стає нулем, адже динаміка переривника надзвичайно висока і інтегральний вплив є надмірним. Коли напруга на шині досягає нижньої межі гістерезису, гальмівний переривник вимикається, після чого тиристорний міст знову починає функціонувати.

**6-імпульсний генератор**, зображений на наступному рисунку 3.8, містить шість компараторів для формування сигналів перемикання з шістьма кроками. Певна додаткова логіка дозволяє змінювати швидкість інвертування двох фаз.

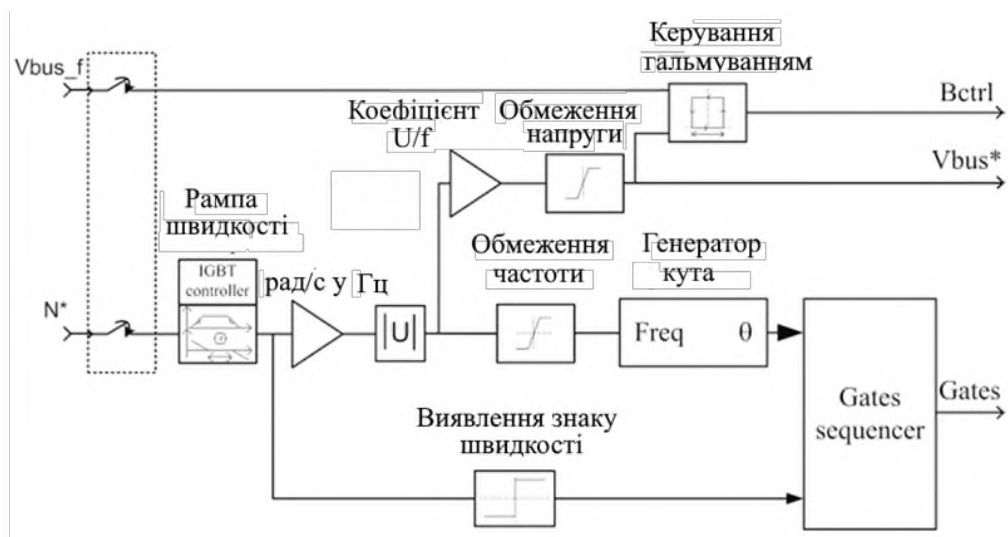


Рисунок 3.8 – Схема 6-імпульсного генератора *Six step generator*

**Зауваження.** У приводі двигуна AC1 швидкість двигуна не регулюється по замкненому контуру. Замість цього, уставка швидкості використовується тільки для визначення напруги та частоти живлення двигуна, що застосовуються шестиступінчастим інвертором, щоб підтримувати постійним відношення  $U/F$  (або магнітний потік двигуна) у діапазоні від нуля до номінальної швидкості.

При швидкості вище номінальної, двигун працює з ослабленням магнітного потоку; тобто, напруга залишається постійною, дорівнюючи номінальному значенню, тоді як частота збільшується пропорційно заданій швидкості.

При зміні швидкості необхідна коротка затримка в момент перетину нульової швидкості, щоб магнітний потік у повітряному зазорі зменшився до нуля.

У розробленій електронній моделі (рисунок 3.9), окрім згаданого блоку електроприводу, є джерело живлення, блок задання швидкості та блок, що моделює навантаження на електродвигун. На рисунку 3.10 подано схему підсистеми *demux*.

Параметри асинхронної машини було задано відповідно до розрахунків, наведених у розділі 2, таблиця 2.8 (рисунок 3.11). Результати моделювання з вихідними параметрами показані на рисунках 3.12 та 3.13. Задання швидкості двигуна, що стрибкоподібно змінюється в момент часу 0,2 секунди від 0 до 3000 об/хв, перетворюється системою управління електроприводом у сигнал, що плавно змінюється від 0 до 3000 об/хв у проміжку часу від 0,2 до 1,7 секунди. Фактична швидкість двигуна повторює задану, з незначними коливаннями на початку регулювання, які є пусковими процесами.

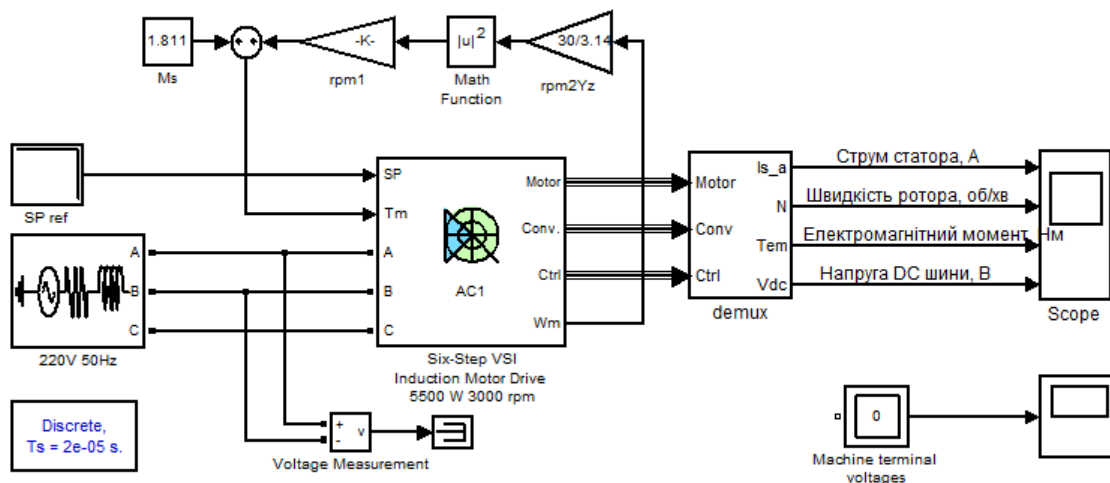


Рисунок 3.9 – Електронна модель електроприводу насосу

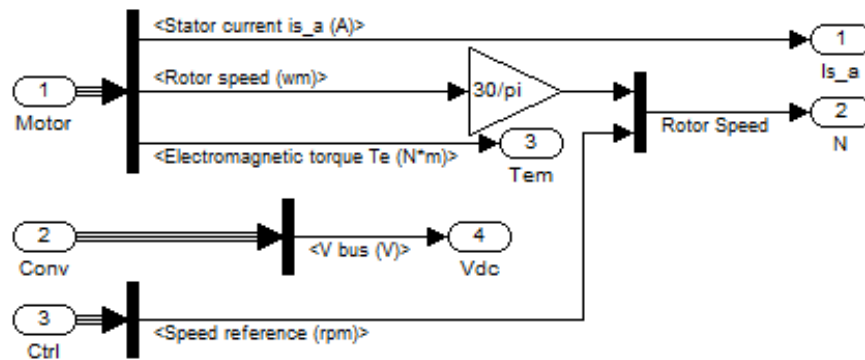


Рисунок 3.10 – Підсистема *demux*

Рисунок 3.11 – Вікна налаштування блоку асинхронної машини

*Six Step VSI Induction Motor Drive*

Для зменшення погрішності регулювання параметрів ПІ-регулятора, який є частиною системи електроприводу (рисунок 3.7), їх було замінено на ті, що були автоматично підібрані спеціальним блоком ППП Matlab:  $K_p = 0,0055$ ,  $K_i = 0,0475$ .

Результати моделювання перехідних процесів в електроприводі за умови динамічних моментів інерції насоса, які перевищують момент інерції ротора двигуна у 4 та 9 разів, показано на рисунках 3.12-3.13.

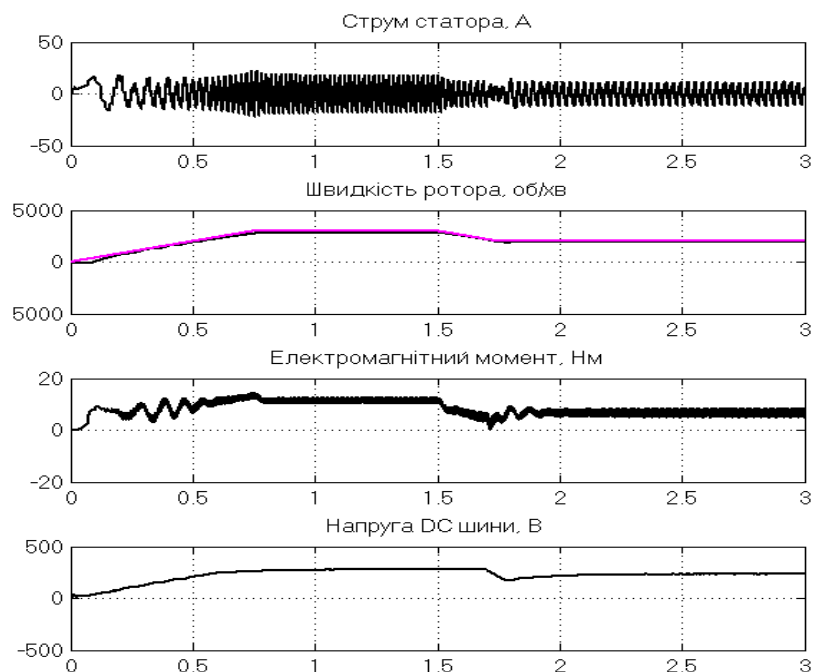


Рисунок 3.12 – Результати моделювання електроприводу насосу при  $J = 0,025 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$

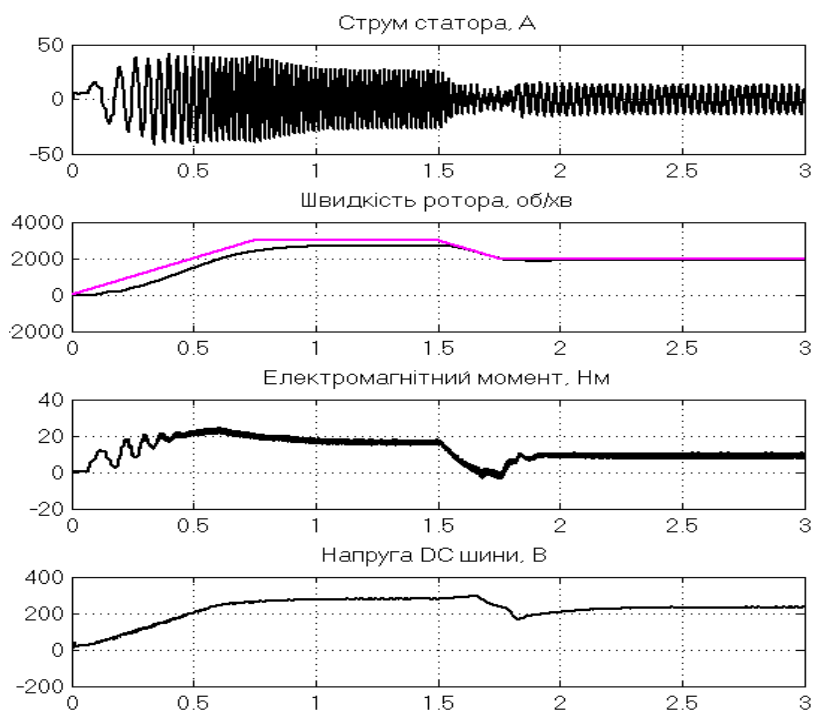


Рисунок 3.13 – Результати моделювання електроприводу насосу при  $J = 0,06 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$

## 4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

У даній роботі розглянуто автоматизований електропривод насоса живильної води парового котла. Для втілення даного рішення власник залучає власні кошти, має витрати по розробці, впровадженню та експлуатацію нової розробки.

Головний шлях до якісного зрушення у виробничих процесах – перехід до якісного інтенсивного розвитку, для втілення якого необхідна велика сила по створенню машин, механізмів і технологій по впровадженню в практику досягнень науки та техніки. При цьому особливого значення набувають вибір найбільш надійних шляхів збільшення ефективності виробництва, якості продукції, принципи наукового обґрунтованого ціноутворення.

Модернізація електроприводу насоса живильної води парового котла виконується внаслідок заміни базової системи керування на систему на основі перетворювача частоти. В порівнянні з базовою системою керування нова система має такі переваги:

- а) покращення показників економії електроенергії;
- б) зменшення похибки керування;
- в) підвищення ефективності та надійності системи;

Визначимо ефективність застосування нової системи керування електроприводу шляхом співставлення показників базового і нового варіантів.

При співставленні варіантів технічних рішень по впровадженню нових видів обладнання і технологічних процесів використовують метод порівняльної економічної ефективності. При цьому методі основними показниками є мінімум наведених витрат  $Z$ , який є сумою річних експлуатаційних затрат  $C$  і капітальних вкладень  $K$ , приведених до однієї розмірності у відповідності з нормативним коефіцієнтом ефективності  $E_n$ .

Капітальні вкладення включають в себе всі одноразові витрати: відпускну ціну нової техніки, затрати на її транспортування, монтаж і наладку, витрати на демонтаж старого обладнання та інше.

$$Z = C + E_n \cdot K \quad (4.1)$$

де  $E_n = 0,08 \dots 0,15$  (для нової техніки  $E_n = 0,15$ ).

Повні економічні витрати:

$$Z_e = Z_{en} + Z_{op} + Z_{ao} + Z_{mo} \quad (4.2)$$

де індекси **б** і **н** відносяться до базового і нового варіантів.

Термін окупності:

$$T_{ок} = \frac{I}{\Delta Z_e} \quad (4.3)$$

де  $T_{ок}$  – строк окупності додаткових капітальних затрат;

$I$  – обсяг інвестицій в новий проєкт;

$\Delta Z_e$  – щорічна економія на електроенергії та ремонтах.

#### 4.1 Визначення величини капітальних витрат нового варіанту

Кошторис на обладнання для базового і нового варіантів приведений в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Визначення кошторису витрат для нового і старого варіантів

| Найменування<br>електрообладнання              | Кіль-<br>кість,<br>шт. | Кошторисна вартість |                |                |                |
|------------------------------------------------|------------------------|---------------------|----------------|----------------|----------------|
|                                                |                        | Базова              |                | Нова           |                |
|                                                |                        | За шт.,<br>грн      | Всього,<br>грн | За шт.,<br>грн | Всього,<br>грн |
| Релейно-контакторна система                    | 1                      | 800                 | 800            | -              | -              |
| Двигун АІР112М2 7,5 кВт                        | 1                      | 8140                | 8140           | 8140           | 8140           |
| Автоматичний вимикач Eaton (Moeller) PL6-C16/3 | 2                      | 814                 | 814            | 814            | 1628           |
| Автоматичний вимикач Eaton (Moeller) PL6-C4/2  | 1                      | 1224                | 1224           | 1224           | 1224           |
| Автоматичний вимикач Eaton (Moeller) PL6-C2/2  | 1                      | 1224                | 1224           | 1224           | 1224           |
| Перетворювач частоти LG Starvert SV075 iG5A-4  | 1                      | -                   | -              | 35217          | 35217          |
| Мікропроцесорний регулятор МТР-8               | 1                      | 3840                | 3840           | 3840           | 3840           |
| Клемно-блочний з'єднувач КБЗ-24-17             | 1                      | 530                 | 530            | 530            | 530            |

| Найменування<br>електрообладнання                        | Кіль-<br>кість,<br>шт. | Кошторисна вартість |                |                |                |
|----------------------------------------------------------|------------------------|---------------------|----------------|----------------|----------------|
|                                                          |                        | Базова              |                | Нова           |                |
|                                                          |                        | За шт.,<br>грн      | Всього,<br>грн | За шт.,<br>грн | Всього,<br>грн |
| Блок вентильний двоклапанний датчиків тиску<br>БВ-113-40 | 2                      | 2430                | 4860           | 2430           | 4860           |
| Зрівняльна судина моделі 5424                            | 1                      | 4000                | 4000           | 4000           | 4000           |
| Датчик рівня Сапфір-22-ДД-2410                           | 1                      | 4970                | 4970           | 4970           | 4970           |
| Всього                                                   |                        |                     | 30402          |                | 65633          |
| Транспортні витрати (13%)                                |                        |                     | 3952           |                | 8532           |
| Ціна обладнання, всього                                  |                        |                     | 34354          |                | 74165          |
| Монтажні та налагоджувальні роботи (10%)                 |                        |                     | 3435           |                | 7416           |
| Капітальні вкладення, всього                             |                        |                     | 37789          |                | 81581          |

#### 4.2 Розрахунок фонду заробітної платні

Обчислимо оплату праці по наявному тарифу. Оскільки установка є установкою з напругою до 1000 В, де напруга живлення  $U = 0,4$  кВ, то згідно ПУЕ обслуговувати цю установку може 2 працівники, у котрих розряд не нижче четвертого, а група допуску не менше третьої з електробезпеки.

Постійна заробітна плата електромеханіка 4-го розряду по наявному тарифу становить

$$З_{\text{т}} = 18500 \text{ грн.} \quad (4.4)$$

Оплата праці за шкідливі умови праці:

$$П_{\text{у}} = З_{\text{т}} \cdot H_{\text{уп}} = 18500 \cdot 0.04 = 740,0 \text{ грн} \quad (4.7)$$

де  $H_{\text{уп}}$  – надбавка за умови праці, що для четвертого розряду складає 4%.

Всього постійна заробітна плата 1 робітника складає:

$$З_{\text{пост}} = З_{\text{т}} + П_{\text{уп}} = 18500 + 740 = 19240 \text{ грн.} \quad (4.8)$$

Оплата премій  $K_{\pi} = 15...20\%$ .

$$P_{\pi} = \frac{Z_{\pi} \cdot K_{\pi}}{100} = \frac{19240 \cdot 15}{100} = 2886 \text{ грн.} \quad (4.9)$$

Всього основна заробітна плата:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{пост}} + P_{\pi} = 19240 + 2886 = 22126 \text{ грн.} \quad (4.10)$$

Додаткова заробітна плата:

$$Z_{\text{дод}} = Z_{\pi} \cdot 0,1 = 18500 \cdot 0,1 = 1850 \text{ грн.} \quad (4.11)$$

Знайдемо відрахування на єдиний соціальний внесок, що складають 22% від суми додаткової та основної заробітної плати.

$$Z_{\text{вв}} = 0,22 \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{дод}}) = 0,22 \cdot (22126 + 1850) = 5274.72 \text{ грн.} \quad (4.12)$$

Загальний річний фонд оплати праці 2 працівників складає:

$$\Phi = (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{дод}} + Z_{\text{вв}}) \cdot 2 \cdot 12 = (22126 + 1850 + 5274.72) \cdot 2 \cdot 12 = 702017.28 \text{ грн.} \quad (4.13)$$

#### 4.3 Розрахунок експлуатаційних витрат для базового і нового варіантів

Розмір капіталовкладень для базового і нового варіантів:

$$K_6 = 37789 \text{ грн,} \quad K_{\pi} = 81581 \text{ грн.}$$

Витрати на електроенергію при встановленні перетворювача частоти зменшується на 30 %:

$$Z_{\text{енб}} = P \cdot \Phi \cdot m_0 \cdot K, \quad (4.14)$$

де  $P$  – потужність двигунів (7,5 кВт);

$\Phi$  – кількість робочих годин в день (24 год);

$m_0$  – кількість робочих днів у році (270 дн.);

$K$  – вартість електроенергії (9,6 грн/кВт-год).

Для електропривода насоса живильної води:

$$\begin{aligned} Z_{\text{енб}} &= 7.5 \cdot 24 \cdot 270 \cdot 9.6 = 345600 \text{ грн}, \\ Z_{\text{енн}} &= Z_{\text{енб}} - 0.3 \cdot Z_{\text{енб}} = 345600 - 0.3 \cdot 345600 = 241920 \text{ грн}. \end{aligned} \quad (4.15)$$

#### 4.4 Розрахунок витрат на поточний ремонт обладнання

При застосуванні перетворювача частоти можлива безперервна робота електродвигуна, зменшуються пускові струми, втрати в кабелях, збільшується надійність всієї системи, тобто кількість поломок скорочується, а отже надійність системи електроприводу зростає. Заплановані витрати на поточний ремонт та обслуговування при базовому варіанті складають 10%, а при новому 3%.

$$Z_{\text{бр}} = 0.1 \cdot K_{\text{б}} = 0.1 \cdot 37789 = 3778.9 \text{ грн}. \quad (4.16)$$

$$Z_{\text{нр}} = 0.03 \cdot K_{\text{н}} = 0.03 \cdot 81581 = 2447.43 \text{ грн}. \quad (4.17)$$

Витрати на амортизаційні відрахування:

$$Z_a = \sum N_{ai} \cdot K_i. \quad (4.18)$$

$$Z_{\text{аб}} = 0.5 \cdot 37789 = 18894.5 \text{ грн};$$

$$Z_{\text{ан}} = 0.5 \cdot 81581 = 40790.5 \text{ грн}.$$

де  $N_a$  – норма амортизаційних відрахувань;

Витрати на додаткові матеріали для ремонту й обслуговування за базовим сценарієм сягають 20%, а за новим – 5% від фонду оплати праці:

$$Z_m = 0.2 \cdot \Phi \quad (4.19)$$

$$Z_{\text{мб}} = 0.2 \cdot 702017.28 = 140403.46 \text{ грн},$$

$$Z_{\text{мн}} = 0.05 \cdot 702017.28 = 35100.86 \text{ грн}.$$

Повні експлуатаційні витрати:

$$Z_e = Z_{en} + Z_{op} + Z_{ab} + Z_{mb} \quad (4.20)$$

$$Z_{об} = 345600 + 3778.9 + 18894.5 + 140403.456 = 508676.86 \text{ грн.}$$

$$Z_{ен} = 241920 + 2447.43 + 40790.5 + 35100.86 = 320258.79 \text{ грн.}$$

#### 4.5 Розрахунок економічної ефективності

Розрахуємо річний економічний ефект за експлуатаційними витратами згідно формули (4.2):

$$Z_{ef} = 508676.85 - 320258.79 = 188418.06 \text{ грн.}$$

Термін окупності:

$$T_{ок} = \frac{I}{Z_{об} - Z_{н}} = \frac{81581 - 37789}{508676.85 - 320258.79} = 0.232 \text{ років} \quad (4.21)$$

Отже, модернізація для цього типу обладнання є економічно виправданою. Короткий термін окупності пояснюється високою ціною електроенергії та порівняно незначною різницею капітальних інвестицій для базового та нового варіантів.

#### 4.6 Техніко-економічне обґрунтування вибору системи електроприводу

Для даного технологічного процесу можливо використати такі системи: релейно-контакторну, ПЧ-АД.

Для розгляду економічної сторони вигідності тієї чи іншої системи застосовуємо метод зведених витрат:

$$Z = E_n \cdot K + C, \quad (4.22)$$

де  $E_n$  – нормативний коефіцієнт економічної ефективності ( $E_n = 0,2$ ),

$K$  – капіталовкладення;

$C$  – собівартість;

$$C = C_a + C_o + C_{\Delta W}, \quad (4.23)$$

де  $C_a$  – амортизаційні відрахування;

$$C_a = E_a \cdot K, \quad (4.24)$$

$C_o$  – витрати на обслуговування і ремонт:

$$C_o = E_o \cdot K, \quad (4.25)$$

де  $E_a = 0,05$  – нормативний коефіцієнт амортизаційних відрахувань;

$C_{\Delta W}$  – витрати на електроенергію:

$$C_{\Delta W} = m_o \cdot \Delta W, \quad (4.26)$$

де  $E_o = 0,015$  – нормативний коефіцієнт витрат на обслуговування і ремонт;

$m_o = 9,6$  грн/кВт·год – вартість електроенергії;

$\Delta W$  – кількість витраченої електроенергії за рік:

$$\Delta W = \Delta P \cdot T_p, \quad (4.27)$$

де  $T_p$  – річний час роботи обладнання ( $T_p = 6500$  год).

Витрати потужності електроенергії, кВт:

$$\Delta P_{1,2} = k_z \cdot P_n \cdot \frac{1 - \eta_d}{\eta_d}, \quad (4.28)$$

де  $k_z = 0,9$  – коефіцієнт завантаження,

$\eta_d = 0,86$  – ККД двигуна.

Термін окупності, років:

$$T = \frac{I}{\Delta Z}. \quad (4.29)$$

Результати розрахунків зводимо до таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Порівняння варіантів систем

| Показники                                                                        | Тип системи         |          |
|----------------------------------------------------------------------------------|---------------------|----------|
|                                                                                  | Релейно-контакторна | ПЧ-АД    |
| Потужність двигуна $P_n$ , кВт                                                   | 7,5                 |          |
| Капіталовкладення $K$ , грн                                                      | 37789               | 81581    |
| Нормативний коефіцієнт амортизаційних відрахувань $E_a$                          | 0,05                |          |
| Амортизаційні відрахування $C_a = E_a \cdot K$ , грн.                            | 1889.45             | 4079.05  |
| Нормативний коефіцієнт відрахувань на обслуговування і ремонт $E_o$              | 0,015               |          |
| Витрати на обслуговування і ремонт $C_o = E_o \cdot K$ , грн.                    | 566.84              | 1224.0   |
| Вартість електроенергії $m_o$ , грн/кВт-год                                      | 9,6                 |          |
| Коефіцієнт завантаження $k_z$                                                    | 0,9                 |          |
| Річний час роботи $T_p$ , год                                                    | 7200                |          |
| ККД $\eta_o$ , %                                                                 | 0,86                | 0,86     |
| Втрати потужності $\Delta P = k_z \cdot P_n \cdot (1 - \eta_o) / \eta_o$ , кВт   | 0.855               | 0.855    |
| Кількість витраченої електроенергії за рік $\Delta W = \Delta P \cdot T_p$ , кВт | 4102.33             | 4102.33  |
| Витрати на електроенергію $C_{\Delta W} = m_o \cdot \Delta W$ , грн              | 39382.33            | 39382.33 |
| Собівартість $C = C_a + C_o + C_{\Delta W}$ , грн.                               | 41838.61            | 44685.09 |
| Нормативний коефіцієнт економічної ефективності $E_n$                            | 0,2                 |          |
| Зведені витрати $Z = E_n \cdot K + C$ , грн.                                     | 49396.41            | 61001.29 |
| Термін окупності $T = Z / I$ , рік.                                              | 0.77                | 1.34     |

З економічного погляду швидко окупляться обидві системи, але релейно-контакторна система є менш надійною та потребує більших витрат на ремонт і обслуговування. Тому обираємо систему ПЧ-АД з терміном окупності 1.34 роки.

## 5 ОРГАНІЗАЦІЙНА ТА ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

### 5.1 Загальні вказівки

При експлуатації котла повинні виконуватися вимоги наступних нормативних документів: «Правила будови і безпечної експлуатації парових і водогрійних котлів» (далі по тексту «Правила»); «Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів» (ПТЕ); «Правила вибухобезпеки котельних установок, що працюють на мазуті і природному газі»; «Правила техніки безпеки при експлуатації електроустановок споживачів» (ПТБ); «Правила безпеки в газовому господарстві»; «Правила улаштування електроустановок споживачів» (ПУЕ); «Типова інструкція для персоналу котельні»; Інструкцій на комплектуючі вироби; Будівельні норми і правила (БНіП).

При експлуатації котлів повинні виконуватися організаційно-технічні заходи, що забезпечують безпечні умови праці, а саме:

- наявність і виконання виробничих інструкцій по експлуатації;
- наявність інструкцій з безпеки праці на робочих місцях;
- виконання робіт підвищеної небезпеки за нарядами (нарядами-допусками);
- до початку проведення будь-яких робіт, пов'язаних з оглядом або ремонтом котла, допоміжного устаткування і т. п., необхідно знизити тиск в котлі до нуля, відключити його від робочих трубопроводів заглушками, відключити електричні схеми допоміжного устаткування, вивісити плакати з техніки безпеки (які забороняють, що попереджають, що вказують).

Для забезпечення безпеки обслуговуючого персоналу необхідно встановити захисний короб на вибуховому клапані.

Забороняється:

- приймати і здавати чергування під час ліквідації аварії та несправностей на устаткуванні котла до їх усунення;
- залишати котел без нагляду до повного припинення горіння палива і зниження тиску в котлі до нуля;

- заклинювати запобіжні клапани котла і змінювати їх регулювання на тиск вище 0,83 МПа;
- розтоплювати котел без води або при низькому невидимому по склу рівню;
- працювати при несправних манометрах, водовказівних стеклах, КВП і інших приладах безпеки;
- працювати в нічний час без освітлення арматури котла;
- проводити будь-який ремонт під час його роботи.

Підтягати фланцеві з'єднання на котлі дозволено тільки нормальними ключами без застосування подовжуючих важелів і при тиску в котлі не більше 0,3 МПа.

Обслуговуючому персоналу забороняється працювати з несправними та нерегульованою запобіжними клапанами і несправними поживними насосами, з несправною системою управління, відключеними і заблокованими датчиками, відключеними приладами захисту, при наявності витоків води і пари.

Випуск води з зупиненого котла дозволяється виконувати після зниження тиску в ньому до атмосферного.

Обслуговуючий персонал несе відповідальність за порушення інструкцій, що відносяться до виконуваної ними роботи, в установленому порядку.

Зйомку і установку кришок люків повинні виконувати не менше двох осіб.

Для захисту обслуговуючого персоналу від ураження електричним струмом необхідно:

- забезпечити заземлення електрообладнання (опір заземлюючого пристрою повинен задовольняти «Правилам технічної експлуатації електроустановок»);
- стежити щоб при експлуатації електрообладнання кришки коробок висновків електродвигунів, щити управління були постійно закриті;
- біля блоку управління повинен знаходитися діелектричний килимок з рифленою поверхнею;
- при роботі користуватися тільки інструментом з ізольованими рукоятками і індивідуальними засобами захисту.

Обслуговуючий персонал повинен вивчити і керуватись при роботі рекомендаціями експлуатаційної документації пальників, автоматики безпеки, насосів та інших комплектуючих.

При прийманні котла необхідно провести зовнішній огляд, перевірити його комплектність, переконається у відсутності пошкоджень і скласти акт про приймання.

Пуск в експлуатацію знову змонтованого, демонтованого і встановленого на новому місці котла проводити після реєстрації його в органах Держнаглядохоронпраці (Держнаглядохоронпраці) в порядку, передбаченому «Правилами».

Власник котла, крім паспорта котла встановленої форми, повинен мати в котельні:

- журнал з водопідготовки;
- змінний журнал для записів результатів перевірки котлів, показчиків рівня води, манометрів, запобіжних клапанів, живильного насоса, засобів автоматики, часу і тривалості продувки котла, здача і прийом зміни і інших даних за вказівкою адміністрації;
- ремонтний журнал.

Режим роботи котла повинен здійснюватися в суворій відповідності до режимної карти. Режимна карта повинна коректуватися в разі реконструкції котла або зміни марки палива.

Монтаж котла парового проводиться згідно з проектною документацією на його установку в котельні.

Розвантаження і транспортування котла парового до місця установки слід проводити обережно, щоб не пошкодити котел і допоміжне устаткування. При установці і монтажі котла парового прилади системи автоматики слід захищати від ударів, попадання вологи, фарби.

Після розпакування котла зробити перевірку наявності всього устаткування по комплектності заводу-виробника. Після перевірки складається акт технічного приймання котла.

Котел встановлюється полозами на бетонний майданчик без кріплення фундаментальними болтами. Установка котла перевіряється за рівнем. Монтажні роботи проводяться відповідно до документації заводу-виробника та проектом з обов'язковою технічною ревізією обладнання перед монтажем.

Електромонтаж, заземлення котла і допоміжного устаткування проводиться відповідно до вимог, що поставляється технічної документації і «Правил улаштування електроустановок».

Живильні насоси, змонтовані на рамі котла. При підключенні всмоктуючого трубопроводу необхідно стежити, щоб він був ретельно очищений від бруду, піску, окалини. Підсмоктування повітря не допускається. Підключення трубопроводів проводиться так, щоб їх зусилля від деформації не передавались на насос. Всмоктуючий трубопровід виконувати по можливості коротким.

Котел забезпечується вентилятором. При монтажі зробити його перевірку на відсутність стукотів і вібрації.

Комплект засобів управління поставляється двома блоками, які встановлюються відповідно до проекту котельні. Електромонтаж системи управління виконується згідно схеми електричних з'єднань, що поставляється з котлом.

Установка рівнемірної колонки проводиться при монтажі котла.

Після закінчення монтажу слід скласти акт про відповідність виробничий монтаж проектній документації, після чого дозволяється приступити до пуску і налагодження парового котла.

## **5.2. Підготовка котла до роботи**

Пуск і налагодження котла повинна виробляти спеціалізована налагоджувальна організація. Після закінчення наладки адміністрація підприємства повинна отримати від налагоджувальної організації режимну карту і технічний звіт про налагодження котла.

Луження належить виконувати для очищення внутрішніх поверхонь котла від можливих забруднень, а також для створення на поверхнях металу захисної

плівки. Тривалість луження і кількості реагентів залежить від ступеня і характеру забруднень.

Луження виконує пуско-налагоджувальна організація за розробленою нею програмою. При цьому слід керуватися «Рекомендаціями з луження і хімічної промивки котла».

Випробування котла на парову щільність проводиться з метою виявлення витоків пари та води, які можуть з'явитися внаслідок теплових розширень і деформацій. Випробування на парову щільність можна виконати в кінці луження без попередньої зупинки котла для промивання поверхонь нагріву, якщо з моменту виготовлення не пройшло більше 12 місяців і при внутрішньому огляді не виявлено видимого шару іржі або є окремі її вкраплення.

Перед розпалюванням котла необхідно оглянути котла і допоміжного устаткування:

- перевірити запас води в живильному баку і переконатися в можливості поповнення витрати, перевірити справність живильних пристроїв їх приводів і наявність необхідного тиску в живильній лінії;
- перевірити стан топки і допоміжного обладнання;
- випробувати справність заслінок і шиберів, легкість їх ходу, переконатися в наявності природної тяги;
- прибрати сторонні предмети та сміття в топці, газоходах, робочому місці обслуговуючого персоналу;
- перевірити справність арматури котла: головного парозапірного вентиля; показників рівня води (випробувати всі крани); запобіжних клапанів; іншої арматури.

Вся арматура перевіряється на легкість ходу її відкриттям і закриттям, одночасно з перевіркою справності арматури слід перевірити, щоб продувальні вентилі котла були закриті.

- перевірити відсутність заглушок перед і після запобіжних клапанів, на паропроводах, мазутопроводах газопроводах і газоходах;
- з'єднати повітряний простір барабана за допомогою триходового крана з атмосферою;

- перевірити зовнішнім оглядом всі прилади і імпульсні лінії до них;
- справність підлягає включенню газопроводу і встановлених на ньому кранів (крани повинні бути закриті, а продувальні лінії свічок відкриті);
- перевірити щільність (мильною емульсією) арматури і газопроводу котла;
- перевірити справність пальникового пристрою перед включення;
- перевірити справність системи управління і захисту котла, дія світлової та звукової сигналізації;

Виконати заповнення котла водою, переконавшись, що паровий простір котла повідомлено через триходовий кран з атмосферою. Температура живильної води повинна бути не нижче  $+ 5^{\circ}\text{C}$ .

Тривалість заповнення котла водою та її температура повинні бути вказані в розпорядженні на розпалювання, записаному в змінному журналі особою, відповідальною за справний стан і безпечну експлуатацію котла.

При заповненні котла водою слід мати на увазі, що якщо за час пуску котел не заповнюється водою до нижчого допустимого рівня, то слід встановити причину і провести повторний запуск.

Перед розпалюванням котла репер встановити на нульову позначку. (Величина теплового розширення не повинна перевищувати 5 мм).

### **5.3. Пуск котла**

Пуск знову встановленого котла в роботу проводиться за письмовим розпорядженням адміністрації підприємства після перевірки готовності обладнання котельної установки.

Безпечний час розпалу для даного типу котлів становить 45 хвилин.

Розпалювання котла, укомплектованого блоком автоматичного управління БАУ-ТП і пальником для роботи на газоподібному паливі проводити в наступному порядку:

- відкрити вентиль подачі живильної води на вході живильного насоса і на лінії від насоса до котла;
- відкрити газові крани перед відсічними клапанами пальники;

– встановити вимикач «Сеть» блоку БАУ-ТП в положення «On». Проконтролювати короткочасне поява на дисплеї напису «Початкове» і «№ програми»;

– натиснути кнопку «Пуск». Миттєво з'явиться напис «Тест дзвінка», після чого задзвенить сигнал аварії. Запуститься автоматичний алгоритм, який відображатиме інформацію на дисплеї. Під час роботи алгоритму у верхньому рядку з'являтимуться написи, що відповідають програмі керування (продування, розпал, прогрів, робота), а в нижньому – відомості про стан роботи. Алгоритм керування залежить від версії програмного забезпечення і визначається типом пальникового пристрою, що постачається з котлом.

Коли тиск досягне 0,1...0,3 МПа, необхідно здійснити продування рівнемірної колонки, водопоказних стеклов та манометра.

Поступово збільшувати тиск пари в казані до робочого значення (0,7...0,8 МПа). Під час прогрівання котла переконатися у справності котла, системи трубопроводів, всього котельно-допоміжного обладнання та арматури.

Розпалювання котла з блоком автоматичного управління БАУ-ТП та пальником для рідкого палива виконується у такій послідовності:

- відкрити арматуру на лініях подачі та повернення мазуту;
- відкрити кран на лінії подачі газу до запальника, перевірити відповідність тиску газу необхідному (відповідно до інструкції на пальник);
- перевести вимикач «Мережа» блоку БАУ-ТП у положення «On». Перевірити короткочасне відображення на дисплеї написів «Початкове» та «№ програми»;

– переконавшись у відповідній температурі мазуту, відкрити ручний вентиль на пальниковому пристрої та натиснути кнопку «Пуск». Миттєво з'явиться напис «Тест дзвінка», після чого задзвенить сигнал аварії. Запуститься автоматичний алгоритм, який відображатиме інформацію на дисплеї. Під час роботи алгоритму у верхньому рядку з'являтимуться написи, що відповідають програмі керування (розпал, прогрів, робота), а в нижньому – відомості про стан роботи.

Підключення котла до паропроводу повинно проводитися повільно, після ретельного прогріву і продувки паропроводу. Під час прогрівання необхідно

контролювати справність паропроводу, компенсаторів, опор і підвісок, а також рівномірне розширення паропроводу. У разі виникнення вібрації або сильних ударів, прогрівання потрібно припинити до усунення дефектів.

Під час підключення котла до робочого паропроводу, тиск у котлі має бути таким самим або трохи нижчим (не більше 0,05 МПа), ніж тиск у паропроводі.

При досягненні тиску в котлі 0,7...0,8 МПа, необхідно по черзі перевірити працездатність запобіжних клапанів примусовим підривом та їхню герметичність.

При першому розпалюванні котла, а також не рідше одного разу на місяць під час експлуатації, необхідно перевіряти спрацювання захисту котла за аварійними параметрами (бажано поєднувати перевірку захисту з плановою зупинкою котла). Крім того, залежно від режиму експлуатації котла (сезонний, періодичний тощо), порядок перевірки захисту має бути уточнений у виробничій інструкції адміністрації котельні.

#### **5.4. Робота котла**

Під час прийому зміни оператор зобов'язаний прийняти котел від попередньої зміни, особисто оглянути та перевірити його справність. Перевірити справність манометрів (установкою стрілки на нуль), показників рівня води, живильних пристроїв. Прийом та здачу зміни необхідно записувати у змінному журналі.

Під час чергування оператор повинен стежити за справністю всього обладнання котельні та суворо дотримуватися встановленого режиму роботи котла.

Виявлені під час роботи несправності обладнання слід записувати у змінному журналі. У разі неможливості усунення несправності, необхідно повідомити про це начальника котельні або відповідальну за безпечну експлуатацію котлів особу.

Особливу увагу під час роботи парового котла слід приділяти:

- рівню води в котлі та наявності води в живильному баку;
- підтримці в котлі заданого тиску пари, який не повинен бути вище 0,8 МПа;

– стабільності горіння, що має відбуватися без пульсацій, ударів, відриву факела та димління.

Перевірку справності роботи показчиків рівня води шляхом продування необхідно проводити не рідше одного разу на зміну, з відповідним записом у змінному журналі.

Перевірку справності роботи манометрів за допомогою триходового крана слід проводити не рідше одного разу на зміну, з відповідним записом у змінному журналі.

Перевірку запобіжних клапанів примусовим підривом необхідно проводити не рідше одного разу на зміну. Експлуатація котла з несправними та невідрегульованими клапанами заборонена.

Справність живильних пристроїв має контролюватися постійно.

Періодичне продування котла необхідно проводити у строки, встановлені адміністрацією котельні, на підставі рекомендацій налагоджувальної організації з ведення водно-хімічного режиму котла, але не рідше одного разу на зміну.

Час проведення продування та його тривалість записуються у журналі.

Заборонено здійснювати продування при несправній продувній арматурі, відкривати та закривати продувну арматуру ударами молотка або іншими предметами, а також з використанням подовжених важелів.

При спінюванні води в котлі, яке проявляється різкими коливаннями рівня, частим включенням та відключенням живильних пристроїв, може також супроводжуватися «кидками» води та піни в паропровід, шипінням арматури, гідравлічними ударами та пробиттям прокладок у фланцях, необхідно:

- припинити подачу палива, зупинити вентилятор;
- відкрити продувку котла;
- відібрати проби котлової води та діяти за вказівкою старшого по зміні.

Спінювання може виникнути при:

- різкому збільшенні витрати пари та зниженні тиску в котлі;
- підвищенні вмісту солі або лужності котлової води.

У зв'язку з тим, що лужність не завжди забезпечує повну чистоту поверхонь нагріву котла, необхідно протягом першого місяця експлуатації проводити

інтенсивне продування котла (приблизно в 2 рази порівняно з розрахунковим) для видалення забруднень.

Вентилі та крани на всіх трубопроводах належить відчиняти поволі й обережно. Після повного відчинення вентиля, щоб запобігти заклинюванню і заїданню штока, необхідно повернути маховик назад на пів оберту.

Витрата палива не може перевищувати зазначеної в режимній карті. Паровий котел має працювати без диму, присутність якого вказує на погане згоряння палива. Робота котла з димлінням заборонена.

Видалення з поверхонь нагріву відкладень шляхом обдування потрібно проводити у терміни, встановлені адміністрацією. Обдування конвективного пучка виконується обдувальним апаратом при мінімальному навантаженні та максимальному тиску в котлі. При проведенні обдування котла необхідно попередити обслуговуючий персонал, аби уникнути опіків.

Оператор зобов'язаний перед включенням обдувального апарату ретельно перевірити з'єднання гумового шланга зі штуцерами й тільки після цього повільно відкрити вентиль паропроводу. Обдування потрібно негайно припинити, якщо під час її проведення буде виявлено несправність котла або обдувального пристрою.

При експлуатації парового котла, а також після ремонту чи налаштування датчиків системи керування, необхідно проводити перевірку захисту. Перевірка здійснюється на працюючому котлі в такому порядку:

- при тиску в котлі 0,1...0,2 МПа повільно відкрити вентиль продувки. Коли вода опуститься нижче нижнього аварійного рівня, має автоматично вимкнутися пальниковий пристрій і ввімкнутися світлова та звукова сигналізація;

- прикриттям парового вентиля підняти тиск пари в барабані парового котла до 0,82 МПа, при цьому повинен спрацювати датчик тиску, що спричинить вимкнення пальникового пристрою та ввімкнення звукової та світлової сигналізації;

- на час роботи котла встановити заслінку з непрозорого матеріалу (картон, пароніт тощо) між фотодатчиком і топкою, при цьому за кілька секунд має

вимкнутися пального пристрій та спрацювати звукова та світлова сигналізація;

– на час роботи котла вручну закрити заслінку вентилятора, при цьому має вимкнутися пального пристрій та спрацювати звукова та світлова сигналізація;

– перевірка проводиться при досягненні водою верхнього регульованого рівня. На працюючому котлі необхідно різко збільшити відбір пари шляхом відкриття ГПЗ. При цьому при підвищенні рівня води вище ВДУ, має вимкнутися пального пристрій та спрацювати звукова та світлова сигналізація;

– перед пальноком (для котлів, що працюють на газі): для перевірки захисту по зниженню тиску газу необхідно повільно прикрити кран на основному газопроводі, при цьому повинен вимкнутися пального пристрій та спрацювати світлова та звукова сигналізація;

– для перевірки захисту з підвищення тиску газу необхідно підвищити тиск газу перед пальноком до значення, що перевищує номінальну більш ніж на 10%. При цьому повинен вимкнутися пального пристрій та вимкнутися світлова та звукова сигналізація;

– для перевірки захисту необхідно вимкнути підігрів мазуту на блоці підготовки палива. Через деякий час має вимкнутися пального пристрій та вимкнутися звукова та світлова сигналізація.

Примітка: під вимкненням пального пристрою слід розуміти:

– для котла, що працює на газі, закриття клапанів відсікачів і припинення процесу горіння;

– для котла, що працює на рідкому паливі, закриття клапана - отсекаеля, зупинку двигуна і припинення процесу горіння.

Перевірку функціонування аварійних захистів на котлах, укомплектованих пальниками Unigas, виконувати з урахуванням рекомендацій «Інструкції з монтажу, експлуатації, обслуговування газових пальників Unigas».

## 5.5. Зупинка парового котла

Зупинка парового котла у всіх випадках, за винятком аварійного, повинна здійснюватися лише за письмовим розпорядженням адміністрації відповідно до інструкції з експлуатації котла. Для зупинки котла необхідно натиснути на кнопку «Стоп».

**Аварійна зупинка котла.** Обслуговуючий персонал зобов'язаний в аварійних випадках негайно зупинити котел і повідомити про це начальника (завідувача) котельні або особу, що його замінює, зокрема, якщо:

- виявлена несправність запобіжного клапана;
  - тиск піднявся вище допустимого більш ніж на 10% і продовжує зростати, незважаючи на припинення подачі палива та посилене живлення котла водою;
  - стався упуск води з котла (нижче нижчого допустимого рівня).
- Підживлення котла водою. При цьому категорично забороняється;
- рівень води швидко знижується, незважаючи на посилене живлення котла водою;
  - рівень води піднявся вище вищого допустимого рівня і продуванням котла не вдається знизити його;
  - перестав діяти живильний насос;
  - припинена дія всіх показчиків рівня води;
  - в основних елементах котла (барабанах, колекторах, парових та живильних трубопроводах, арматурі) виявилися тріщини, випучини, порушення цілісності зварних швів;
  - зникла напруга на контрольно-вимірювальних приладах і пристроях автоматичного управління;
  - виникла пожежа в котельні або загорілася сажа в газоході, загрозливі обслуговуючому персоналу та котлу;
  - не працює система автоматичного регулювання та захисту котла;
  - в роботі котла помічені незрозумілі явища (ненормальний шум, удари, стукіт тощо).

Причини аварійної зупинки котла повинні бути записані у змінному журналі.

При появі свищів на трубах поверхонь нагріву, а також при інших пошкодженнях та несправностях арматури, манометрів, приладів безпеки та допоміжного обладнання, що не потребують негайної зупинки котла, обслуговуючий персонал зобов'язаний терміново повідомити про це адміністрацію.

При аварійній зупинці котла необхідно:

- відключити подачу палива;
- відключити котел від головного паропроводу;
- випустити пар через підняті запобіжні клапани.

У разі виникнення в котельні пожежі, персонал котельні повинен негайно викликати пожежну охорону та вжити всіх заходів для гасіння, не припиняючи спостереження за котлом.

Якщо пожежа загрожує котлу і неможливо загасити її швидко, необхідно зупинити котел в аварійному порядку, посилено живлячи його водою та випускаючи пару в атмосферу (на вулицю).

## 5 РЕЗУЛЬТАТИВНА ЧАСТИНА

### Висновки щодо кваліфікаційної роботи та рекомендації

У кваліфікаційній роботі здійснено аналіз електроприводу насоса подачі живильної води парового котла, проведено розрахунок потужності та здійснено вибір приводного асинхронного двигуна типу АІР112М2 з потужністю 7,5 кВт. Створено електричну принципову схему електроприводу. Обчислено параметри математичної моделі двигуна та розроблено електронну модель системи електроприводу, дослідження якої проведено у середовищі Matlab. Встановлено, що використання перетворювача частоти з скалярним методом регулювання асинхронного двигуна забезпечує підтримку заданих обертів з точністю до 5%, а з векторним – близько 1...1,5%.

Регулювання швидкості обертання робочого колеса насоса за допомогою ПЧ дозволяє зменшити споживання електроенергії до 40% за умови необхідності зниження продуктивності насоса шляхом зменшення частоти обертання вала насоса, в порівнянні з регулюванням потоку води шляхом дроселювання заслінкою.

В економічному розділі роботи представлено розрахунок ефективності та терміну окупності витрат на автоматизований електропривод котельної установки: Річний економічний ефект складає 188418 грн, а термін окупності 1,34 роки.

Пропозиції з автоматизації електроприводу котельної установки обґрунтовано необхідними теоретичними розрахунками, мають практичний характер та можуть бути використані у виробництві.

## ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи бакалавра за спеціальністю 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» галузі знань 14 – «Електрична інженерія» / Укладачі: В.Ф. Бабіч, А.А. Галіулін, Є.П. Штепа – Одеса: ОНАХТ, 2021. – 55 с.
2. Ромашко І.С., Паска М.З., та ін. Технохімічний контроль виробництва/ Навчально-методичний посібник. – Львів. – 2016. – 98с.
3. Оськин С.В. Автоматизований електропривод: учбовий посібник для студентів ВНЗ / С.В.Оськин -: Изд-во ООО «КРОН», 2013,- 489 с.
4. Шульга О.В. Методичні вказівки і завдання до виконання курсового проекту з дисципліни “Електропривід і автоматизація роботів і маніпуляторів” для студентів спеціальності 7.092203 “Електромеханічні системи автоматизації і електропривод” всіх форм навчання. – Полтава: Полтавський державний технічний університет імені Юрія Кондратюка, 1999. – 24 с.
5. Онушко В.В. Машины постійного струму: Посібник із модуля “Машины постійного струму” / В.В. Онушко, О.В. Шефер. – Полтава: ПолтНТУ, 2007. – 111 с.
6. Попович М.Г. Теорія автоматичного керування: Підручник. – 2-ге вид. / М.Г. Попович, О.В. Ковальчук. – К.: Либідь, 2007. – 656 с.
7. Правила безпечної роботи електроустановок. Харків, «Форт», 2003. – 250 с.
8. Моделювання електромеханічних систем. Математичне моделювання систем асинхронного електроприводу: навчальний посібник / О. І. Толочко. – Київ: НТУУ «КПІ», 2016. – 150 с.
9. Монтаж, наладка і експлуатація електрообладнання. Джерело: <https://dspace.mnau.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/11538/3/ciganov-montazh-elektroobl-lekc-2022.pdf>
10. Загірняк М. В., Невзлін Б. І. Електричні машини: Підручник. — 2-ге вид., перероб. і доп. — Київ: Знання, 2009. — 400 с. — ISBN 978-966-346-644-6.