

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ  
ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
КАФЕДРА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКИ ТА МЕХАТРОНІКИ



## ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної роботи бакалавра на тему:

**«Модернізація електроприводу компресора стислого повітря»**

Здобувач: Плешканівський А. К.

II курсу, групи АЕМт-20

Керівник: доцент Ревенюк Т. А.

Кваліфікаційна робота бакалавра допускається до захисту.

Рішення кафедри від «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 р., протокол №\_\_\_\_\_.

Завідувач кафедри ЕтаМ \_\_\_\_\_ Петро ОСАДЧУК

ОДЕСА 2024

# ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет: Автоматизації та робототехніки

Кафедра: Електромеханіки та мехатроніки

Освітньо-кваліфікаційний рівень: бакалавр

Галузь знань: 14 – Електрична інженерія

Спеціальність: 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Освітня програма: Інтелектуально-керовані електромеханічні системи

**«ЗАТВЕРДЖУЮ»**

Завідувач кафедри ЕтаМ

д.т.н., доц. Осадчук П.І.

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2024 р.

## **ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА здобувачу вищої освіти Плешканівському Артуру Костянтиновичу**

Тема роботи: «Модернізація електроприводу компресора стислого повітря».

Керівник роботи: Ревенюк Тетяна Анатоліївна, к.ф.-м.н., доцент.

2 Затверджено наказом ОНТУ № 797-03 від 19.12.2023 р.

Строк подання студентом роботи: 14.06.2024 р.

3. Вихідні дані до роботи: Повітряний компресор ВПЗ-20/9, частота обертів колінчастого валу 740 об/хв

4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки:

Вступ. 1. Загальна частина. Технічні характеристики компресорної станції.

2 Розрахунково-конструкторська частина. Опис технологічної схеми компресорної станції

3 Дослідження роботи електроприводу компресорної станції на моделі.

4. Організація та технологія монтажу, ремонту і обслуговування та техніка безпеки праці при обслуговуванні електроприводу компресорної станції.

5 Економічна частина. Розрахунок економічної ефективності від модернізації електроприводу.

6. Висновки.

Список використаних джерел. Додатки.

5 Перелік демонстраційного матеріалу: слайди презентації (12 шт.): 1 Титульний. 2 Мета, задачі, методи. 3 Технологічна схема компресорної станції 4 Розрахунок потужності двигуна, технічні характеристики. 5 Статичні характеристики електроприводу. 6 Структурна схема перетворювача частоти. 7 Принципова електрична схема силової частини. 8 Модель електроприводу компресорної станції з прямим пуском. 9 Результати моделювання приводу з прямим пуском. 10. Модель модернізованого електроприводу компресорної станції. 11 Результати моделювання приводу після модернізації. 12 Висновки.

6 Консультанти розділів проекту (роботи)

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

7 Дата видачі завдання: 05.02.2024 р.

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів кваліфікаційної роботи бакалавра   | Строк виконання етапів | Прим. |
|-------|---|------------------------|-------|
| 1     | Вступ. Загальна характеристика роботи. Актуальність теми. Об'єкт і мета роботи.   | 06.03.2024             |       |
| 2     | Розрахунково-конструкторська частина. Опис технологічної схеми компресорної станції. Загальна характеристика компресорної установки, як об'єкта управління. Опис принципу дії, конструкції та кінематичної схеми привода компресорної станції. Параметрична схема та методи регулювання швидкості обертання електроприводу компресорної станції. Формулювання вимог до електроприводу компресорної установки, обґрунтування типу двигуна, розрахунок його потужності. Розрахунок статичних характеристик двигуна. | 22.04.2024             |       |
| 3     | Дослідження роботи електроприводу компресорної станції. Обґрунтування вибору, розробка структурних і функціональних схем та розрахунок параметрів окремих елементів системи електроприводу компресорної установки. Опис системи ПЧ-АД. Моделювання динамічних режимів електромеханічної системи електроприводу компресорної станції до і після модернізації.  | 18.05.2024             |       |
| 4     | Організація та технологія монтажу, ремонту і обслуговування та техніка безпеки праці при обслуговуванні електроприводу компресорної станції.  | 05.06.2024             |       |
| 5     | Економічна частина. Розрахунок економічної ефективності від модернізації електроприводу.  | 12.06.2024             |       |
| 6     | Висновки і рекомендації за прийнятими в роботі рішеннями.   |                        |       |
| 7     | Попередній захист кваліфікаційної роботи бакалавра  | 17.06.2024             |       |
| 8     | Перевірка роботи на добросовісність. Рецензування роботи  | 18.06.2024             |       |
| 9     | Захист кваліфікаційної роботи бакалавра   | 25.06.2024             |       |

Здобувач-дипломник \_\_\_\_\_ Плешканівський А. К.

Керівник \_\_\_\_\_ Ревенюк Т. А.

*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 добросовісності.*

Здобувач-дипломник \_\_\_\_\_ Плешканівський А. К.

## РЕФЕРАТ

Плешканівський Артур Костянтинович «Модернізація електроприводу компресора стислого повітря». Кваліфікаційна робота бакалавра. Одеса: ОНТУ, 2024. – 76 с. Іл.: 20. Табл.: 8.

У кваліфікаційній роботі описано автоматизований електропривод компресорної станції, області її застосування та конструктивні особливості. Сформульовано вимоги до електроприводу, розраховано навантаження та обрано двигун для приводу компресорної станції.

Вибрано систему електроприводу «перетворювач частоти - асинхронний двигун», обрано та досліджено закон керування за допомогою перетворювача частоти.

Розраховано електричні параметри схеми вмикання двигуна. Змодельовані перехідні процеси двигуна при прямому пуску та в комбінації з перетворювачем частоти, побудовано механічні та електромеханічні статичні характеристики.

Розраховано економічний ефект від модернізації електроприводу компресорної станції та наведено заходи з охорони праці та техніки безпеки.

Ключові слова: компресорна станція, автоматизований електропривод, перетворювач частоти, математична модель, частотне регулювання обертів, механічна характеристика.

## ABSTRACT

Artur Kostyantynovich Pleshkanivsky "Modernization of the electric drive of the compressed air compressor". Bachelor's qualifying work. Odesa: ONTU, 2024. – 76 p. Illustration: 20. Table: 8.

The qualification work describes the automated electric drive of the compressor station, its areas of application and design features. The requirements for the electric drive have been formulated, the load has been calculated and the engine has been selected to drive the compressor station.

The electric drive system "frequency converter - asynchronous motor" was selected, the law of control using the frequency converter was selected and investigated.

The electrical parameters of the engine start-up circuit are calculated. Transient processes of the engine during direct start and in combination with a frequency converter are simulated, mechanical and electromechanical static characteristics are constructed.

The economic effect of the modernization of the electric drive of the compressor station is calculated, and measures for occupational health and safety are given.

Keywords: compressor station, automated electric drive, frequency converter, mathematical model, frequency regulation of revolutions, mechanical characteristics.

## ЗМІСТ

|   |    |
|---|----|
| ВСТУП.....  | 8  |
| 1 ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА.....   | 9  |
| 1.1 Загальні відомості. ....  | 9  |
| 1.2 Характеристики поршневих компресорів. ....  | 13 |
| 1.3 Технічні характеристики поршневого компресору ВПЗ-20/9. ....                          | 15 |
| 1.4 Характеристики електроприводу компресору ВПЗ-20/9. ....                               | 17 |
| 2.1 Вимоги до устаткування компресорної станції. ....                                     | 20 |
| 2.2 Розрахунок параметрів двигуна. ....   | 21 |
| 2.3 Побудова механічної характеристики. ....  | 23 |
| 2.4 Лінія живлення та її параметри. ....  | 26 |
| 2.5 Обладнання захисту та включення електродвигуна. ....                                  | 28 |
| 2.6 Схема включення двигуна. ....   | 31 |
| 2.7 Перетворювач частоти та його переваги. ....   | 33 |
| 2.8 Вибір перетворювача частоти. ....   | 43 |
| 3 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ.....  | 47 |
| 3.1 Постановка задачі моделювання роботи електропривода на ПЕОМ.....                      | 47 |
| 3.2 Розрахунок параметрів схеми заміщення двигуна електропривода компресора повітря. .... | 49 |
| 3.3 Моделювання прямого пуску двигуна електропривода. ....                                | 53 |
| 3.4 Моделювання пуску двигуна електропривода з ПЧ. ....                                   | 55 |
| 3.5 Висновки і пропозиції.....  | 57 |
| 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ОБСЛУГОВУВАННЯ ПОВІТРЯНОГО КОМПРЕСОРУ                                  | 59 |
| 4.1 Загальна характеристика шкідливих та небезпечних факторів.....                        | 59 |

|  |                |          |        |      |                                     |       |         |
|--|----------------|----------|--------|------|-------------------------------------|-------|---------|
|  |                |          |        |      | <b><i>KPM.EmaM.141.797-03.9</i></b> |       |         |
| Зм.  | Арк.           | № докум. | Підпис | Дата |                                     |       |         |
| Розробив   | Плешканівський |          |        |      | Лім.                                | Аркуш | Аркушів |
| Керівник   | Ревенюк Т.А.   |          |        |      |                                     |       |         |
| Зав.кафедри  | Осадчук П.І.   |          |        |      | <b>ОНТУ, АЕМm-20a</b>               |       |         |
| <i>Модернізація електроприводу компресора стислого повітря</i> |                |          |        |      |                                     |       |         |

|     |  |  |
|-----|--|--|
| 4.2 | Перелік реалізованих засобів охорони праці. ....         | 59                                     |
| 4.3 | Пожежна безпека. ....                                    | 63                                     |
| 5   | ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ.....                    | 65                                     |
| 5.1 | Вступ.....   | 65                                     |
| 5.2 | Розрахунок капітальних витрат.....                       | 66                                     |
| 5.3 | Розрахунок експлуатаційних витрат.....                   | 67                                     |
| 5.4 | Розрахунок експлуатаційних та амортизаційних витрат..... | 68                                     |
| 5.5 | Витрати на електроенергію. ....                          | 69                                     |
| 5.6 | Річний фонд заробітної плати. ....                       | 71                                     |
|     | ВИСНОВКИ .....   | <b>Ошибка! Закладка не определена.</b> |
|     | Перелік літератури .....                                 | <b>Ошибка! Закладка не определена.</b> |

## ВСТУП

Компресорні установки застосовуються у всіх промислово-виробничих установках. Так як специфіка роботи різних підприємств відрізняється, то існує велика різниця між типами компресорів, призначених для різних сфер застосування. За сферами застосування діляться компресори на наступні типи:

- газовий тип використовується для стиснення різного роду газів і газів з домішками, але не призначені для стиснення повітря.
- компресори, які використовуються для стиснення повітря, мають відповідну назву.
- багатоцільові і багатослужбові компресорні установки.

В роботі виконано обґрунтування та розрахунок електроприводу компресорної станції.

**Актуальність теми:** Впровадження частотно-регулюючі системи керування дозволяє суттєво підвищити продуктивність виробництва, шляхом створення відповідних алгоритмів керування приводом.

**Об'єкт дослідження:** Методи підвищення надійності та енергоефективності трифазних асинхронних двигунів з короткозамкнутим ротором.

**Предмет дослідження:** Модернізація електроприводу компресора та впровадження сучасних ефективних систем керування.

**Мета:** Зменшення електроенергії, що споживається електроприводом, підвищення його надійності та зменшення витрат на експлуатацію.

**Завдання дослідження:** Модернізувати електропривод компресора, виконати розрахунок основних параметрів електрообладнання.

**Методи дослідження:** Математичне моделювання роботи електродвигунів та пускозахисної апаратури в електроприводах з трифазними асинхронними двигунами.

**Практичне значення:** Підвищення ресурсів двигунів та приводів, зменшення затрат на обслуговування та ремонт, економія електроенергії.

# 1 ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

## 1.1 Загальні відомості.

Майже на будь-якому підприємстві є потреба у стислому повітрі. Будь то маленька станція шиномонтажу із невеличким компресором, чи велике підприємство із розголоудженою системою повітропроводів та цілою мережею компресорних станцій та редукторних пунктів. Так чи інакше, а потреба в стислому повітрі тільки зростає. Дедалі частіше використовується пневматичний інструмент, різноманітні пневмоприводи, пункти фарбування тощо. Багато технологічних процесів потребують стислого повітря, від хімічної промисловості до металургії.

Усі ці потреби забезпечуються шляхом стиснення атмосферного повітря, до заданих величин тисків, за допомогою компресорів які в залежності від реалізації, або закачують стисле повітря до накопичувальних ємностей, або спрямовують його безпосередньо до мережі повітропроводів підприємства.

В якості машин для стиснення повітря використовується ціла низка різноманітних механізмів, які в цілому називають компресорами. За принципом роботи, вони поділяються на декілька типів. Найпоширенішими, на сьогоднішній день, є компресори які працюють за принципом стискання повітря поршнем, тобто поршневі. Але останнім часом їх доля неспинно зменшується за рахунок розвитку таких компресорів як відцентрові, роторні та навіть турбінні. Але все ж досі парк поршневих компресорів на підприємствах України дуже великий. І багато з цих компресорів потребують якщо не заміни, то хоча б модернізації їх системи приводу.

Також необхідно підсилювати догляд за системами повітропостачання підприємств. Іноді, на великих виробництвах не рідкими є випадки коли споживач повітря знаходиться за сотні і навіть 1.5 тисячі метрів від місця виробництва стисненого повітря, тобто компресорної станції. Це призводить до зниження ефективності виробництва стислого повітря та відповідно до підвищення матеріальних витрат на транспортування повітря.

Системи повітропостачання розрізняють за рівнем тиску який вони забезпечують. Найпоширенішими є системи із тиском, який вони забезпечують, в діапазоні 0,6 – 0,8 МПа. Також, в залежності від об'ємів споживання повітря, системи розділяють на 4 основні групи;

- Дрібні, із споживанням до  $50 \text{ м}^3/\text{хв}$ ;
- Малі, із споживанням від 50 до  $200 \text{ м}^3/\text{хв}$ ;
- Середні, із діапазоном споживання  $200 - 500 \text{ м}^3/\text{хв}$ ;
- Великі, які споживають понад  $500 \text{ м}^3/\text{хв}$ .

В залежності від принципу дії, компресори поділяють на 2 основні групи, це динамічні, та об'ємні. До об'ємних відносять компресори у яких відбувається стискання повітря за рахунок змінення об'єму робочої камери. Саме до такого типу відносяться поршневі компресори, у яких зміна робочого об'єму відбувається за рахунок зворотно-поступального переміщення поршню.

До динамічних, відносяться лопатеві компресори та турбінні. В таких компресорах стискання відбувається за рахунок взаємодії потоку повітря із лапатами компресору, які примусово направляють потік повітря до камери меншого об'єму.

Також розрізняють компресори за ступенями, тобто одноступеневі та багатоступеневі. Так в поршневих компресорах, на одному колінчастому валу можуть знаходитись поршні усіх ступенів, і до того ж, при переході між ступенями відбувається проміжне охолодження повітря.

Багатоступеневі поршневі компресори мають різноманітні схеми компоновки, деякі з них наведені на рисунку 1.1

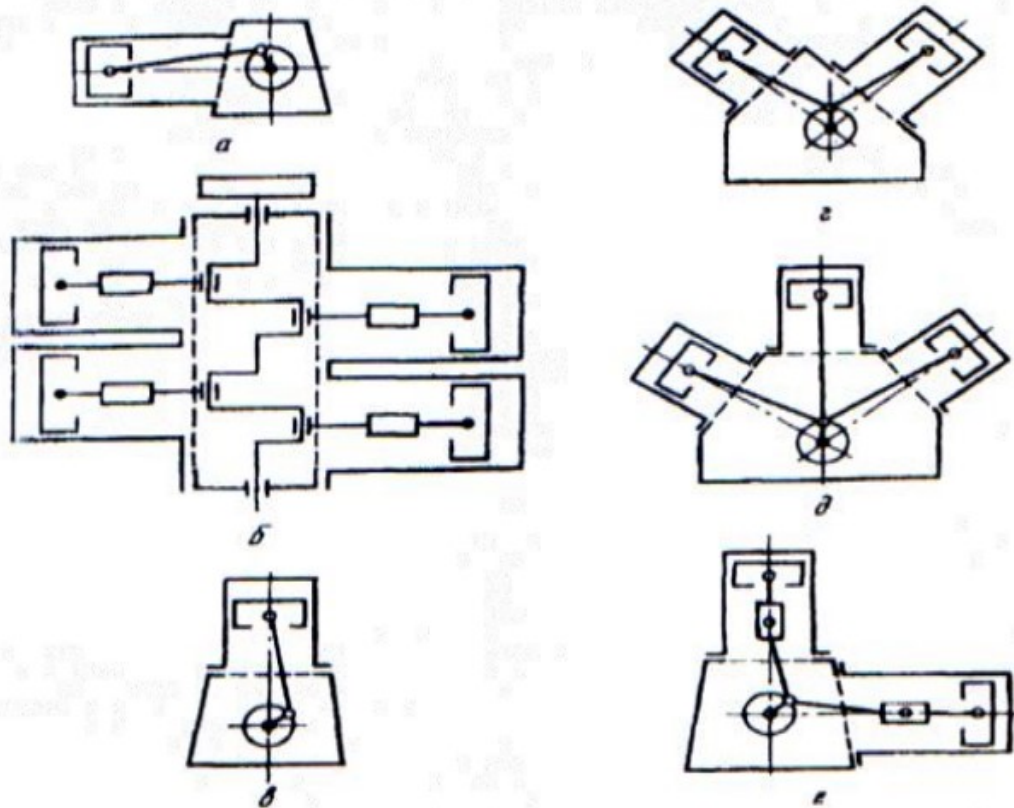


Рисунок 1.1 – Конструктивні схеми поршневих компресорів

а – горизонтальний; б – опозитний; в – вертикальний; г – V-подібний; д – W-подібний; е – L-подібний.

Як можна побачити з рисунку 1.1 то поршневі компресори можуть бути як одноциліндрові, так і багатociліндрові. Також за різними властивостями поршневі компресори поділяють на компресори простої та подвійної дії, одноступеневі та багатоступеневі, із водяним та повітряним охолодженням, сухі та із мастилом, тихохідні (до 200 об/хв) та швидкохідні (понад 500 об/хв), низького (2,5 МПа), середнього (до 6,0 МПа) та високого (понад 6,0 МПа) тиску.

Не дивлячись на свою поширеність, поршневі компресори мають декілька суттєвих недоліків, таких як:

- Відносно мала продуктивність у порівнянні із компресорами інших видів;

- Незрівноваженість рухомих мас, що призводить до вібрацій, та відповідно підвищує вимоги до умов монтажу;
- Нерівномірність виходу стислого повітря до мережі повітропостачання у вигляді пульсацій та мікро пневматичних ударів, що вимагає додаткових витрат на встановлення компенсаційних повітрозбірників та інших засобів нормалізації тиску.

Так наприклад, останніх двох недоліків не мають відцентрові або турбокомпресори. Але компресори цього типу розраховані на велику продуктивність (понад сотні і навіть тисячі м<sup>3</sup>/хв), а при потребі відносно невеликих об'ємів стислого повітря вони стають економічно не привабливими. Окрім того, для обслуговування турбокомпресорів потрібні коштовні інструменти та прилади, а також високо кваліфіковані працівники, на яких зростають витрати з фонду заробітної плати. Натомість, для обслуговування поршневих компресорів малої та середньої продуктивності достатньо бригади з двох слюсарів і звичайні інструменти які є у мехслужбі будь-якого підприємства.

На сьогоднішній день, для нових компресорних станцій малої та середньої продуктивності все частіше застосовують гвинтові (роторні) компресори. Вони відрізняються високою надійністю, великими міжремонтними інтервалами які сягають до 50 тис. год. Але вони все ще відносно коштовні, через високі вимоги до точності їх виготовлення. Хоча поступово технології їх виготовлення та легкість і простота їх обслуговування надають їм перевагу над поршневими компресорами.

Та не дивлячись на усі сучасні досягнення в галузі розвитку компресорів, в Україні все ще доволі багато поршневих компресорів які потребують як що не коштовної заміни, то точно модернізації для підвищення їх ефективності та енергозаощадження.

## 1.2 Характеристики поршневих компресорів.

На прикладі одноступеневого поршневого компресору розглянемо основні його характеристики. До них відносяться:

- $D$  – діаметр циліндру;
- $S$  – хід поршню;
- $n$  – частота обертання валу;
- $V_{шп}$  – об'єм шкідливого простору.

Поршневий компресор відноситься до машин циклічної дії, тобто стискання повітря відбувається циклами за рахунок зворотно-поступального руху поршнів. Теоретична діаграма такого циклу наведена на рисунку 1.2.

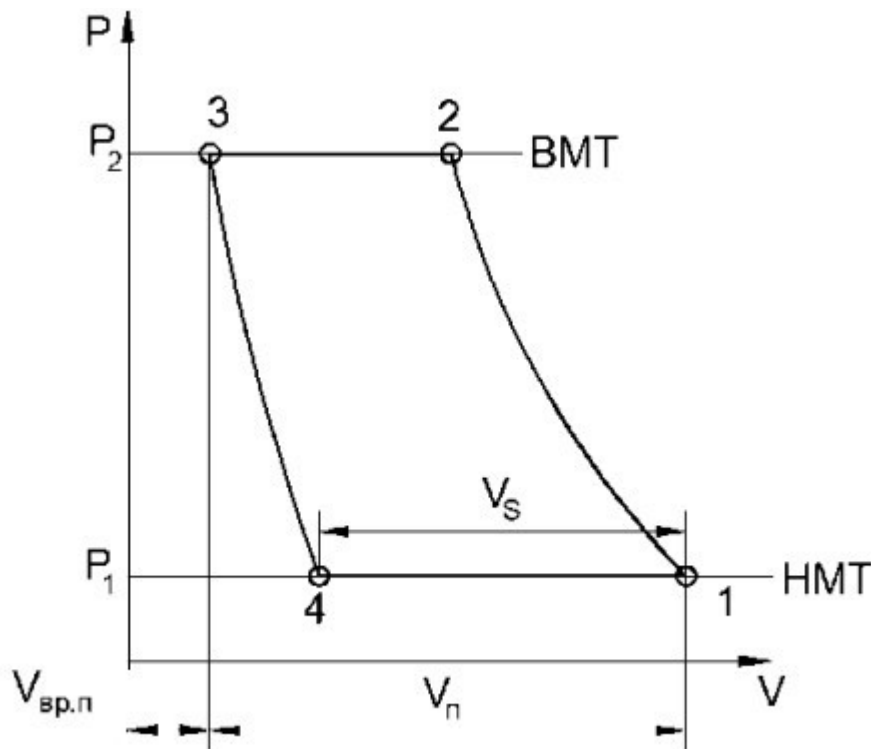


Рисунок 1.2 – Діаграма теоретичного циклу поршневого компресору.

4-1 – процес всмоктування; 1-2 – процес стиснення повітря; 2-3 – процес виштовхування стисненого повітря; 3-4 – процес розширення повітря яке залишилося у «мертвому» просторі.

Реальна ж діаграма відрізняється від цієї, за рахунок наявності шкідливого простору, інерційності клапанів які не можуть спрацювати миттєво. В наслідок цього, реальний об'єм повітря яке потрапляє до циліндру буде меншим ніж теоретичний об'єм який описує поршень. Теоретична продуктивність  $V_T$  визначається формулою:

$$V_T = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot S \cdot n \quad (1.1)$$

В дійсності на продуктивність компресору також впливають вологість повітря, витікання повітря через поршневу групу, дроселювання на клапанах та багато інших чинників. Всі ці втрати враховуються коефіцієнтом  $\lambda$  і реальна продуктивність буде дорівнювати:

$$V_p = \lambda \cdot V_T \quad (1.2)$$

Як можна побачити, теоретична продуктивність поршневого компресору не залежить від тиску, а визначається лише геометричними параметрами поршню та частотою обертів. В дійсності ж в коефіцієнті  $\lambda$  є складова  $\lambda_0$  яка визначається параметром ступеню підвищення тиску  $\varepsilon$ . Тобто:

$$\lambda_0 = 1 - \xi \cdot \left( \varepsilon^{\frac{1}{m}} - 1 \right) \quad (1.3)$$

де  $\varepsilon$  – відношення кінцевого тиску до початкового, тобто:

$$\varepsilon = \frac{P_2}{P_1} \quad (1.4)$$

де  $P_1$  це атмосферний тиск;

$P_2$  це кінцевий тиск компресору.

Тобто продуктивність реального компресора залежить від атмосферного тиску. А як відомо, то атмосферний тиск залежить від висот над рівнем моря. Тому, по можливості, радять розташовувати компресорні станції в найнижчих точках ділянок на яких можливо їх розташування.

### **1.3 Технічні характеристики поршневого компресору ВПЗ-20/9.**

Повітряний компресор ВПЗ-20/9 є доволі поширеним агрегатом на підприємствах. Він відноситься до компресорів низького тиску загального призначення. Це двопоршневий двоступеневий компресор який побудований по кутовій L-образній схемі, який приводиться в дію одношвидкісним електродвигуном. Має водяне охолодження поршнів. На рисунку 1.3 наведена загальна схема конструкції компресору.

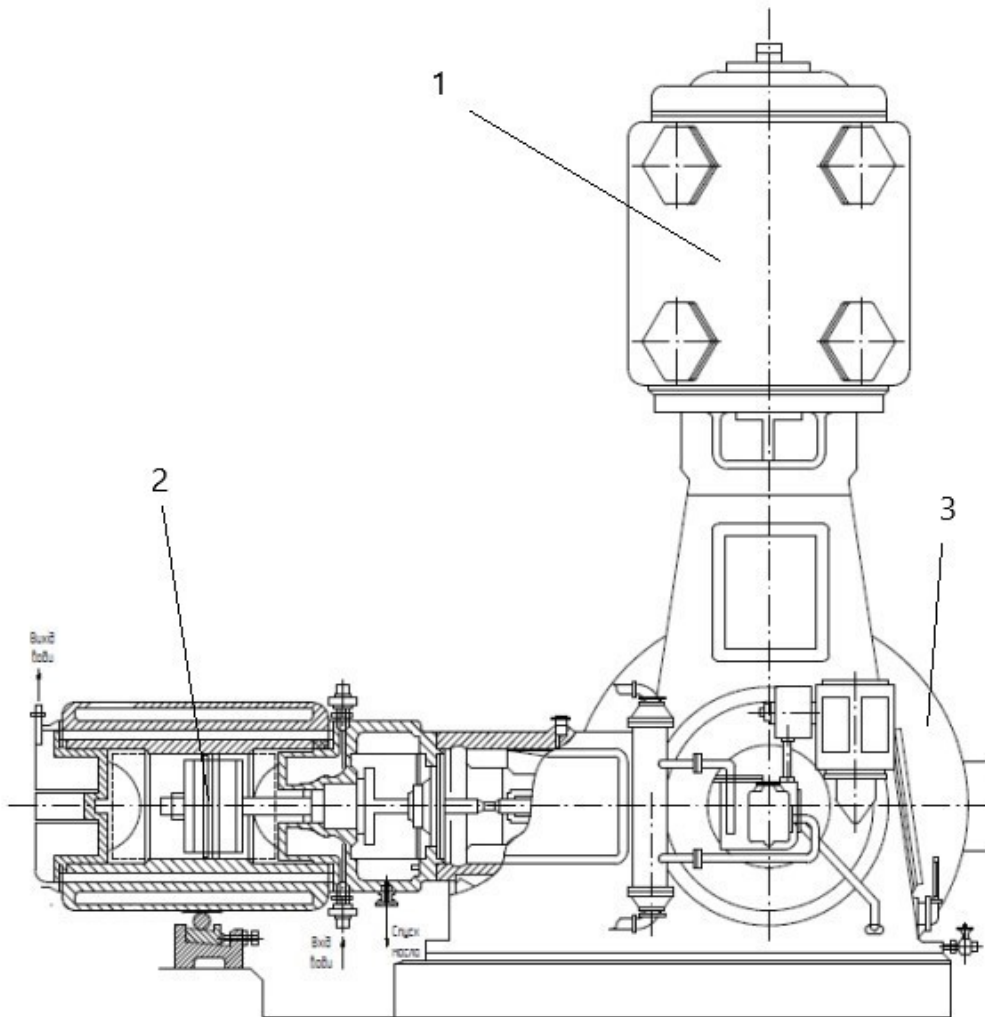


Рисунок 1.3 – Загальна конструкція компресору ВПЗ-20/9

1 – Циліндр першого ступеню; 2 – циліндр другого ступеню; 3 – електродвигун.

В таблиці 1.1 наведені основні технічні характеристики компресору

Компресор призначений для встановлювання в приміщеннях що опалюються, та в яких температура не знижується нижче ніж  $+2^{\circ}\text{C}$ . Це викликано наявністю води в системі охолодження компресору.

Таблиця 1.1 – основні параметри компресору ВПЗ-20/9.

| Параметр та одиниці вимірювання                                  | Значення           |
|--|--------------------|
| Об'ємна продуктивність, м <sup>3</sup> /сек (м <sup>3</sup> /хв) | 0,367+20% (20+20%) |
| Початковий тиск  | Атмосферний        |
| Кінцевий тиск, МПа (кгс/см <sup>2</sup> )                        | 0,78 (8,0)         |
| Кількість поршнів  | 2                  |
| Кількість ступенів   | 2                  |
| Діаметр поршню 1 ступеня, мм                                     | 400                |
| Діаметр поршню 2 ступеня, мм                                     | 250                |
| потужність компресору, кВт                                       | 116                |
| ККД компресору, %  | 80                 |
| Частота обертів колінчастого валу, об/хв                         | 740                |
| Напруга мережі живлення, В                                       | 380                |
| Частота мережі живлення, Гц                                      | 50                 |
| Регулювання обертів  | Ступінчасте        |
| Габаритні розміри, мм  | 2370x1620x2230     |
| Вага, кг   | 4700               |

Компресор змонтований на литій чавунній рамі, яка монтується на підготовлений фундамент. На отворі для всмоктування зовнішнього повітря розташований фільтр для очищення від бруду повітря що поступає до поршню першого ступеня. Також, між першим та другим ступенем повітря проходить через охолоджувач, для зниження його температури після стиснення першим поршнем, та через масло та волого відділювача. Після другого ступеню повітря охолоджується кінцевим охолоджувачем та направляється до повітрозбірнику, з якого вже надходить до мережі повітропостачання.

#### 1.4 Характеристики електроприводу компресору ВПЗ-20/9.

На електродвигуни які приводять в дію компресорні установки, накладається низка вимог. В нашому випадку це по-перше живлення від трифазної мережі 380 В 50 Гц. Можливість видавати високий крутний момент на валу ротора. Як ми бачимо

з таблиці 1.1, в базовій конструкції компресору, передбачене лише ступінчасте регулювання обертів двигуна. Що накладає багато обмежень на зміну продуктивності установки і відповідно на її енергоефективність.

Також слід зауважити, що базова схема включення електродвигуна має релейно-контакторне виконання за схемою «прямий пуск», що призводить до значних пускових струмів які перевищують номінальний струм двигуна в середньому у 7 разів. І якщо на електродвигунах невеликої потужності (одиниці кВт) такі сплески пускових струмів можуть бути непомітними, хоча вони все одно присутні і при великій кількості таких двигунів вже вносять великі перешкоди до мережі живлення, то у електродвигунів потужністю десятки кВт пускові струми можуть призвести навіть до виходу з ладу супутнього чутливого обладнання, вартість якого може перевищувати в декілька разів вартість компресору.

Звісно є різні шляхи зменшення пускових струмів електродвигунів. Один з таких шляхів, це поступове переключення електродвигуна зі схеми «зірка» на схему «трикутник». Цей метод дозволяє знизити пусковий струм двигуна майже у 3 рази, але при цьому також зменшується і обертальний момент на валу електродвигуна, що може призвести до того, двигун не зможе привести в дію корисне навантаження то якого він під'єднаний.

На сьогоднішній день, діапазоні потужностей до 300 кВт дуже гарно себе зарекомендували асинхронні електродвигуни із короткозамкненим ротором. При високому значенні потужності та ккд вони мають невеликі габарити та ціну у порівнянні з тими ж синхронними двигунами, які мають значно більшу вагу та коштують іноді до 3 раз дорожче.

В наступному розділі ми розрахуємо електричні та механічні параметри, за якими виберемо асинхронний електродвигун із короткозамкненим ротором із серії АІР. Асинхронні двигуни цієї серії приходять на заміну таким вже застарілим серіям як 4А, 4АМ, 5А та іншим. Ці серії вже виготовляються і на ринку України представлені здебільшого ремонтні екземпляри. В багатьох випадках, електродвигуни цих серій вже відпрацювали свій ресурс та підлягають заміні.

Також слід брати до уваги, що електродвигун, який приводить в дію компресорну установку, працює у довготривалому режимі без частих відключень, тобто у типовому режимі S1.

## 2 РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА

### 2.1 Вимоги до устаткування компресорної станції.

Як було зазначено вище, компресор ВПЗ-20/9 належить до машин загального призначення. Тим не менш треба провести розрахунки для того щоб правильно вибрати для неї електродвигун який буде задовольняти технічним вимогам, а також буде ефективним.

Знову ж зазначимо, що в базовій конфігурації передбачається лише ступінчасте регулювання обертів двигуна, шляхом змінення напруги на обмотках статора та ротора. Цей метод не є ефективним через свою енергозатратність а також через те що такий метод негативно впливає на механічні характеристики двигуна, особливо на його обертальний момент. Відповідно треба пам'ятати що такий метод регулювання, через свою недосконалість, не забезпечує точність регулювання обертів, що впливає на вихідні характеристики компресору.

В рамках цієї роботи ми розглянемо можливість застосування частотного регулювання обертів двигуна. На сьогоднішній день це найперспективніша та найефективніша технологія керування електродвигунами.

Після модернізації системи керування електроприводу компресорної установки будуть досягнені наступні параметри;

- Діапазон плавного регулювання обертів  $n_{OB} =$  від 500 до 750 об/хв;
- Точність регулювання обертів  $\Delta n_{OB} \leq 5\%$ .
- Можливість оперативного дистанційного керування параметрами електродвигуна.

В принципі, сучасні перетворювачі частоти дозволяють регулювати оберти починаючи з одиниць об/хв, але треба пам'ятати, що при відмінності частоти обертання більше ніж на 35% значно знижується охолодження від вбудованої крильчатки, тобто погіршуються температурні режими роботи. Тому нижній ліміт обертів ми приймаємо за 500 об/хв.

Також треба враховувати те що компресорна установка є машиною із підвищеним рівнем шуму, понад 90 дБа. Тобто заборонено знаходження в приміщенні де вона розташована, а при використанні засобів індивідуального захисту органів слуху час знаходження в приміщенні обмежений однією годиною. Тому можливість дистанційного моніторингу та керування значно полегшує роботу операторів та дозволяє задіювати сучасні АСУ ТП.

## 2.2 Розрахунок параметрів двигуна.

Щоб правильно вибрати електродвигун для компресорної установки, необхідно розрахувати потужність яку необхідно підвести до валу компресора. Для цього скористуємося формулою:

$$P_{\text{дв.р.}} = \frac{K_3 \cdot Q \cdot A}{1000 \cdot \eta_K \cdot \eta_n} \quad (2.1)$$

де  $K_3$  – це коефіцієнт запасу який приймають рівним 1,1;

$Q$  – продуктивність компресору у м<sup>3</sup>/с, з таблиці 1.1 беремо  $Q = 0,367$  м<sup>3</sup>/с;

$\eta_K$  – ккд компресора, з таблиці 1.1  $\eta_K = 0,8$

$\eta_n$  – ккд передачі, для прямої передачі  $\eta_n = 0,95$

$A$  – робота по стисканню повітря до заданого тиску,  $A = 240 \cdot 10^3$  Дж/м<sup>3</sup>.

Можна розрахувати цей показник бо він є функцією від кінцевого тиску  $P_2$   $A = f(P_2)$ , але ми скористуємося довідниковими даними, бо це значення ш доволі поширене і розрахунки для нього вже проведені.

Отже підставивши ці значення до формули (2.1) отримаємо:

$$P_{\text{дв.р.}} = \frac{1.1 \cdot 0.367 \cdot 240 \cdot 1000}{1000 \cdot 0.8 \cdot 0.95} = 127,5 \text{ кВт}$$

Виходячи з цих розрахунків, потужність електродвигуна повинна бути не меншою за 127,5 кВт. В серії АІР, найближчими за параметром потужності є двигуни розраховані на потужність 132 кВт. Якщо взяти до уваги частоту обертання, то варто вибрати асинхронний двигун із короткозамкненим ротором розрахований на роботу в довготривалому режимі S1, а саме АІР355S8У3. Технічні характеристики цього двигуна наведені в таблиці 2.1.

Маркування двигуна АІР355S8У3 має наступне значення:

АІР - серія асинхронних електродвигунів;

355 - габарит двигуна, висота вісі одертання, мм;

S – Виконання довжини сердечника;

8 – кількість полюсів, відповідає частоті обертання 750 об/хв;

У3 – кліматичне виконання "помірний клімат" згідно ГОСТ 15150-69.

Двигун має ступінь захисту ІР55 від потрапляння пилу та крапель води.

Таблиця 2.1 – технічні характеристики двигуна АІР355S8У3.

| Параметр  | Значення  |
|---|-----------|
| Потужність $P_{НОМ}$ , кВт                              | 132       |
| Частота обертання фазова $n_0$ (фактична $n_H$ ), об/хв | 750 (740) |
| ККД $\eta$ , %  | 93,7      |
| Коефіцієнт потужності, $\cos \varphi$                   | 0,82      |
| Співвідношення обертальних моментів, $M_{П}/M_H$        | 1,8       |
| Співвідношення обертальних моментів, $M_{МАКС}/M_H$     | 2,0       |
| Співвідношення струмів $K_I$ , $I_{П}/I_H$              | 6,4       |
| Робочий струм $I_H$ , А                                 | 261       |
| Момент інерції $J$ , кгм <sup>2</sup>                   | 7,9       |
| Рівень шуму, дБ(А)                                      | 90        |
| Вага, кг  | 2000      |

### 2.3 Побудова механічної характеристики.

Для побудову графіку механічної характеристики електродвигуна необхідно побудувати залежність частоти обертання ротору двигуна від його обертального моменту. Одним з методів для цих розрахунків є застосування формули Клосса, яка описує залежність обертального моменту  $M$  від ковзання:

$$M = \frac{2M_{\text{МАКС}}}{\frac{S_{\text{НОМ}}}{S_K} + \frac{S_K}{S_{\text{НОМ}}}} \quad (2.2)$$

де  $M_{\text{МАКС}}$  – максимальний обертальний момент;

$S_{\text{НОМ}}$  – номінальне значення ковзання;

$S_K$  – критичне значення ковзання.

Визначимо такі необхідні для цієї формули параметри як номінальну активну потужність двигуна, номінальний, максимальний та пусковий моменти, а також номінальне та критичне ковзання.

Номінальна активна потужність розраховується за формулою:

$$P_{\text{АНОМ}} = \frac{P_{\text{НОМ}} \cdot 1000}{\eta_{\text{НОМ}}} \quad (2.3)$$

де  $P_{\text{НОМ}}$  – номінальна потужність двигуна,  $P_{\text{НОМ}} = 132$  кВт;

$\eta_{\text{НОМ}}$  – номінальний ккд двигуна,  $\eta_{\text{НОМ}} = 0,937$ .

$$P_{\text{АНОМ}} = \frac{132 \cdot 1000}{0,937} = 140,9 \text{ кВт}$$

Для знаходження номінального моменту скористаємося наступною формулою:

$$M_H = 9550 \cdot \frac{P_{\text{НОМ}}}{n_H} \quad (2.4)$$

де  $n_H$  – це фактична номінальна частота обертання ротору,  $n_H = 740$  об/хв.

$$M_H = 9550 \cdot \frac{132}{740} = 1680 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

Використовуючи коефіцієнти відношень моментів розрахуємо максимальний та пусковий моменти.

$$M_{II} = K_{II} \cdot M_H \quad (2.5)$$

$$M_{МАКС} = K_M \cdot M_H \quad (2.6)$$

де  $K_{II}$  – коефіцієнт співвідношення пускового моменту до номінального моменту,  $K_{II} = 1,8$ ;

$K_M$  – коефіцієнт співвідношення максимального моменту до номінального моменту,  $K_M = 2,0$ .

$$M_{II} = 1,8 \cdot 1680 = 3024 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

$$M_{МАКС} = 2,0 \cdot 1680 = 3360 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

Далі розрахуємо значення номінального та критичного ковзання:

$$S_{НОМ} = \frac{n_0 - n_H}{n_0} \quad (2.7)$$

де  $n_0$  – це фазова частота обертання ротора, яка залежить від кількості пар полюсів електродвигуна і знаходиться за наступною формулою:

$$n_0 = \frac{60 \cdot f}{p} \quad (2.8)$$

де  $f$  - частота змінного струму мережі живлення,  $f = 50$  Гц;

$p$  – кількість пар полюсів,  $p = 4$ .

Тоді для  $n_0$  маємо значення:

$$n_0 = \frac{60 \cdot 50}{4} = 750 \text{ об/хв.}$$

Тоді для номінального ковзання отримаємо значення:

$$S_{НОМ} = \frac{750 - 740}{750} = 0,0133$$

Вираз для знаходження значення критичного ковзання має вид:

$$S_K = S_{НОМ} \cdot (K_M + \sqrt{K_M^2 - 1}) \quad (2.9)$$

Тобто:

$$S_K = 0,0133 \cdot (2 + \sqrt{2^2 - 1}) = 0,0498$$

Також скористуємося формулою залежності частоти обертання ротору від ковзання:

$$n = n_0 \cdot (1 - S) \quad (2.10)$$

Тепер для декількох значень  $S$  в інтервалі від 0 до 1, за допомогою формул (2.2) та (2.10) розрахуємо значення обертового моменту  $M$  та частоти обертання ротору  $n$  і занесемо ці дані до таблиці 2.2, за якою потім побудуємо графік механічної характеристики.

Таблиця 2.2 – залежність обертів від моменту

|          |     |        |        |        |        |        |        |        |        |        |       |       |
|----------|-----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|
| S        | 0   | 0,0133 | 0,02   | 0,03   | 0,04   | 0,0498 | 0,06   | 0,08   | 0,1    | 0,2    | 0,5   | 1     |
| n, об/хв | 750 | 740    | 735    | 728    | 720    | 713    | 705    | 690    | 675    | 600    | 375   | 0     |
| M, Нм    | 0,0 | 1675,2 | 2324,0 | 2970,3 | 3280,9 | 3360,0 | 3302,5 | 3014,9 | 2681,5 | 1575,6 | 662,7 | 333,8 |

Скористувавшись цими даними побудуємо графічну механічну характеристику двигуна рис. 2.1

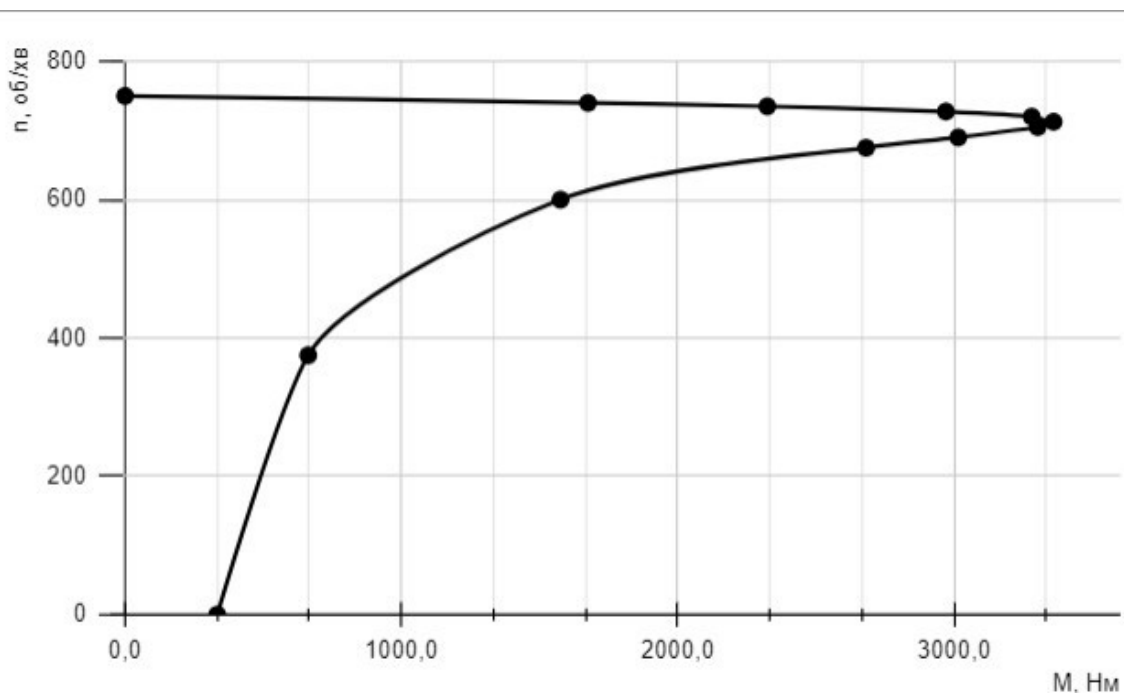


Рисунок 2.1 – Механічна характеристика електродвигуна AIP355S8U3.

#### 2.4 Лінія живлення та її параметри.

Для повноцінного функціонування електроприводу і в цілому компресорної установки, треба забезпечити надійне живлення електроенергією. Електроенергія, до електродвигуна, подається по проводах із мідними або алюмінієвими жилами. Але слід відповідально ставитися до вибору електропроводу, а особливо до значення перетину його жил. Так при недостатньому перетині жил проводу, при великому навантаженні, може відбутися оплавлення ізоляції, що призведе до пожежі. Так само занадто велике значення перетину жил кабелю живлення, збільшує фінансові витрати а також може призвести до виходу з ладу або електродвигуна, або захисного обладнання.

Далі ми проведемо розрахунки параметрів лінії живлення виходячи з напруги живлення електродвигуна та його номінального робочого струму.

Для початку розрахуємо номінальний робочий струм електродвигуна. Зробимо це скориставшись формулою:

$$I_{НОМ} = \frac{P_{НОМ}}{\sqrt{3} \cdot U_{НОМ} \cdot \cos \varphi \cdot \eta} \quad (2.11)$$

Дані які необхідно підставити у цю формулу беремо з таблиці 2.1

Для нашого двигуна це:

$$P_{НОМ} = 132 \text{ кВт};$$

$$\cos \varphi = 0,82;$$

$$\eta = 93,7 \%$$

$$U_{НОМ} = 380 \text{ В.}$$

Тоді отримаємо:

$$I_{НОМ} = \frac{132000}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,82 \cdot 0,937} = 261,02 \text{ А.}$$

Отже ми отримали розрахункове значення  $I_{НОМ} = 261,02 \text{ А}$ , яке збігається із значенням заявленим виробником електродвигуна.

Також при виборі величини перетину жил кабелю, треба враховувати показник допустимого тривалого струму  $I_{ДТР}$  для даного кабелю. Дізнатися значення  $I_{ДТР}$  можна із довідникової літератури.

При цьому повинна виконуватись умова:

$$I_{ДТР} \geq I_{ЗВ} \cdot K_3 \quad (2.12)$$

де  $I_{ЗВ}$  – це струм захисного вимикача;

$K_3$  – коефіцієнт захисту, який дорівнює 1.

Прийmemo значення  $I_{ЗВ} = 300 \text{ А}$ , а перетин жил кабелю виберемо  $150 \text{ мм}^2$ . Для цього перетину допустимий довготривалий струм дорівнює  $I_{ДТР} = 320 \text{ А}$  і умова (2.12) виконується. Тобто:

$$320 \text{ А} \geq 300 \text{ А.}$$

Можна зробити висновок, що за параметрами струмових навантажень вибір перетину жил кабелю у  $150 \text{ мм}^2$  зроблений вірно.

Також необхідно перевірити вибраний нами кабель на допустимі втрати напруги, які не повинні перевищувати значення  $\Delta U_{ДВ}$  5%, тобто:

$$\Delta U_{ДВ} \geq \Delta U_{РВ} \quad (2.13)$$

де  $\Delta U_{РВ}$  – розрахункові втрати напруги на лінії живлення.

Значення  $\Delta U_{РВ}$  визначається за формулою:

$$\Delta U_{РВ} = \frac{\sqrt{3} \cdot I_{НОМ} \cdot l \cdot (r_0 \cdot \cos \varphi + x_0 \cdot \sin \varphi)}{U_{НОМ}} \cdot 100\% \quad (2.14)$$

де  $I_{НОМ}$  – струм електродвигуна з табл. 2.1,  $I_{НОМ} = 261$  А;

$l$  – довжина лінії живлення,  $l = 20$  м;

$r_0$  – активний погонний опір кабелю заданого перетину,  $r_0 = 0,124$  Ом/км;

$\cos \varphi$  – значення коефіцієнту потужності двигуна з табл. 2.1,  $\cos \varphi = 0,82$ ;

$x_0$  – реактивний погонний опір кабелю заданого перетину,  $x_0 = 0,059$  Ом/км;

$U_{НОМ}$  – номінальна напруга живлення електродвигуна,  $U_{НОМ} = 380$  В.

$\sin \varphi = 0,57$ .

Підставивши ці значення до формули (2.14) отримаємо:

$$\Delta U_{РВ} = \frac{\sqrt{3} \cdot 265,5 \cdot 0,05 \cdot (0,124 \cdot 0,82 + 0,059 \cdot 0,57)}{380} \cdot 100 = 0,817 \%$$

Отже умова (2.13) виконується.

За результатами розрахунків по втратам напруги та струмовим навантаженням можна зробити висновок що кабель з перетином мідної жили у  $150\text{мм}^2$  вибраний вірно і забезпечить надійне живлення електроприводу компресору ППЗ-20/9.

## 2.5 Обладнання захисту та включення електродвигуна.

Неможливо під'єднати електродвигун одразу до мережі живлення. Це треба робити за допомогою захисного обладнання, та засобів керування пуском та

зупинкою електродвигуна. Так для захисту мережі живлення та двигуна від струмів короткого замикання використовують автоматичні вимикачі, а для захисту від струмів довготривалого перевантаження слід також використовувати так електроструміві реле, які ще називають тепловими. В класичних, релейно-контакторних схемах включення, для керування пуском та зупинкою електродвигуна застосовують магнітні пускачі які також називають контакторами.

Параметри захисного обладнання повинні відповідати характеристикам електродвигуна, для того щоб запобігати виходу його з ладу а також не мати ложних спрацьовувань. Проведемо розрахунки для правильного вибору обладнання.

Спочатку розрахуємо параметри автоматичного вимикача.

Основними параметрами автоматичного вимикача є:

$I_{НАВ}$  – номінальний струм автоматичного вимикача;

$I_{РОЗ}$  – струм розчеплення;

$I_{МСР}$  – струм миттєвого спрацьовування.

Струм розчеплення знайдемо по формулі:

$$I_{РОЗ} = \frac{I_{ДТ}}{K_T} \quad (2.15)$$

де  $I_{ДТ}$  – довготривалий струм с лінії;

$K_T$  – температурний коефіцієнт,  $K_T = 0,85$ .

Для визначення  $I_{ДТ}$  скористаємося формулою:

$$I_{ДТ} = \frac{P_H}{U_H \cdot \sqrt{3} \cdot \cos\varphi \cdot \eta_D} \quad (2.16)$$

де  $P_H$  – номінальна потужність двигуна,  $P_H = 132$  кВт;

$U_H$  – номінальна напруга живлення,  $U_H = 380$  В;

$\cos\varphi$  – коефіцієнт потужності двигуна,  $\cos\varphi = 0,82$ ;

$\eta_D$  – ккд двигуна,  $\eta_D = 0,937$ .

Отримаємо значення  $I_{ДТ} = 261$  А

Тоді для  $I_{РОЗ}$  маємо:

$$I_{РОЗ} = \frac{261}{0,85} = 307 \text{ А.}$$

Для визначення струму миттєвого спрацьовування  $I_{МСП}$  треба виконання наступної умови:

$$I_{МСП} \geq K \cdot I_{КЧ} \quad (2.17)$$

де  $K$  – коефіцієнт неточності, який для струмів понад 100 А становить 1,25;

$I_{КЧ}$  – максимальний короткочасний струм, який дорівнює  $I_{ПУСК}$ .

Отже:

$$I_{МСП} \geq 1,25 \cdot 1670 = 2088 \text{ А.}$$

Під ці параметри вибираємо автоматичний вимикач фірми EATON NZMN3-A320, який має наступні характеристики:

Регульований струм розчеплення  $I_{РОЗ}$  в діапазоні 260...320 А;

Струм миттєвого спрацьовування  $I_{МСП} = 3000$  А

При виборі магнітного пускача беремо до уваги робочий струм двигуна  $I_{НОМ} = 261$  А, тобто повинна виконуватись умова:

$$I_{МП} \geq I_{НОМ} \quad (2.18)$$

Виберемо магнітний пускач словенської фірми ETI – CES 300.22 230V AC, який розрахований на роботу із струмами навантаження до 300 А. Отже умова (2.18) виконується.

Залишається вибрати лише електрострумове теплове реле. Ці реле характеризуються діапазоном робочих струмів. Тобто це діапазон, за межами якого

будуть спрацьовувати захисні механізми цього пристрою. При виборі теплового реле також слід орієнтуватися на номінальний робочий струм двигуна, тобто значення  $I_{НОМ}$  повинно лежати в межах діапазону робочих струмів реле:

$$I_{МИНР} \leq I_{НОМ} \leq I_{МАКСР} \quad (2.19)$$

Знову звернемося до асортименту словенської фірми ETI і виберемо теплове реле RE 317.D-310, яке має діапазон робочих струмів  $I_{МИНР} \dots I_{МАКСР}$  200...310 А, а також конструктивно призначене для роботи із обраним раніше нами магнітним пускачем.

На основі того, що виконуються обидві умови (2.18) та (2.19) ми робимо висновок що вибір моделей захисного обладнання зроблений приавильно.

## **2.6 Схеми включення двигуна.**

В попередньому розділі ми підібрали захисне комутаційне обладнання. Тепер побудуємо на його основі класичну релейно-контакторну схему включення електродвигуна, рис 2.2.

При замиканні контактів автоматичного вимикача Q1 відбувається подача напруги однієї з фаз на схему керування. При натисканні нормально розімкненої SB2 замикається ланцюг і струм починає протікати через котушку K1 магнітного пускача. Котушка K1 замикає робочі контакти пускача K1.1, та один з додаткових контактів K1.2 який включений паралельно кнопці SB2. Так, при відпусканні кнопки SB2 струм продовжує протікати через контакт K1.2 і котушка K1 залишається під напругою утримуючи замкненими також контакти K1.1 через які подається напруга на асинхронний двигун АД1 і відбувається його пуск.

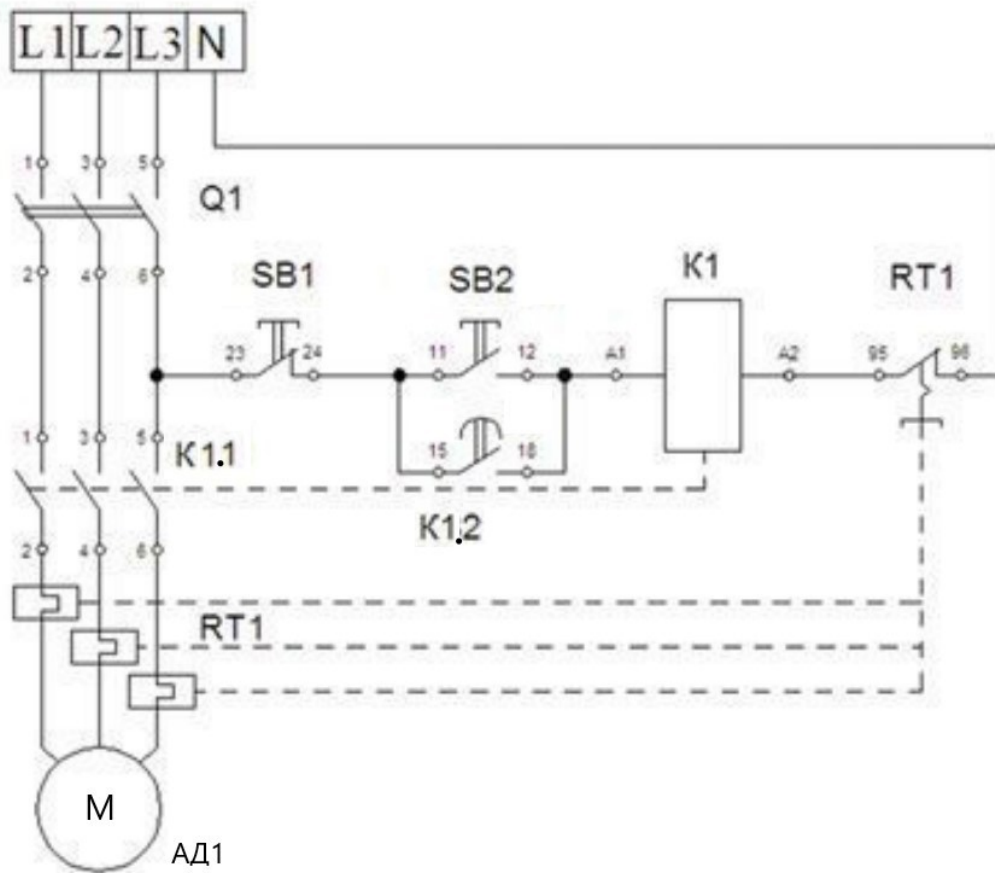


Рисунок 2.2 – релейно-контакторна схема включення електродвигуна.

Для зупинки двигуна слугує нормально замкнена кнопка SB1. При її натисканні відбувається розмикання її контактів і через це знеструмлення котушки магнітного пускача K1, яка перестає утримувати контакти K1.1 та K1.2 котрі розмикаються і тим самим знімають напругу з електродвигуна.

Також, при включеній схемі, може відбутись спрацьовування теплового реле RT1 яке, при виході значень струму за його робочий діапазон, розмикає контакт RT1 в наслідок чого також відбувається знеструмлення котушки K1 і відповідно розмикання контактів K1.1 і K1.2. що також призводить до зняття напруги з електродвигуна.

Слід зазначити, що при такій схемі включення електродвигуна, в момент його пуску, відбувається стрибок струму в мережі живлення до значення  $I_{пуск}$ , яке для

двигуна АІР355S8У3 становить 1680 А. Такі великі значення різкого підвищення струму в мережі дуже негативно впливають на інше обладнання яке живиться від тої самої ділянки електромережі. При цьому відбувається значне зниження напруги в мережі яке може призводити до зміни режиму роботи та порушенню технологічних процесів, що у свою чергу може призвести до збитків через брак готової продукції.

Тому, дедалі частіше для включення і керування електродвигунами застосовують перетворювачі частоти.

## **2.7 Перетворювач частоти та його переваги.**

Пусковий струм для схеми керування з прямим пуском електропривода компресора повітря розраховується так:

$$I_{\text{ПУСК}} = K_{\text{П}} \cdot I_{\text{НОМ}} = 6,4 \cdot 261 = 1670 \text{ А.}$$

Прямий пуск провокує суттєве зниження напруги у внутрішній мережі електропостачання. Через це виникають деякі проблеми. Наприклад, знижується пусковий момент двигуна та моменту обертання вже під час його роботи. Крім того, може зменшуватись яскравість освітлення під час пуску та роботи.

Є рекомендація для двигунів потужністю від 15 кВт - використовувати схему пуску, де обмотки фаз статора з'єднуються зіркою і далі переключаються на трикутник. Така схема дозволяє зменшувати пусковий струм двигуна в 1.7 рази. Також пускова потужність зменшиться в три рази, але треба враховувати, що й пусковий момент буде зменшений також в три рази.

Хоч така схема пуску двигунів ефективніша за варіант прямого пуску, але вона також не ідеальна і так само призводить до зниження напруги у внутрішній мережі електропостачання. В свою чергу це також призводить до того, що пусковий момент привода і момент обертання під час роботи будуть знижуватись, а освітлювальні прилади світитимуть з меншою яскравістю. Але ці проблеми будуть значно менше вираженими.

Завдяки використанню спеціальних пристроїв для плавного запуску двигуна, можна буде не хвилюватися за зменшення пускового струму, але в цьому випадку зникне змога регулювати частоту обертання та контролювати роботу агрегату.

Використання перетворювачів в порівнянні з пристроями плавного запуску двигунів, буде дещо дорожчим (на 20-30% для однакової потужності). Але перетворювачі все ж можуть дати значно більше можливостей для керування агрегатом, в які також входить і плавний запуск двигуна. Крім цього можна ще керувати швидкістю обертання і запускати та зупиняти привід. Не менш важливим є забезпечення захисту двигуна від коротких замикань та перевантажень. ПЧ навіть може заблокувати роботу двигуна при зниженні опору ізоляції обмоток двигуна. І це не всі можливості перетворювачі.

Замкнуті схеми керування зі зворотнім зв'язком за частотою обертання робочого органу можуть забезпечувати точність підтримки швидкості обертання від  $\Delta n = 0,5-1,0\%$  до  $\Delta n = 2-5\%$ .

Відповідно до технічного завдання, вимоги до точності підтримки швидкості обертання валу становлять  $\Delta n = 5,0\%$ . В такому випадку, для наших потреб можна використовувати перетворювач частоти без внутрішнього регулятора.

В асинхронному двигуні перетворювач може забезпечити роботу привода з коефіцієнтом потужності більше 0,95. Тобто, завдяки використанню перетворювача частот не знадобиться використовувати тут додаткову індивідуальну установку, що компенсуватиме реактивну потужність двигуна.

Використання перетворювача частоти дозволить не лише регулювати частоту обертання привода, що підвищить ККД, а ще й дозволить знизити витрати електроенергії за весь період роботи агрегату.

Перетворювачі, що дозволяють плавно регулювати швидкість обертання ротора двигуна займають особливе місце в системах управління електроприводами змінного струму. Завдяки поступовому розгону двигуна та відсутності пускових струмів, їх можна використовувати у складі приводів з високими вимогами до динаміки та перевантаження (сепаратори, гомогенізатори, підйомники, ліфти).

Завдяки забезпеченню високого значення ккд в двигунах, ПЧ виконує ще й функцію енергозбереження навіть при значних змінах навантаження. Також перетворювач може захистити агрегат від замикання, перевантаження, обриву чи перекосу фаз. А додаткові вбудовані інтерфейси дозволяють інтеграцію та використання їх в будь-якій системі автоматичного керування. Також існують спеціальні компактні модулі, що в складі вже мають асинхронний двигун та перетворювач, що значно спрощує їх інтеграцію на виробництві.

Перетворювач частоти необхідний для перетворення електричної енергії, і є два основних типи таких пристроїв. Перший - з безпосереднім зв'язком. Другий - із проміжним контуром постійного струму.

У першого типу перетворювачів вихідна напруга синусоїдальної форми формується з ділянок синусоїд вхідної напруги. Максимальне значення вихідної частоти, в цьому випадку, не може дорівнювати частоті мережі живлення. На виході частота в такому перетворювачі зазвичай буда в діапазоні від 0 до 25-33 Гц. ПЧ такого типу широко не використовуються.

А перетворювачі частоти другого типу, що мають проміжний контур постійного струму та виконані на базі інверторів напруги, можна зустріти значно частіше. Розглянемо структурну схему такого ПЧ на рис. 2.3.

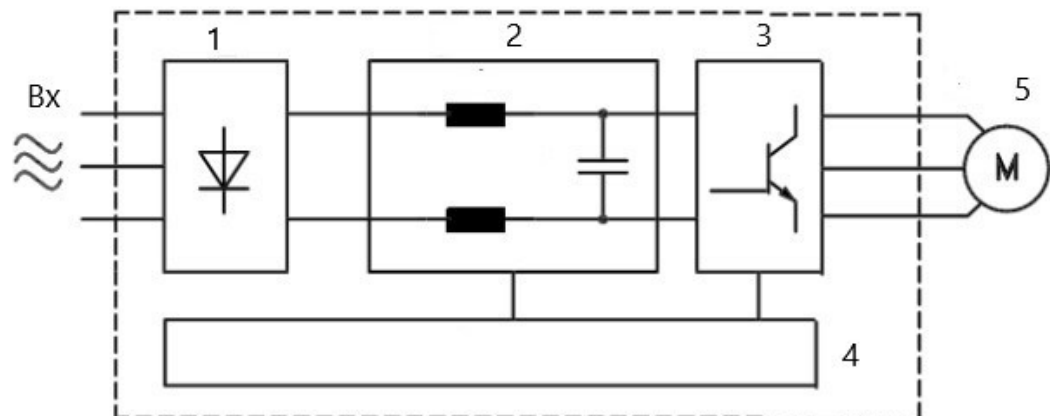


Рисунок 2.3 – Функціональна схема перетворювача частоти (ПЧ) із проміжним контуром постійного струму.

Вх – вхідна напруга 380 В 50 Гц; 1 – вбудований випрямляч; 2 – ЕМС фільтр; 3 – керований інвертор; 4 – модуль керування інвертором; 5 – електродвигун яким здійснюється керування.

Принцип роботи такого перетворювача полягає в тому, що змінна напруга мережі перетворюватиметься у постійну напругу. За це відповідає діодний випрямляч. Далі сигнал згладжується у проміжному колі індуктивно-ємнісним фільтром. Інвертор же, який зазвичай виконаний на основі IGBT-модулів, забезпечує зворотне перетворення із постійного струму в змінний. Це дозволяє формувати вихідний сигнал із необхідними показниками напруги та частоти. Найчастіше в інверторі використовується метод широтно-імпульсної модуляції (ШІМ). Завдяки цьому, вихідний сигнал перетворювача буде мати вигляд послідовності імпульсів напруги постійної амплітуди та змінної тривалості. Обмотка статора відповідає за індуктивне навантаження та формує струм синусоїдальної форми, як на рис. 2.4. Такі рішення дозволяють регулювати частоту від 0 до декількох тисяч герц.

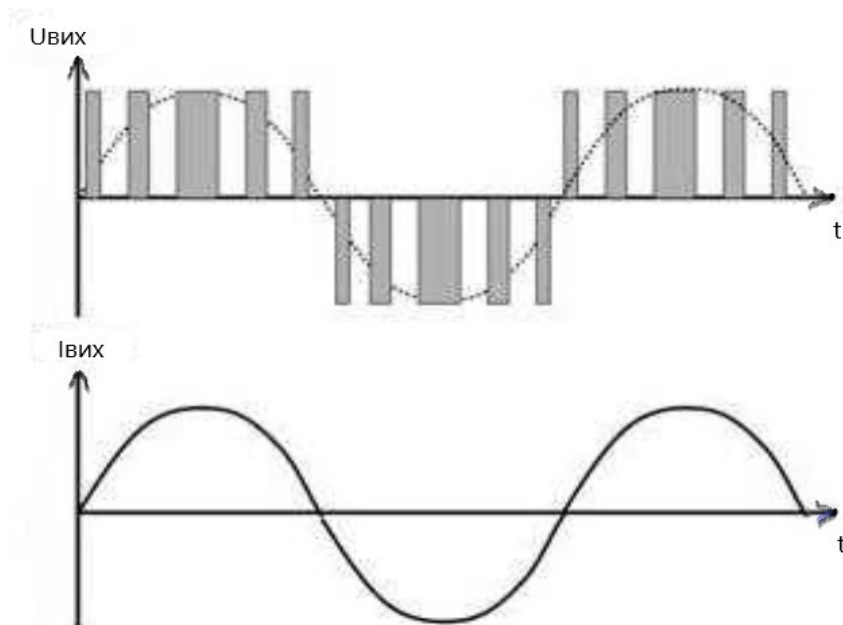


Рисунок 2.4 – Вихідні сигнали перетворювача частоти:

Uвих – напруга; Iвих – струм.

Типи навантажень. Основні вимоги до електропривода - це діапазон швидкостей та тип навантаження. Важливо враховувати, що залежність між швидкістю обертання та моментом опору неоднакова для навантажень різного типу. Найчастіше навантаження мають постійний момент у всьому діапазоні змін швидкості. До таких, наприклад, можна віднести компресори, насоси та конвеєри.

Змінна механічна характеристика характеризує інший вид навантаження, для котрої момент навантаження зростає зі збільшенням швидкості обертання ротора. Пристрої, що записуються рівнянням квадратичної параболи та у яких потужність пропорційна кубу швидкості обертання відносяться до цього типу навантаження. Це, наприклад, вентилятори та відцентрові насоси. Принцип їх роботи такий, що навіть незначне зниження швидкості привода може давати значний приріст у потужності. Тобто, економія електроенергії буде максимально при використанні керованого електропривода. За скромними підрахунками, всього 10% зниження швидкості може давати зрість в економії потужності до 30%.

Режими керування електродвигуном. Характер навантаження впливає на те, який режим керування двигуном буде обрано за допомогою перетворювача частоти, що реалізувати залежність між швидкістю обертання ротора та вихідною напругою. Більш прості ПЧ використовуються для режимів з лінійною залежністю між напругою та частотою ( $U/f = \text{const}$ ), так як можуть забезпечувати постійний момент навантаження а також можуть керувати синхронними двигунами, що підключаються паралельно. Однак такий вибір перетворювача може приводити до того, що зменшення частоти на якомусь етапі знизить й максимальний момент двигуна. Щоб це виправити, у ПЧ передбачена функція підвищення початкового значення вихідної напруги, яка компенсуватиме зниження моменту для навантажень з постійним моментом. Також ця функція може збільшувати початковий момент для навантажень з високим пусковим моментом. Щоб регулювати приводи насосів чи вентиляторів, використовують квадратичну залежність напруга/частота ( $U/f^2 = \text{const}$ ). Такий режим, як і попередній, може застосовуватись для двигунів, що підключаються паралельно.

Способи гальмування електропривода. Швидка зупинка механізму, що працює за рахунок обертання електродвигуна, можливо за допомогою як механічного, так і електричного гальмування. В нашому випадку цікавить саме електричний спосіб. Його суть полягає в тому, що машина в період гальмування змінює режим з двигунного, на генераторний. Це, в свою чергу, створює електромагнітний момент, що направлений у в протилежну сторону від обертання ротора. Так і відбувається гальмування.

Ще один найпростіший спосіб зупинки агрегату - це просте відключення його від електричної мережі. Завдяки цьому, двигун зупиниться сам за інерцією. Але час зупинки неможливо буде регулювати, бо визначатиметься він лише інерційними властивостями двигуна та його навантаженням.

Генераторний спосіб гальмування забезпечує можливість регулювати час зупинки чи сповільнення. Він полягає в тому, що перетворювач буде із необхідною швидкістю зменшувати вихідну частоту до потрібного значення. Крім того, це перетворює двигун у генератор, тобто, кінетична енергія обертання перетвориться в електричну. Далі, в залежності від типу випрямляючого пристрою, вироблена енергія або повернеться у первинну мережу, або буде накопичуватися в контурі постійного струму перетворювача частоти. У випадку другого варіанту, чи тоді, коли є навантаження з великим моментом інерції, для розсіювання енергії може знадобитися застосування зовнішнього гальмівного опору. Його підключення здійснює спеціальна контролююча схема у випадках, коли виникає небезпечна перенапруга у проміжному контурі ПЧ. З усього вищесказаного можна зробити висновок, що генераторний спосіб гальмування забезпечує передбачений час та плавність зупинки і високий гальмівний момент. Недоліком є лише можливий перегрів у випадках дуже швидкої зупинки чи великого моменту інерції. Тоді, для уникнення наслідків перегріву вбудованого резистора контуру постійного струму перетворювача потрібно використовувати зовнішній опір.

Динамічне гальмування відбувається за допомогою використання постійного струму. Для цього потрібно з обмоток статора двигуна зняти змінну напругу та на

одну чи дві фази подавати постійну напругу. Такі маніпуляції приведуть не лише до того, що магнітне поле сповільнюватиме обертання, а воно ще й потім утримуватиме ротор у нерухомому стані. Основна перевага такого виду гальмування - це плавна зупинка та виділення електричної енергії в роторі двигуна, що дозволяє не використовувати додатковий гальмівний опір. Недоліком можна вважати те, що перетворювач не контролює вихідну частоту, тому гальмування не має визначеного часу. Ефективність гальмування з використанням цього способу, в порівнянні з генераторним методом, становить лише 30-40%. Тому частіше використовується комбінований спосіб гальмування, що застосовує обидва описаних методи, тобто, на змінну складову вихідної напруги перетворювача накладається постійна складова. Таке рішення дозволяє поєднати переваги обох способів та здійснювати ефективне гальмування за короткий час, без виділення тепла та без інших негативних ефектів.

Керування перетворювачем частоти. Перетворювачі частоти мають спеціальні набори параметрів, що потрібні для керування. З їх допомогою можна вибрати, активувати чи вимкнути якусь функцію. Параметри встановлюються за допомогою клавіатури на панелі керування та цифрового чотиризначного екрана. Зміна чи контроль параметрів може відповідати, наприклад, за час розгону чи максимальну та мінімальну частоту. Для максимальної ефективності технологічного процесу, важливо задавати оптимальні режими роботи частотно-керованого привода. Це питання не просте і вимагає від персоналу розуміння та врахування особливостей як процесу виробництва, так і особливостей обладнання, з яким працює спеціаліст. Щоб спростити роботу з перетворювачами в деяких серіях (наприклад в MICROMASTER Eco і MIDIMASTE Eco) всі набори параметрів розділяються на дві групи. Перша включає в себе базові параметри, налагодження яких дозволить у більшості випадків швидко ввести привод в експлуатацію. В другу групу входять параметри для більш точних налаштувань, але доступ до них за замовчуванням заблокований та надається лише кваліфікованому спеціалісту.

Такий спосіб управління може бути дуже звичним, коли агрегат лише вводиться в експлуатацію, а також тоді, коли потрібно змінити якісь прості

налаштування перетворювача. Щоб використовувати частотно-регульовані приводи на виробництві, вони повинні взаємодіяти також і з іншими учасниками системи керування. Для забезпечення такої взаємодії кожен перетворювач обов'язково має в собі дискретні та аналогові входи і виходи, а також послідовні інтерфейси.

Як правило (в залежності від серії приладу) перетворювачі можуть мати від 3 до 6 програмуємих дискретних входів, що можуть ініціювати до 24 різних функцій керування. Ці функції прийнято розділяти на кілька груп.

Функції, що керують запуском, зупинкою, реверсом, тощо, відносяться до першої групи.

Функції, що керують вихідною частотою перетворювача відносяться до другої групи. Таке керування можна здійснювати шляхом вибору фіксованим значенням частоти для конкретного входу, чи шляхом задавання двійковим кодом стану трьох входів (8 значень). Також до цієї групи включають функції, що відповідають за плавне зменшення чи збільшення вихідної частоти при активному стані дискретного входу.

Службові функції включені до третьої групи. Вони, як правило, потрібні для скидання помилок, дозволів на дистанційне керування, тощо.

Живлення вихідних кіл може здійснюватися двома способами: або внутрішнім джерелом живлення з вихідною напругою в 15 В постійного струму, або зовнішнім джерелом з напругою в 7.5-33.0 В постійного струму.

Існує кілька способів активувати дискретні входи перетворювача: пристрої віддаленого вводу-виводу, дискретні виходи інших керуючих пристроїв та звичайні механічні кнопки на панелі керування установкою.

Розглянемо роботу керуючого пристрою на прикладі обертання двигуна насоса. В даному випадку керуючим пристроєм системи із ПЧ може бути логічний модуль серії LOGO від компанії Siemens. Завдяки вбудованому годиннику, можна в реальному часі налаштувати вибір необхідного значення вихідної частоти перетворювача через дискретні виходи. Перетворювачі частоти від Siemens мають ще одну корисну особливість. Активуючи одночасно кілька входів перетворювачів для

вибору фіксованих частот, їх вихідна частота буде дорівнювати сумі обраних значень. Виходи ж, що не задіяні у виборі частоти, можна використовувати для пуску чи зупинки привода насоса чи для виконання ним інших функцій.

Аналогові входи у перетворювачі призначення для безперервного та контрольованого керування вихідною частотою. Наприклад, ПЧ Micromaster мають лише один такий вхід, а інші моделі можуть мати й два, що дає їм додаткові можливості для керування приводами. Кожен вхід призначений для окремих функцій. Перший може бути використаний для задання частоти з допомогою сигналу у вигляді струму чи напруги.

Користувачу також доступні й додаткові можливості. Деякі перетворювачі, наприклад, дають можливість використовувати реверсивне управління двигуном, коли використовується біполярний сигнал. Також можна налаштувати перетворювач так, що він буде вмикати режим запуску лише при досягненні вхідного сигналу відповідного значення.

Завдяки підключенні до перетворювача зовнішнього потенціометра з опором від 5 до 100 кОм, можна буде просто реалізувати ручне керування через аналогові входи. Але має бути передбачено джерело живлення з потужністю до 10 В. З повзунка потенціометра сигнал подають на вхід №1. Завдяки цьому, при переміщенні повзунка з одного краю до іншого - це викликатиме зміну значення вихідної частоти від 0 до 50 Гц. Але граничні значення цього діапазону можна змінити, змінюючи значення відповідних параметрів на перетворювачі.

Перетворювачі фірми Siemens маю в собі вбудовані функції ПД- або ПІ-регулювання, що дозволяють досить точно регулювати зовнішні параметри, поставлені у залежність від швидкості обертання ротора. Наприклад, роходу, тиску насоса, температури у вентиляції, тощо. Для такого режиму роботи знадобиться відповідний давач.

Аналоговий вихід №2 виконує функцію зворотнього зв'язку. Прикладом його роботи є використання частотно-регулюючого привода для підтримки постійного тиску в системі водопостачання. Задати необхідне значення тиску можна через

перший аналоговий вхід за допомогою потенціометра. Датчик тиску перетворюватиме тиск у трубопроводі в електричний сигнал від 4 до 20 мА, що буде потрапляти на другий аналоговий вхід перетворювача. Важливо, що для живлення датчика має бути друге вбудоване джерело з вихідною напругою в 15 В та навантажувальною здатністю в 50 мА. Задати коефіцієнти підсилення пропорційної, інтегральної та диверсійної ланок ПІД-регулятора можна здійснити за допомогою відповідних параметрів ПЧ.

Наведені вище приклади показують місцеве керування ПЧ, але також є можливість і дистанційного керування з доступом до всіх параметрів. Це можна реалізувати за допомогою спеціального вбудованого інтерфейса за стандартом EIA RS-485.

Мережа, на базі цього інтерфейсу, може об'єднувати в собі до 31 перетворювача. При цьому, кожен з них матиме унікальну адресу, що задаватиметься через спеціальний параметр. Ведучий пристрій буде керувати усіма ПЧ, що об'єднані в мережу. В його ролі може виступати комп'ютер чи ПЛК, або зовнішній пульт керування перетворювача. Обмін даними здійснюється через протокол USS, що було розроблено компанією Siemens. Протокол підтримується всіма серіями перетворювачів та реалізує конфігурацію "ведучий-ведений". Тобто, ініціатором обміну даними є ведучий пристрій, а ведений лише відповідає на повідомлення, що передається в його адресу. За допомогою протокола USS можна передавати повідомлення одразу на всі можливі адресати, тобто, на всі пристрої в мережі. Протокол підтримує максимальну швидкість обміну в 19 кбод. Текстові повідомлення завжди має фіксовану довжину в 14 байт зі стандартним форматом для пристроїв з асинхронним режимом обміну (1 старт-біт даних, біт контролю парності та стоп-біт). Документація протоколу має детальний опис, що дозволяє легко реалізувати його для власного керуючого пристрою.

Більшість перетворювачів також можна підключити до промислової мережі PROFIBUS-DP за допомогою спеціального модуля. За його допомогою можна

забезпечити прости й та відносно дешевий спосіб інтеграції асинхронних приводів в систему автоматизації підприємства.

Існує ще багато функціональних можливостей та особливостей різноманітних перетворювачів, розроблених компанією Siemens. Для детального ознайомлення з ними, можна звернутися до спеціальних каталогів.

На сьогоднішній день вже наявні в продажі перетворювачі частоти вітчизняного виробництва. Одною з компаній яка розробляє та виробляє перетворювачі частоти є фірма Specialist з м. Кам'янське, яка виробляє ПЧ під власною торгівельною маркою SPLC. З її асортименту ми і виберемо ПЧ у наступному розділі.

## **2.8 Вибір перетворювача частоти.**

Як ми зазначили вище, ПЧ є найефективнішим засобом для підключення електродвигуна до електромережі та керування режимами його роботи. В одному з попередніх розділів для модернізації ми обрали електродвигун АІР355S8У3. Відповідно вибраний нами ПЧ повинен забезпечувати його повноцінне функціонування, а також захист.

З асортименту вітчизняної компанії Specialist виберемо ПЧ призначений для підключення та керування електродвигунів що працюють в складі установок поршневих компресорів.

Під характеристики обраного раніше двигуна підходить модель ПЧ SPLC-AT20-132G/160P-4 яка має характеристики які наведені в табл. 2.3.

Таблиця 2.3 – Основні характеристики ПЧ SPLC-AT20-132G/160P-4

| Параметр                  | Значення        |
|---------------------------|-----------------|
| Вхідна напруга            | 3ф 380 В 50 Гц  |
| Вихідна напруга           | 3ф 380 В        |
| Вихідна потужність        | до 132 кВт      |
| Діапазон вихідної частоти | від 0 до 600 Гц |

|                            |       |
|----------------------------|-------|
| Номінальний вхідний струм  | 267 А |
| Номінальний вихідний струм | 262 А |
| Ступінь захисту EN 60529   | IP20  |

Також цей ПЧ має наступні додаткові функції:

- Можливість переключення між скалярним та векторним режимами керування електродвигуном
- Наявність внутрішнього ПЛК, що дозволяє працювати в автономному режимі.
- Інтерфейс RS-485 із протоколом Modbus.
- Додаткові дискретні та аналогові входи та виходи.

Функції захисту:

- Захист електродвигуна від перевантаження.
- Захист від обриву фаз на вході та виході.
- Захист від перенапруги та зниженої напруги.
- Захист від перегріву та вбудоване теплове реле.

Структурна схема підключень ПЧ наведена на рис. 2.5.

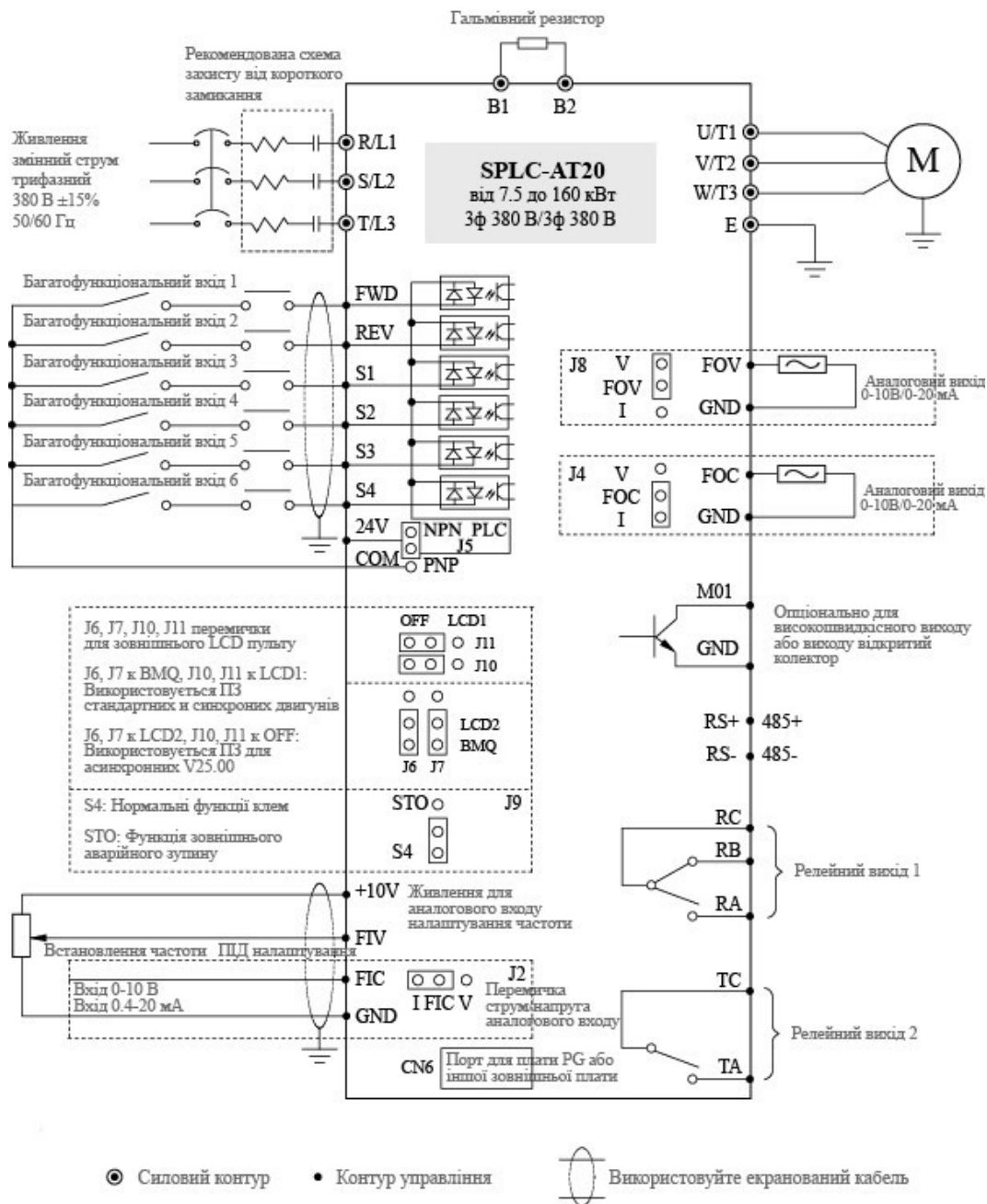


Рисунок 2.5 – Схема підключень ПЧ S PLC-AT20

Також, при роботі в автономному режимі, даний ПЧ має можливість від'єднання контрольної панелі та винесення її на дверцята монтажної шафи, що спрощує керування режимами роботи електродвигуна, та в значній мірі знижує ризик ураження струмом обслуговуючого персоналу.

Переробимо схему прямого пуску з рис 2.2 під використання перетворювача частоти.

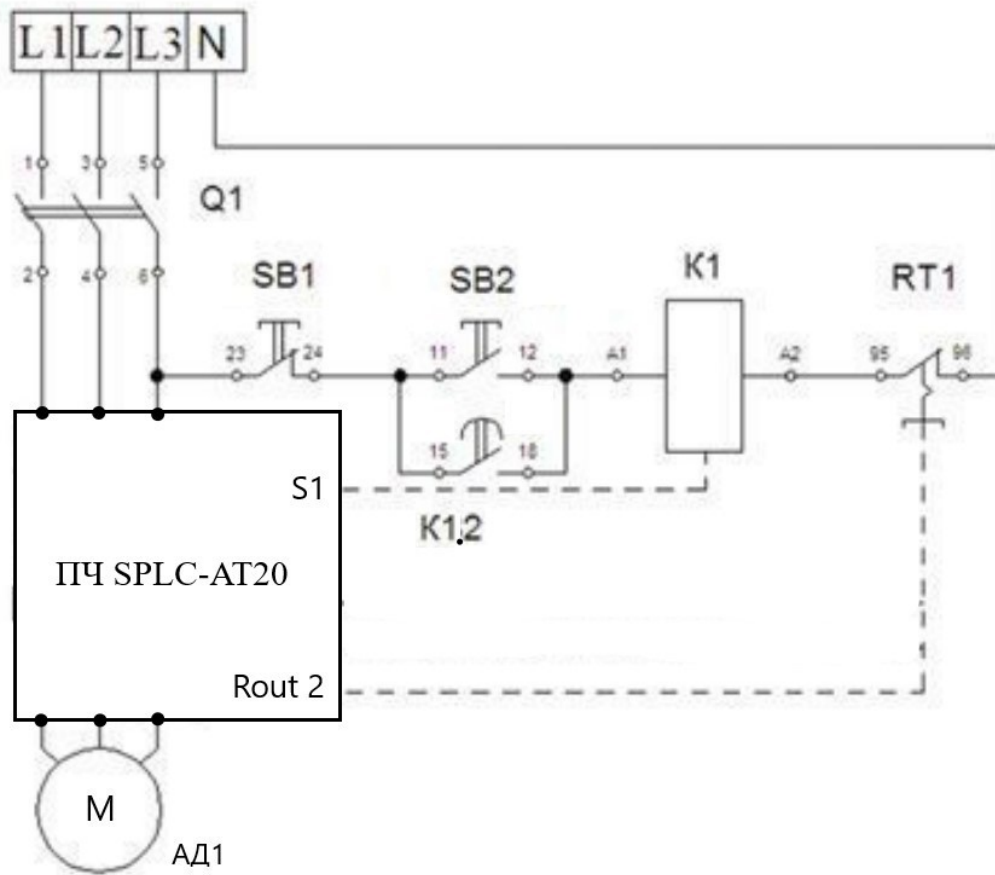


Рисунок 2.6 – Схема включення електродвигуна за допомогою ПЧ.

В даній схемі відсутні теплове реле та магнітний пускач, через те що їх функції вже має ПЧ. Реле K1 на рис 2.6 це звичайне малопотужне реле, одна з груп контактів якого підключені до одного з багатофункціональних входів ПЧ. В залежності від того як запрограмований ПЧ, при замиканні цих контактів, може виконуватись та чи і інша послідовність дій керування електродвигуном. Контакти RT1, на схемі, це контакти релейного виходу ПЧ, які можна запрограмувати на відключення схеми при наявності якихось аварійних ситуацій.

Інші багатофункціональні входи S2...S6, також можуть бути запрограмовані на різноманітні дії, як то включення сигналізації, додаткової вентиляції тощо. Таким чином значно розширюючи можливості керування компресорним комплексом в цілому.

### 3 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

#### 3.1 Постановка задачі моделювання роботи електропривода на ПЕОМ.

Важливо розуміти, що створення асинхронного електродвигуна має в першу чергу підвищувати його енергоефективність та коефіцієнт корисної дії. Тому, головною метою математичного моделювання є розрахунок та створення такої системи управління що забезпечуватиме максимальний момент на валу двигуна при низьких обертах. А для цього, в свою чергу, дуже важливо обрати систему моделювання та відповідність моделі до процесів, що відбуватимуться у перетворювачі. Рівняння руху розглядатимуться в системі координат Парка-Горева, так як вона переважає над стаціонарною системою координат при векторному управлінні. Це, у підсумку, дозволяє побудувати системи управління асинхронним приводом за тими ж принципами, що і системи для двигунів постійного струму. Також і характеристики такого частотно-регульованого двигуна стають дуже близькими до характеристик двигуна постійного струму, що суттєво спрощує розрахунки та дозволяє підвищити його економічну ефективність.

Щоб змодельовати роботу машини у режимі двигуна чи генератора, було використано блок *Asynchronous Machine* з пакету програм *MATLAB*. Піктограми цих машин зображені на рис. 3.1. Вони можуть трохи відрізнятися в залежності від версії програми. Так асинхронні машини представлені двома типами двигунів, трифазним і однофазним. Відповідно до обраного нами двигуна, при моделюванні схем прямого пуску та із регулюванням частоти ми будемо використовувати модель трифазного асинхронного двигуна.

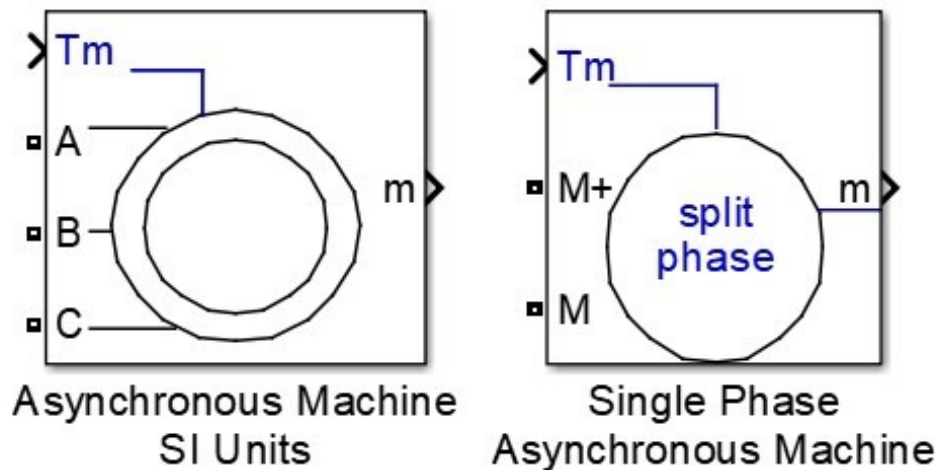


Рисунок 3.1 - Піктограми асинхронних машин пакету Simulink.

Знак електромагнітного моменту визначає режими роботи двигуна. Виводи обмоток статора машини на моделі показані портами  $A$ ,  $B$  та  $C$ , а обмотки ротора показані портами  $a$ ,  $b$  та  $c$ . Якщо у властивостях моделі двигуна обрати “Squirrel cage” (короткозамкнений ротор), то порти  $a$ ,  $b$  та  $c$  будуть відсутні на піктограмі. Для подавання моменту опору руху на моделі є порт  $Tm$ . Векторний сигнал формується на порту  $m$ , який складається з 21 елемента. В цього склад входять: ток потоків, напруга ротора та статора як в нерухомій так і обіговий системах координат, також електромагнітний момент, кутова частота обертання валу і його кругового положення.

Блок *Machines Measurement Demux*, що входить до складу бібліотеки *Sim Power System*, було використано для зручного витягання змінних машини з вектору.

Модель АД (асинхронної машини) включає в себе дві моделі: електричної та механічної частин. Електрична представлена моделлю простору стану четвертого порядку, а механічна - у вигляді системи другого порядку. Електричні змінні та параметри машини приведені до статора. Вихідні рівняння електричної частини машини записані для двофазної ( $dq$ -вісі) системи координат. Рис 3.2 показує схему заміщення агрегата.

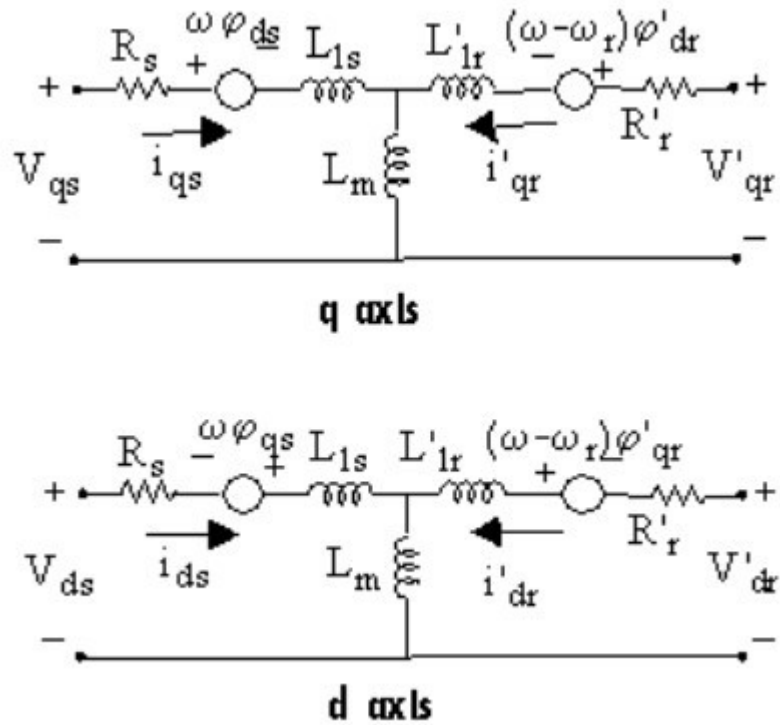


Рисунок 3.2 – Схема заміщення для математичної моделі.

Для розрахунку параметрів  $V_{qs}$ ,  $V'_{qr}$ ,  $V_{ds}$ ,  $V'_{dr}$  використовуються диференційні рівняння з якими можна ознайомитися у розділі «Help» програмного пакету Simulink.

### 3.2 Розрахунок параметрів схеми заміщення двигуна електропривода компресора повітря.

Пакет програм MATLAB дозволяє розрахувати параметри схеми заміщення двигуна завдяки моделюванню роботи асинхронного приводу з КЗ ротором.

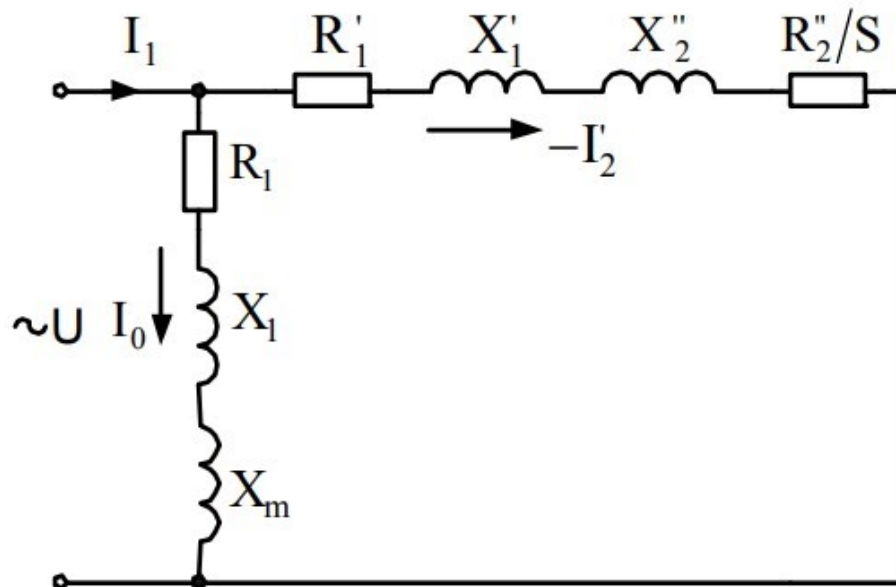


Рисунок 3.3 – Г-образна схема заміщення фази асинхронного двигуна.

Параметри схеми заміщення двигуна в технічних довідниках приведені у відносних одиницях [7].

В таблиці 3.2. наведено технічні параметри двигуна серії AIP355S8Y3 та результати обчислення параметрів схеми заміщення фази асинхронного двигуна у фізичних одиницях.

Таблиця 3.2 Технічні параметри двигуна електропривода

| Параметр  | Значення  |
|---|-----------|
| Потужність $P_{НОМ}$ , кВт                              | 132       |
| Частота обертання фазова $n_0$ (фактична $n_H$ ), об/хв | 750 (740) |
| ККД $\eta$ , %  | 93,7      |
| Коефіцієнт потужності, $\cos \varphi$                   | 0,82      |
| Співвідношення обертальних моментів, $M_{П}/M_H$        | 1,8       |
| Співвідношення обертальних моментів, $M_{МАКС}/M_H$     | 2,0       |
| Співвідношення струмів $K_I$ , $I_{П}/I_H$              | 6,4       |
| Робочий струм $I_H$ , А                                 | 261       |
| Момент інерції $J$ , кгм <sup>2</sup>                   | 7,9       |

Щоб привести параметри схеми заміщення до фізичних одиниць, потрібно знайти базовий опір двигуна за формулами:

$$R_B = \frac{U_H}{I_H} \quad (3.1)$$

де  $U_H$  – номінальна напруга двигуна,  $U_H = 380$  В;

$I_H$  – номінальний струм двигуна,  $I_H = 17,2$  А.

Розрахуємо базовий опір двигуна:

$$R_B = 22,1 \text{ Ом.}$$

Тепер, маючи значення базового опору, можна розраховувати параметри схеми заміщення у фізичних одиницях, що необхідні для моделювання.

Розрахуємо приведені активний опір ротора:

$$R_p = \frac{1}{3} \cdot \frac{(P_H + \Delta P_M)}{I_H^2 \cdot \frac{1 - S_H}{S_H}} \quad (3.2)$$

де  $P_H$  – номінальна потужність двигуна;

$\Delta P_M$  – механічні втрати, які прийнято приймати за 5% від  $P_H$ ,  $\Delta P_M = 375$  Вт;

$I_H$  – номінальний струм двигуна;

$S_H$  – номінальне ковзання.

Приведений активний опір ротора дорівнює:

$$R_p = 0,275 \text{ Ом}$$

Тепер розрахуємо активний опір статора за формулою:

$$R_c = \frac{U_H \cdot \cos \varphi \cdot (1 - \eta)}{\sqrt{3} \cdot I_H} - C^2 \cdot R_p - \frac{\Delta P_M}{3 \cdot I_H^2} \quad (3.3)$$

де  $C$  – коефіцієнт приведення, значення якого, для початкових розрахунків, береться з проміжку 1,01...1,05. В нашому випадку  $C = 1,02444$ .

Також необхідно розрахувати індуктивності ротора та статора.

Формула для розрахунку приведеної індуктивності ротора має вигляд:

$$L_r = \frac{U_H}{\sqrt{3} \cdot 4 \cdot \pi \cdot f \cdot (1 + C^2) \cdot I_H} \quad (3.4)$$

де  $f$  – частота струму,  $f = 50$  Гц;

$I_H$  – пусковий струм двигуна,  $I_H = 111,8$  А.

Приведена індуктивність ротора дорівнює:

$$L_r = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ Гн.}$$

Індуктивність статора знайдемо за формулою:

$$L_s = \frac{U_H}{\sqrt{3} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot I_H \cdot \sqrt{1 - (\cos \varphi)^2} - \frac{2}{3} \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot M_M \cdot S_H}{p \cdot U_H} \cdot \frac{S_H}{S_{KP}}} \quad (3.5)$$

де  $M_M$  – максимальний момент двигуна,  $M_M = 155$  Нм;

$p$  – кількість пар полюсів,  $p = 3$ ;

$S_H$  – номінальне ковзання,  $S_H = 0,03$ ;

$S_{KP}$  – критичне ковзання,  $S_{KP} = 0,1184$ .

Відповідно маємо значення індуктивності статора:

$$L_s = 0,037 \text{ Гн.}$$

Індуктивність контуру дорівнює:

$$L_m = L_s - L_r \quad (3.6)$$

$$L_m = 0,035 \text{ Гн.}$$

Тепер, маючи всі потрібні величини, їх можна задати в модель АД в середовищі Simulink, щоб провести моделювання.

### 3.3 Моделювання прямого пуску двигуна електропривода.

Нижче приведена модель прямого пуску АД з короткозамкненим ротором електропривода.

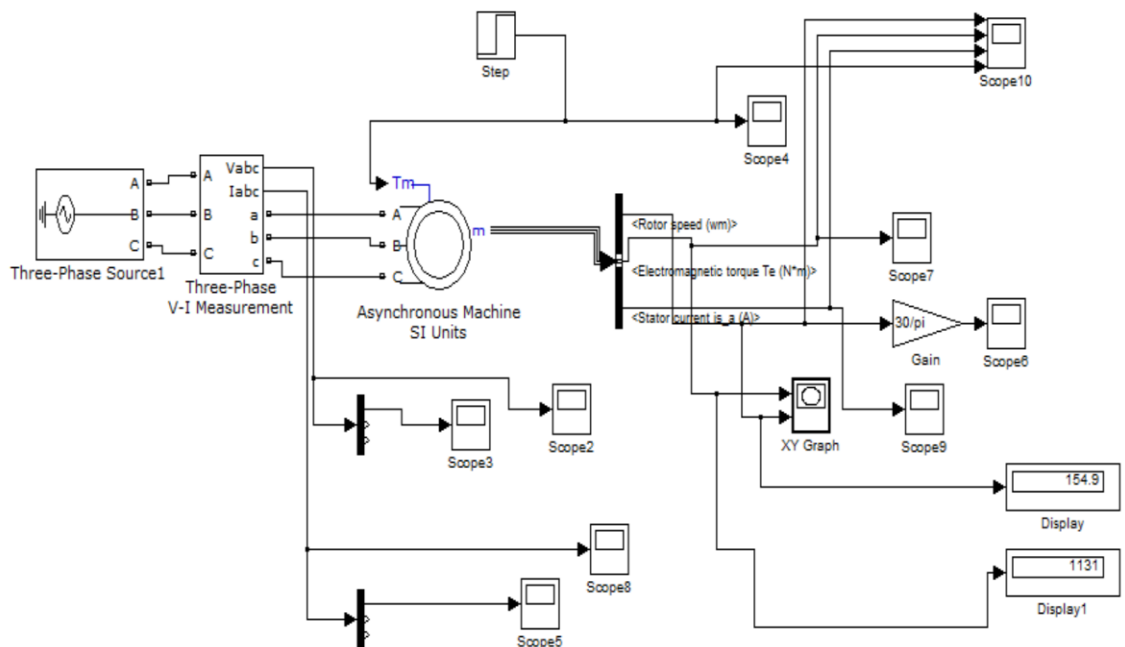


Рисунок 3.4 - Схема моделі прямого пуску АД з КЗ ротором

На схемі показано джерело трифазного живлення, також трифазний вимірювач напруги та струму обмоток статора, будівник графіків механічної характеристики, осцилограф та інші вимірювальні пристрої.

Навантаження на валу двигуна відповідає розрахованому раніше статичному моменту механізму та активується поетапно після досягнення двигуном номінальної швидкості і завершення перехідних процесів. Динамічний момент компресора не

враховується через його значно менше значення, порівняно зі статичним моментом механізму. У той же час, динамічний момент двигуна враховується в моделі для правильного розрахунку параметрів під час холостого ходу.

Механічна характеристика асинхронного двигуна представлена нижче у вигляді графіка залежності швидкості та електромагнітного моменту двигуна при розгоні приводу. Також тут представлені результати моделювання процесу прямого пуску двигуна з КЗ ротором в середовищі Simulink.

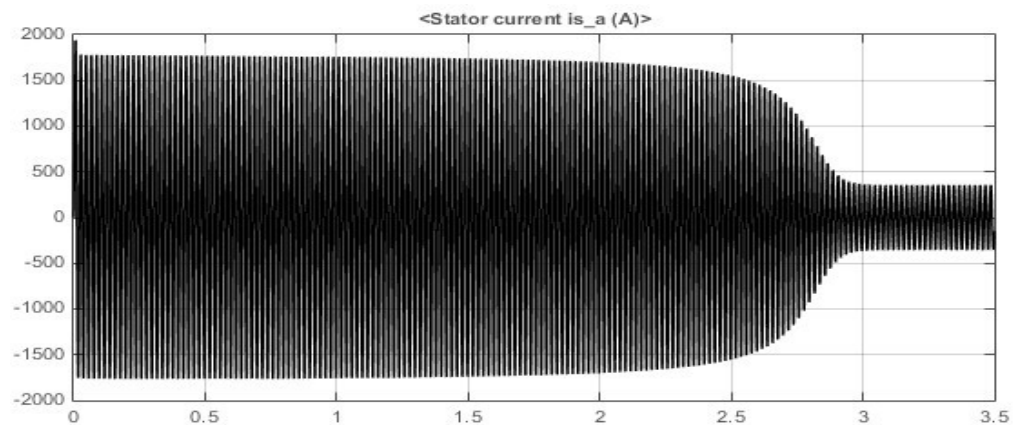


Рисунок 3.5 – Діаграма струму фази статора моделі.

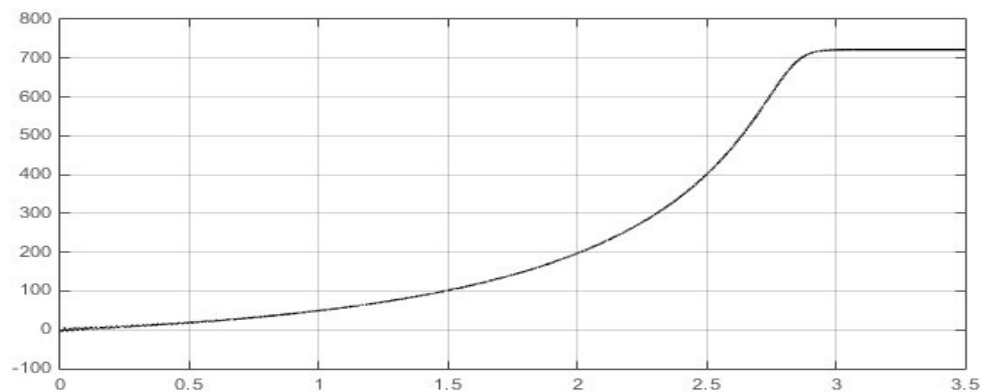


Рисунок 3.6 – Діаграма швидкості ротору моделі.

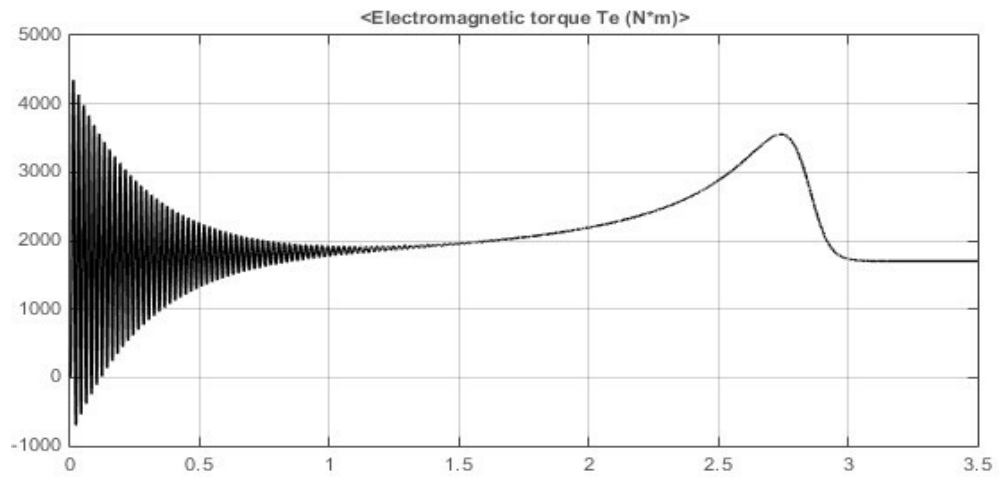


Рисунок 3.7 – Діаграма електромагнітного моменту моделі.

### 3.4 Моделювання пуску двигуна електропривода з ПЧ.

Модель електропривода з використанням перетворювача частоти ПЧ-АД представлена нижче. В ній використовується система керування зі зворотним зв'язком за швидкістю двигуна, що забезпечує широкий діапазон регулювання швидкості. Схема також включає джерело трифазного живлення з використанням широкосмугової модуляції (ШІМ), трифазний вимірювач напруги та струму обмоток статора двигуна, а також осцилографи та вимірювальні прилади. Закон зміни частоти струму є аперіодичним. Навантаження на валу двигуна моделюється так само, як і при прямому пуску.

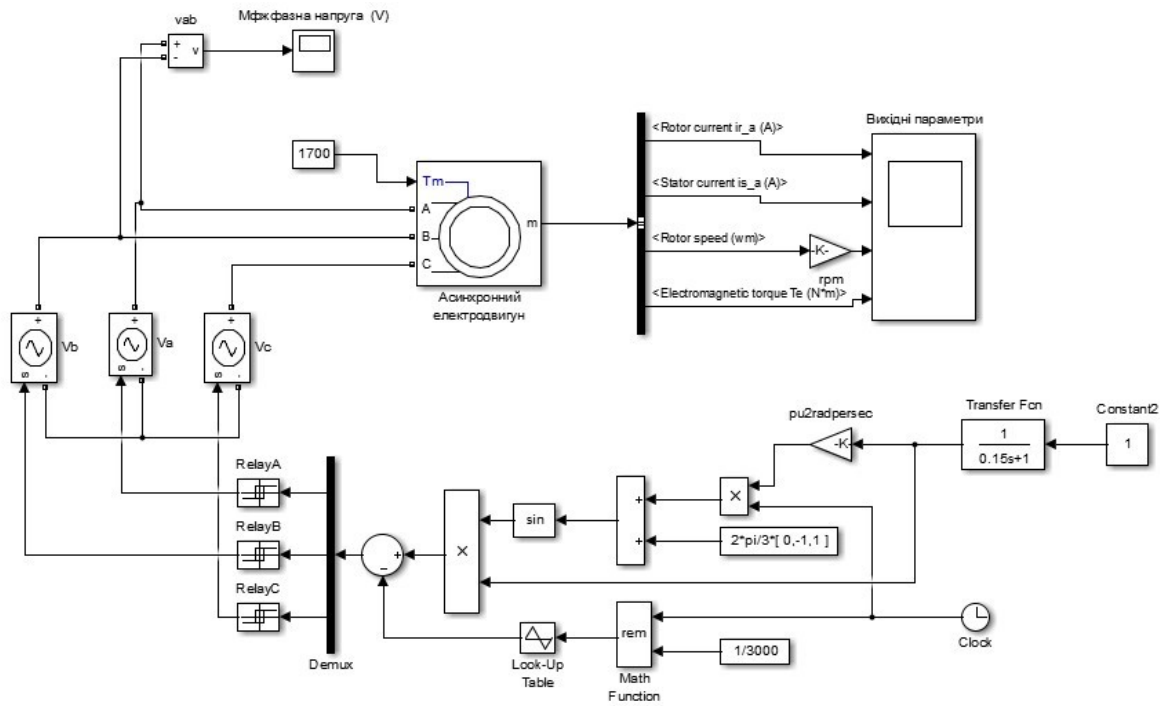


Рисунок 3.8 – Схема моделі пуску АД з КЗ ротором із частотним перетворювачем ПЧ-АД

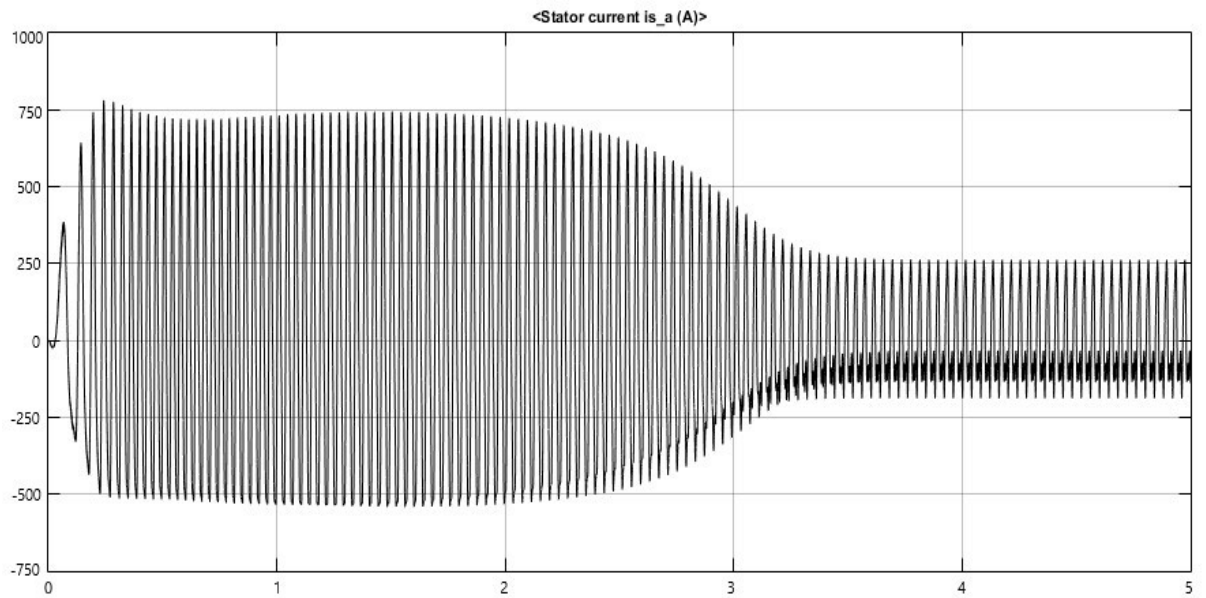


Рисунок 3.9 – Діаграма струму фази статора моделі (ПЧ).

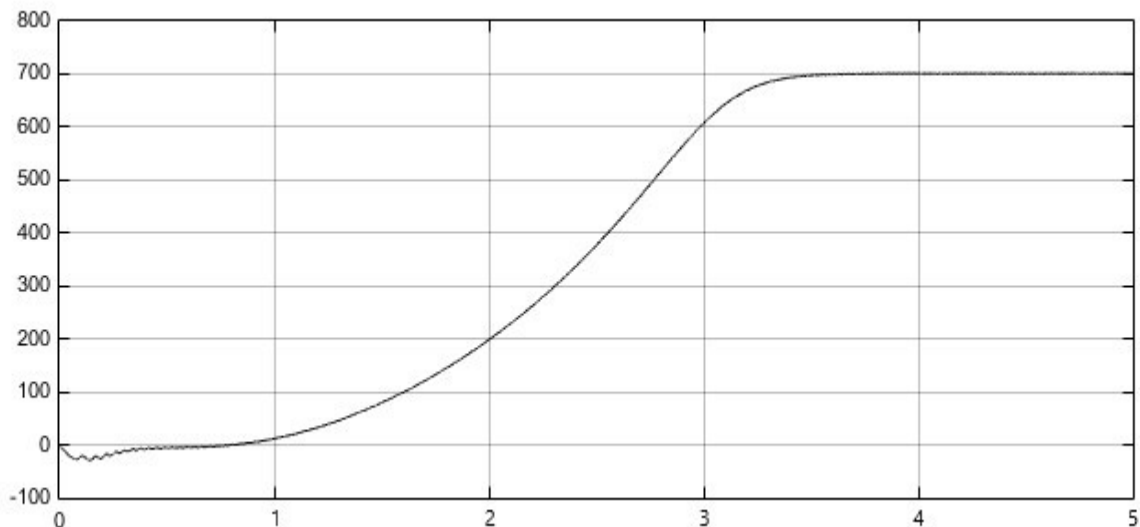


Рисунок 3.10 – Діаграма швидкості ротора моделі (ПЧ).

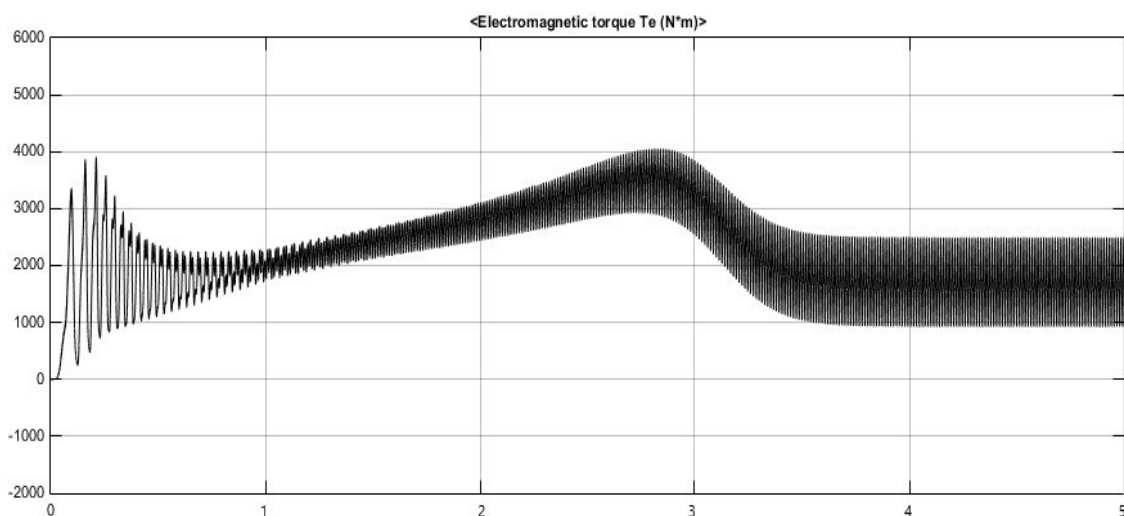


Рисунок 3.11 – Діаграма електромагнітного моменту моделі (ПЧ).

### 3.5 Висновки і пропозиції.

Прямий пуск асинхронного двигуна подається зі сталою напругою живлення 380 В та з частотою 50 Гц. Пусковий струм на початку значно вище номінального, приблизно у 5-6 разів. Пусковий час двигуна при відсутньому навантаженні складає більше 1 секунди, а струм зменшується до струму холостого ходу. Час розгону ротора до номінальної частоти обертання також складає приблизно 1 секунду. В цей

час електромагнітний момент двигуна спочатку значно збільшується, а після розгону зменшується.

Поступове збільшення навантаження двигуна призводить до того, що струм та електромагнітний момент зростають до номінальних значень.

Запуск двигуна з використанням перетворювача частоти, призводить до того, що напруга живлення та частота змінного струму поступово зростають до номінальних значень в 380 В та 50 Гц за 0.8 секунди. В цей же час імпульси пускового струму двигуна значно зменшуються, а час розгону двигуна зростає з 1 секунди до 1.2-1.3 секунд.

Механічні удари електропривода при пуску компресора з ПЧ будуть меншими, ніж при прямому запуску.

Трифазний асинхронний двигун серії AIP355S8Y3 потужністю 132 кВт із перетворювачем частоти ПЧ типу SPLC-AT20 фірми Specialist потужністю 132 кВт, забезпечує діапазон регулювання обертання компресора  $n = 500 \dots 750$  об/хв. та стабілізацію частоти його обертання з точністю  $\Delta n = 5,0\%$  в розімкненій схемі управління електроприводом ВПЗ-2/8, тобто, забезпечує нормальну роботу машини електрифікованого агрегату.

## 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ОБСЛУГОВУВАННЯ ПОВІТРЯННОГО КОМПРЕСОРУ

### 4.1 Загальна характеристика шкідливих та небезпечних факторів.

При обслуговуванні компресорних установок на працівника можуть діяти наступні шкідливі та небезпечні для життєдіяльності фактори:

- рухомі незахищені частини виробничого обладнання;
- підвищена чи знижена температура поверхонь техніки, обладнання й матеріалів;
- при експлуатації посудин, що працюють під тиском, можливе виникнення аварій та аварійних ситуацій, пов'язаних з руйнуванням їх стінок та миттєвим виділенням у довкілля великої кількості енергії;
- безпеку становлять також витoki горючих та токсичних газів або кисню, який підвищує можливість виникнення пожежі;
- підвищений рівень шуму на робочому місці (три установки під час роботи значно підвищують рівень шуму);
- підвищений рівень вібрації (чотири потужні двигуни в одному приміщенні);
- підвищене значення напруги в електричному ланцюзі (компресорна установка має власний електропривід, котрий живиться від мережі 380 В змінного струму частоти 50Гц), замикання якого може пройти через тіло людини; – недостатня освітленість робочої зони (через осідання пилу на приборах освітлення та вікнах, рівень освітленості дуже малий);
- гострі кромки, задирки і шорсткість на поверхні муфт та різного рухомого обладнання.

### 4.2 Перелік реалізованих засобів охорони праці.

Основними вимогами з охорони праці, що ставляться до машин і механізмів, є їх безпечність для людини, надійність і зручність експлуатації. Безпечність виробничого обладнання, машин і механізмів досягається за рахунок правильного

вибору принципів дії, кінематичних схем, конструктивних рішень, робочих тіл, параметрів технологічних процесів та використанням різноманітних засобів захисту. Зручність експлуатації машин і механізмів досягається за рахунок удосконалення конструкції машин та робочого місця оператора.

Робота з технічного обслуговування компресорної установки виконується працівниками підприємства, котрі перш за все пройшли інструктаж з техніки безпеки, отримали допуск о роботи та відмітку в спеціальному журналі обслуговування.

При експлуатації компресорних установок необхідно додержуватися правил безпеки при роботі з посудинами під тиском згідно з НПАОП 0.00-1.59-87 та НПАОП 0.00-1.13-71 «Правила будови і безпечної експлуатації стаціонарних компресорних установок, повітропроводів газопроводів».

Для створення безпечних умов експлуатації та обслуговування, установки оснащено приладом для вимірювання тиску, температури та рівня рідини, запірною та запірно-регулювальною апаратурою. Кожна посудина оснащується вентилем для контролю відсутності тиску перед її відкриттям з відводом залишків речовини, що зберігалась у посудині, в безпечне місце, штуцерами для наповнення, зливу води і видалення повітря при гідравлічних випробуваннях.

Усі працюючі під тиском посудини оснащені манометрами, на які нанесені мітки максимального і мінімального рівнів тиску. Оскільки посудина працює при змінній температурі стінок, то вона має прилади для контролю нагрівання.

З метою попередження підвищення тиску в посудинах понад допустимого останні оснащуються запобіжними механічними клапанами. Задля запобігання несправностей балони проходять огляд після монтажу до пуску в роботу, періодично в процесі експлуатації та позачергово. Обсяги, методи і періодичність технічного огляду встановлюються згідно з Правилами.

Безпека експлуатації компресорів досягається використанням спеціальних змащувальних матеріалів, застосуванням систем охолодження та очищення.

Для змащування робочих циліндрів повітряних компресорів використовуються термічно стійкі, добре очищені мастила, здатні протистояти окислювальній дії гарячого повітря. Змащування інших механізмів здійснюється звичайними мастилами. Перед пуском компресорів перевіряють наявність мастила.

З метою попередження гідравлічних ударів передбачене відведення сконденсованої рідини з холодильника, додаткове осушення та контроль відносної вологості повітря, яке засмоктується в компресор. Для усунення іскроутворення внаслідок виникнення розрядів статичної електрики компресори заземлюють.

Для зменшення впливу сонячного проміння повітрязбірники пофарбовано у сріблястий колір. На видному місці чорною фарбою нанесено реєстраційний номер, допустимий тиск, місяць та рік наступного внутрішнього огляду та гідравлічного випробовування.

Людина є найважливішим фактором надійного функціонування технологічного обладнання, але її психічні і фізіологічні можливості обмежені, що зумовлює звертати значну увагу на конструкцію технічних засобів з метою створити безпечні умови праці та забезпечити максимальну продуктивність при мінімальних витратах енергії робітника.

Працівники застосовують індивідуальні, а також і колективні засоби захисту.

Засоби колективного захисту, які використовуються на підприємстві, підрозділяються на класи: нормалізації повітряного середовища виробничих приміщень і робочих місць, нормалізації освітлення виробничих приміщень і робочих місць, захисту від іонізуючих випромінювань, інфрачервоних випромінювань, ультрафіолетових випромінювань, електромагнітних випромінювань, магнітних і елек тричних полів, випромінювання оптичних квантових генераторів, шуму, вібрації, ультразвуку, враження електричним струмом, електростатичних зарядів, від підвищених і знижених температур поверхонь устаткування, матеріалів, виробів, заготовок, від підвищених і знижених температур повітря робочої зони, від впливу механічних, хімічних, біологічних факторів. Засоби колективного захисту конструктивно і функціонально пов'язані з виробничим

процесом, виробничим обладнанням та приміщенням, і поділяються на огорожувальні, запобіжні, блокувальні та сигнальні.

Для захисту від ураження електричним струмом застосовуються різні технічні заходи, такі як малі напруги; електричне розділення мережі; контроль і профілактика пошкодження ізоляції; захист від випадкового дотику до струмоведучих частин; захисне заземлення; захисне відключення.

Індивідуальні засоби захисту застосовуються в тих випадках, коли безпека виконання робіт не може бути повністю забезпечена організацією виробництва, конструкцією обладнання та засобами колективного захисту.

Використовують засоби захисту органів дихання – протигази; респіратори; спеціальний одяг – комбінезони, напівкомбінезони; куртки; брюки; костюми; халати; плащі; кожушки, кожухи; фартухи; жилети; нарукавники; спеціальне взуття – чоботи, черевики, калоші; засоби захисту рук – рукавиці гумові, рукавички гумово-шкіряні; засоби захисту голови – каски; шоломи, підшоломники; шапки, берети, капелюхи; засоби захисту особи – захисні маски, захисні щитки; засоби захисту органів слуху – протишумові шоломи; навушники; вкладиші; засоби захисту очей – захисні окуляри; запобіжні пристосування – пояси запобіжні; діелектричні килимки; ручні захвати; маніпулятори; наколінники, налокітники, наплечники;

Використання ЗІЗ забезпечує максимальну безпеку, а незручності, пов'язані з їх застосуванням, зведені до мінімуму.

Під час роботи в електроустановках напругою до 1000 В без зняття напруги на струмопровідних частинах чи поблизу від них необхідно:

- огородити розташовані поблизу робочого місця інші струмопровідні частини, що перебувають під напругою, і до яких можливий випадковий дотик;
- працювати в діелектричному взутті чи стоячи на ізолювальній підставці або на діелектричному килимі;
- застосовувати інструмент із ізолювальними руків'ями (у викруток, крім того, має бути ізольований стрижень); за відсутності такого інструменту слід користуватися діелектричними рукавичками.

Під час виконання робіт без зняття напруги на струмопровідних частинах за допомогою ізолювальних засобів захисту необхідно:

- тримати ізолювальні частини засобів захисту за руків'я до обмежувального кільця;
- розміщувати ізолювальні частини засобів захисту так, щоб не виникла небезпека перекриття по поверхні ізоляції між струмопровідними частинами двох фаз чи замикання на землю.

#### **4.3 Пожежна безпека.**

Приміщення, в котрому розміщується компресорна установка, відноситься до категорії «Г». До даної категорії відносяться приміщення, в яких знаходяться негорючі речовини та матеріали в гарячому, розжареному або розплавленому стані, процес обробки яких супроводжується виділенням променистого тепла, іскор, полум'я; горючі гази, спалимі рідини, тверді речовини, які спалюються або утилізуються як паливо.

До основних джерел запалювання відносять: тепловий прояв електричної, механічної та сонячної енергії, тепловий прояв хімічної реакції та інші джерела. Джерелом запалювання можуть бути також іскри, які виникають при роботі електричних машин.

Серед найбільш поширених та небезпечних є джерела запалювання, які пов'язані з такими тепловими проявами електричної енергії, як короткі замикання в електричних мережах, струмові перевантаження, розряди статичної та атмосферної електрики, електричні іскри, розігрів місць з'єднання проводів та контактів у комутуючому електрообладнанні внаслідок їх значного перехідного опору, електрична дуга та розжарені краплі металу, що утворюються при електрозварюванні та плавленні ниток розжарювання електричних ламп загального призначення тощо.

Для запобігання можливості розповсюдження пожежі та забезпечення шляхів під'їзду для пожежної техніки між сусідніми будівлями та спорудами встановлені протипожежні відстані згідно із ступенем вогнестійкості будівлі.

Для ліквідації осередків пожежі в початковій стадії їх розвитку силами робітників приміщення забезпечене первинними засобами пожежогасіння, пожежним ручним інструментом і інвентарем. Серед них є: внутрішні пожежні крани, ручні вогнегасники, гідропульти, ручні насоси, бочки з водою, ящики з піском, покривала з повстини, ручний пожежний інструмент і інвентар (відра, ломи, сокири, лопати, кирки, багри, пожежні стенди, щити тощо).

У разі необхідності гасіння пожежі, до прибуття бригади, не відключеного електрообладнання водою із ствола пожежного водопроводу, щоб уникнути ураження електричним струмом необхідно дотримуватись наступних вимог:

- керівником гасіння пожежі до прибуття бригади пожежників є старший із числа працівників, або ж відповідальний за електричне господарство;
- відключення з'єднань, на яких горить обладнання, проводиться черговим персоналом;
- гасіння водяними струями допускається тільки у відкритих для обзору електроустановках, при цьому рукав має бути заземлений, а той хто тримає його, повинен бути в діелектричних рукавичках та ботах, і знаходитися від вогню на відстані не менше 3,5 м;
- не дозволяється використовувати для гасіння солону або сильно забруднену воду;
- піною гасити забороняється, тому що вона має підвищену електропровідність;
- силовий трансформатор повинен бути вимкнений.

Підходи до вогнегасників та інших первинних засобів пожежогасіння зручні і не захаращені. Для кращої видимості елементи будівельних конструкцій (частини колон і огорож, підлоги) у місцях розташування цих засобів виділено червоними смугами шириною 200–400 мм, а засоби пожежогасіння фарбовано в червоний колір.

## 5 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ

### 5.1 Вступ.

В дипломному проекті розглядається модернізована система автоматичного керування електроприводом із застосуванням перетворювача частоти, та базова система на основі релейно-контакторної схеми включення електроприводи. Однією з причин вибору даного методу є економічна ефективність. Дане технічне рішення дозволить зменшити експлуатаційні витрати на технічне обслуговування установки та споживання електроенергії і збільшити надійність роботи системи в цілому. Також, при використанні ПЧ збільшується гнучкість системи в налаштуваннях режимів роботи електроприводу, з'являється можливість дистанційного керування та спостереження в реальному часі за станом електроприводу, а при виникненні позаштатних ситуацій, оперативного втручання з боку оператора або обслуговуючого персоналу.

Як було зазначено вище, приміщення де розташована компресорна установка належить категорії особливо небезпечних. І зменшення часу знаходження в ньому обслуговуючого персоналу також має непрямий економічний ефект за рахунок підвищення ефективності роботи обслуговуючого персоналу через зменшення ризиків отримання травм.

В цьому розділі ми розрахуємо лише прямий економічний ефект від впровадження модернізації, а також визначимо термін окупності вкладень які повинні бути зроблені на модернізовану систему.

Основним завданням техніко-економічного обґрунтування (ТЕО) є розрахунок економічної доцільності використання асинхронного двигуна з перетворювачем частоти, як приводу компресорної установки, а також визначення капітальних витрат і експлуатаційних витрат проектного механізму.

Термін окупності є одним з основних показників доцільності модернізації і ми розрахуємо його із порівняння витрат на обидва види реалізації систем електроприводу:

$$T_{ок} = \frac{K_2 - K_1}{C_1 - C_2} \quad (5.1)$$

де  $K_1$  – капіталовкладення на просту систему;

$K_2$  – капіталовкладення на модернізовану систему;

$C_1$  та  $C_2$  – річні витрати на обслуговування простої та модернізованої системи відповідно.

## 5.2 Розрахунок капітальних витрат.

Капітальні інвестиції – це кошти, призначені для створення і придбання основних фондів та нематеріальних активів, що підлягають амортизації.

Капітальні інвестиції реалізації проекту включають в себе:

- витрати на придбання обладнання;
- транспортні витрати
- витрати на монтаж та налагодження.

Оціночний підрахунок витрат здійснюється на основі цін, які рекомендуються виробниками обладнання та інших довідкових матеріалів.

Для зручності зведемо у дві таблиці капіталовкладення для системи у базовому виконанні (табл. 5.1), та модернізованої системи (табл. 5.2).

Для оціночних розрахунків витрати на монтаж та налагодження, а також транспортні витрати прийнято брати як відсоток від вартості обладнання.

Таблиця 5.1 – Капітальні витрати на базову систему

| № | Наменування обладнання              | Кількість, од. | Вартість, грн. |
|---|-------------------------------------|----------------|----------------|
| 1 | Автоматичний вимикач NZMN3-A320     | 1              | 18000,00       |
| 2 | Магнітний пускач CES 300.22 230V AC | 1              | 25000,00       |
| 3 | Теплове реле RE 317.D-310           | 1              | 9000,00        |
| 4 | Електродвигун АИР 355 S8 У3         | 1              | 300000,00      |

|   |                           |   |           |
|---|---------------------------|---|-----------|
| 5 | Транспортні витрати (10%) | 1 | 35200,00  |
| 6 | Монтажні роботи (15%)     | 1 | 52800,00  |
| 7 | Усього капітальних витрат | 1 | 440000,00 |

Таблиця 5.2 – Капітальні витрати на модернізовану систему

| № | Наменування обладнання          | Кількість, од. | Вартість, грн. |
|---|---------------------------------|----------------|----------------|
| 1 | Автоматичний вимикач NZMN3-A320 | 1              | 18000,00       |
| 2 | ПЧ SPLC-AT20-132G               | 1              | 190000,00      |
| 3 | Електродвигун АИР 355 S8 У3     | 1              | 300000,00      |
| 4 | Транспортні витрати (10%)       | 1              | 50800,00       |
| 5 | Монтажні роботи (15%)           | 1              | 76200,00       |
| 6 | Усього витрат                   |                | 635000,00      |

Слід зазначити, що в розрахунках ми будемо враховувати лише витрати на електрообладнання і його монтаж. Тобто витрати в цілому на компресорну установку розглядатися не будуть.

Отже ми отримали значення  $K_1$  та  $K_2$ :

$$K_1 = 440000,00 \text{ грн};$$

$$K_2 = 635000,00 \text{ грн}.$$

Отриманні значення капіталовкладень знадобляться нам для подальших розрахунків амортизаційних відрахувань, витрат на ремонт й обслуговування обладнання, та й ін.

### 5.3 Розрахунок експлуатаційних витрат.

Експлуатаційні витрати - це поточні витрати на експлуатацію та обслуговування об'єкта проектування за певний період (рік), виражені в грошовій формі. До основних статей експлуатаційних витрат електротехнічного устаткування відносяться:

- амортизаційні відрахування ( $C_a$ );
- заробітна плата обслуговуючого персоналу ( $C_3$ );

- витрати на технічне обслуговування й поточний ремонт устаткування та мереж ( $C_m$ );
- вартість електроенергії, що буде споживана об'єктом проектування або втрат електроенергії ( $C_e$ );
- інші експлуатаційні витрати ( $C_{in}$ ).

Таким чином, річні експлуатаційні витрати складуть:

$$C = C_a + C_3 + C_m + C_e + C_{in} \quad (5.2)$$

Відповідно нам необхідно знайти два показники витрат,  $C_1$  та  $C_2$ :

$$C_1 = C_{a1} + C_{31} + C_{m1} + C_{e1} + C_{in1} \quad (5.3)$$

$$C_2 = C_{a2} + C_{32} + C_{m2} + C_{e2} + C_{in2} \quad (5.4)$$

Отже розрахуємо значення різноманітних витрат щоб скористатися формулами (5.3) та (5.4)

#### 5.4 Розрахунок експлуатаційних та амортизаційних витрат.

Загально прийнята практика визначення амортизаційних витрат для нового електричного обладнання, це щорічні відрахування у розмірі 7.8% від величини капіталовкладень. Отже для  $C_{a1}$  маємо:

$$C_{a1} = \frac{K_1}{100} \cdot 7,8 \quad (5.5)$$

Тобто

$$C_{a1} = \frac{440000}{100} \cdot 7,8 = 34320,00 \text{ грн.}$$

Відповідно для  $C_{a2}$ :

$$C_{a2} = \frac{K_2}{100} \cdot 7,8 \quad (5.6)$$

Підставивши значення  $K_2$  отримаємо:

$$C_{a1} = \frac{635000}{100} \cdot 7,8 = 49530,00 \text{ грн.}$$

Також до експлуатаційних витрат належать витрати на планові ремонти. Через збільшення інтервалів між ремонтами та скорочення їх тривалості для оціночних розрахунків витрат на технічне обслуговування та ремонт модернізованих систем прийнято рахувати експлуатаційні витрати як 3,0% від загальних капіталовкладень, а для немодернізованих систем цей показник складає 5,0% від капіталовкладень:

$$C_{m1} = \frac{K_1}{100} \cdot 5,0 \quad (5.7)$$

$$C_{m1} = \frac{440000}{100} \cdot 5,0 = 22000,00 \text{ грн.}$$

$$C_{m2} = \frac{K_2}{100} \cdot 3,0 \quad (5.8)$$

$$C_{m2} = \frac{635000}{100} \cdot 3,0 = 19050,00 \text{ грн.}$$

Як можна побачити, то попри більш великі капітальні вкладення на модернізовані системи витрати на їх технічне обслуговування та ремонт можуть бути меншими ніж на обслуговування та ремонт немодернізованих систем, що також сприяє впровадженню модернізації обладнання на підприємствах.

## 5.5 Витрати на електроенергію.

Для оцінки витрат системи на електроенергію є загальноприйнята формула яка враховує потужність системи, тривалість її роботи і відповідно тарифну ставку на електроенергію.

Для показника  $C_e$  вона має вигляд:

$$C_e = P_{cuc} \cdot t_{zm} \cdot n_{pz} \cdot k_{тар} \quad (5.9)$$

де  $P_{cuc}$  – потужність споживання системою за 1 годину у кВт;

$t_{zm}$  – тривалість роботи системи на протязі однієї робочої зміни в годинах;

$n_{pz}$  – кількість робочих змін на протязі одного року;

$k_{тар}$  – тарифна ставка за 1 кВт спожитої електроенергії.

Для розрахунків прийнято вважати тривалість робочої зміни тривалістю 8 годин, а кількість робочих змін на рік, в середньому, приймають 265 змін.

Підставимо ці значення та значення потужності нашої системи до формули (5.9) і отримаємо значення для  $C_{el}$ :

$$C_{el} = 132 \cdot 8 \cdot 265 \cdot 2,64 = 738777,00 \text{ грн.}$$

Отже це річні витрати на електроенергію для системи потужністю 132 кВт, яка працює по схемі прямого пуску. За даними досліджень виробників перетворювачів частоти, таких як Siemens та Schneider Electric, економія електроенергії при використанні ПЧ може сягати 45% в залежності від режиму роботи електродвигуна. Для електродвигунів працюючих у складі компресорних станцій, вентиляційних систем, різноманітного насосного обладнання, показник економії в середньому становить 30%. Тому грошові витрати на електроенергію модернізованої системи визначимо за формулою:

$$C_{e2} = C_{el} - \frac{C_{el}}{100} \cdot 30 \quad (5.10)$$

Підставивши сюди значення  $C_{el}$  отримані за формулою (5.9) отримаємо:

$$C_{e2} = 738777 - \frac{738777}{100} \cdot 30 = 517144,00 \text{ грн.}$$

### 5.6 Річний фонд заробітної плати.

Для подальших розрахунків нам необхідно визначити річний фонд заробітної плати, який буде витратися на оплату праці обслуговуючого персоналу. Обслуговувати компресорну установку повинна бригада яка складається щонайменше з двох працівників, які обіймають посаду слюсаря та мають розряд не менше третього.

Щоб визначити розмір річного фонду заробітної плати треба враховувати різноманітні коефіцієнти надбавок, премій, а також відрахувань до фонду соціального страхування. За основу береться мінімальна тарифна ставка у розмірі 3195 грн.

Враховуючи тарифний коефіцієнт за розряд, який для 3-го розряду становить 1,23 ми отримаємо мінімальну тарифну ставку для слюсаря 3-го розряду:

$$T_{\text{min}} = 3195 \cdot 1,23 = 3929,85 \text{ грн.}$$

Ми отримали мінімальну базову тарифну ставку від якої вже розраховуються інші коефіцієнти.

Один з них, це надбавка за професійну діяльність, яка складає 10% від  $T_{\text{min}}$ :

$$ПД = \frac{T_{\text{min}}}{100} \cdot 10 = 392,98 \text{ грн.}$$

Враховуючи те що обслуговування компресорної установки належить до виконання робіт у шкідливих умовах, то до розрахунку фонду заробітної плати треба включити надбавочний коефіцієнт за шкідливі умови який становить 17% від суми нарахувань, тобто:

$$ШУ = \frac{T_{\text{min}} + ПД}{100} \cdot 17 = 734,88 \text{ грн.}$$

Підсумувавши ці значення ми отримаємо постійну місячну заробітну плату МП, від суми якої можуть сплачуватись премії у розмірі 20%.

$$МП = T_{\text{min}} + ПД + ШУ \quad (5.11)$$

$$МП = 3929,85 + 392,98 + 734,88 = 5057,71 \text{ грн.}$$

А з урахуванням премії, яка становить:

$$Mnp = \frac{МП}{100} \cdot 20 = \frac{5057,71}{100} \cdot 20 = 1011,54 \text{ грн.}$$

Отримаємо загальний розмір заробітної плати:

$$Ззаг = МП + Mnp \quad (5.12)$$

$$Ззаг = 5057,71 + 1011,54 = 6069,25 \text{ грн.}$$

Відрахування до фонду соціального страхування становлять 22% від *Ззаг*:

$$Вфсс = \frac{Ззаг}{100} \cdot 22 \quad (5.13)$$

$$Вфсс = \frac{6069,25}{100} \cdot 22 = 1335,24 \text{ грн.}$$

У підсумку, для річного фонду заробітної плати маємо:

$$C_3 = (Ззаг + Вфсс) \cdot 12 \quad (5.14)$$

$$C_3 = (6069,25 + 1335,24) \cdot 12 = 88853,88 \text{ грн.}$$

В нашому випадку показник  $C_3$  співпадає для обох варіантів систем, тобто:

$$C_{31} = C_{32} = C_3 \quad (5.15)$$

Також, від розміру річної заробітної плати  $C_3$  розраховується показник витрат  $C_{in}$ , на інші експлуатаційні витрати, який становить 5,0% від  $C_3$  для немодернізованих систем і відповідно 3,0% від  $C_3$ , для модернізованих.

Тобто:

$$C_{in1} = \frac{C_3}{100} \cdot 5 \quad (5.16)$$

$$C_{in2} = \frac{C_3}{100} \cdot 3 \quad (5.17)$$

Підставивши значення отриманні в формулі (5.14) отримаємо:

$$C_{in1} = \frac{88853,88}{100} \cdot 5 = 4442,69 \text{ грн.}$$

$$C_{in2} = \frac{C_3}{100} \cdot 3 = 2665,62 \text{ грн}$$

### **5.7 Терміни окупності витрат на модернізацію.**

Тепер ми маємо усі необхідні розрахунки для визначення параметрів  $C_1$  та  $C_2$  які потрібні для визначення терміну окупності.

Отже підставивши до формул (5.3) та (5.4) наступні значення:

$$C_{a1} = 34320,00 \text{ грн.};$$

$$C_{a2} = 49530,00 \text{ грн.};$$

$$C_3 = 88854,00 \text{ грн.};$$

$$C_{m1} = 22000,00 \text{ грн.};$$

$$C_{m2} = 19050,00 \text{ грн.};$$

$$C_{e1} = 738777,00 \text{ грн.};$$

$$C_{e2} = 517144,00 \text{ грн.};$$

$$C_{in1} = 4443,00 \text{ грн.};$$

$$C_{in2} = 2666,00 \text{ грн.};$$

Отримаємо для  $C_1$  і  $C_2$  значення

$C_1 = 888394,00$  грн.

$C_2 = 677244,00$  грн.

Тоді термін окупності становитиме:

$$T_{ок} = \frac{K_2 - K_1}{C_1 - C_2} = \frac{635000 - 440000}{888394 - 677244} = \frac{195000}{211150} = 0,93 \text{ року.}$$

Отже термін окупності вкладень для впровадження даної модернізації становить лише 0,93 року, або приблизно 11 місяців. Такий показник є дуже гарним і може бути гарним аргументом за проведення модернізації, та впровадження різноманітних науково-технічних рішень які підвищують ефективність та економічність вироблення кінцевої продукції.

## ВИСНОВКИ

1. Проаналізовані основні галузі використання та типові технічні рішення електроприводів компресорних станцій. Це дозволило ознайомитись з сучасними конструкціями, системами електроприводу та автоматизації для конкретно обраної компресорної станції, а також сформулювати основні вимоги до електроприводу, системи автоматичного керування обраного виду компресорної станції.

2. Був проведений розрахунок тягових зусиль електроприводу, а також розрахунок потужності електродвигуна. Завдяки цьому побудували навантажувальну діаграму електроприводу та здійснили вибір двигуна необхідної потужності. Було обрано конкретний асинхронний двигун серії AIP355S8Y3 та визначені його основні параметри, а також проведено перевірку обраного двигуна по перевантажувальній здатності. Це дало змогу обрати перетворювач частоти необхідної потужності та струму серії SPLC-AT20-132G/160P-4.

3. Розроблена математична модель непрямого векторного керування АД. Розраховано параметри схеми заміщення обраного асинхронного двигуна серії AIP355S8Y3.

4. Проведені розрахунки, необхідні для дослідження динамічних та статичних режимів електромеханічної системи шляхом моделювання.

5. Отримані висновки свідчать про високі показники якості розробленого електроприводу і його відповідність характеристикам, які були поставлені в проекті.

## ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Електропривод: Підручник / Ю. М. Лавріненко, П. І. Савченко, О. Ю. Синявський, Д. Г. Войтюк, В. В. Савченко, І. М. Голодний; ліра, 2021 р., 532 с.
2. А. А. Видмиш, Л. В. Ярошенко. Основи електропривода. Теорія та практика. Частина 1. / Навчальний посібник. – Вінниця: ВНАУ, 2020. – 387 с.
3. М. О. Осташевський, О. Ю. Юр'єва . Електричні машини і трансформатори. Під ред. Мілих В. І., 2022р., 452 с.
4. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи: Навчальний посібник/ За ред. М.Г.Поповича. – К.: Либідь, 2005. – 672 с.
5. Електромеханічні системи автоматизації та електропривод (теорія і практика): Навчальний посібник/ За ред. М.Г.Поповича, В.В.Кострицького. – К.: КНУТД, 2008. – 408 с.
6. Автоматизований електропривод ч. 2 [Електронний ресурс]: навчальний посібник для студентів освітньої програми «Електромеханічні системи автоматизації, електропривод та електромобільність» спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / В.І. Теряєв. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 204 с.
7. Технічні характеристики АІР355S8У3.  
Режим доступу: <https://ua-motor.com/product/air-355s8/>
8. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи / За редакцією М.Г.Поповича та О.Ю.Лозинського / Навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів, які навчаються за напрямом „Електромеханіка”. – К.: Либідь, 2005. -680 с.
9. Допустимі довготривалі струми для проводів, шнурів, кабелів з гумовою або пластмасовою ізоляцією. Витяг з нормативних акті України  
Режим доступу: [http://norma.org.ua/document/legislation/PUE7/1\\_3\\_2.php#google\\_vignette](http://norma.org.ua/document/legislation/PUE7/1_3_2.php#google_vignette)

11 Системи програмного та слідкуючого керування рухом [Електронний ресурс]: підручник для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», спеціалізації «Електромеханічні системи автоматизації, електропривод та електромобільність» / В.І.Теряєв, С.В.Король. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 150 с.

12. Розробка та дослідження електромеханічних систем автоматизації та складових електропривода / М.Г.Попович, В.І.Кострицький та ін. - Навчальний посібник з грифом МОН України. – К: КНУТД, 2011. – 492 с.

13. Електричні машини. Асинхронний двигун : метод. вказівки до виконання курсової роботи: бакалаврів спец. 141 "Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка" / Є. П. Штепа, О. Ю. Розіна ; Каф. електромеханіки та мехатроніки. — Одеса: ОНТУ, 2024. — 38 с.

Режим доступу: <https://elc.library.ontu.edu.ua/library-w/DocumentDescription?docid=OdONANT.2254930>

14. Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів. Поточна редакція. — Редакція від 21.02.2017.

Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1143-06#Text>

15. Лазарєв Ю. Ф. Довідник з MATLAB / Електронний навчальний посібник з курсового і дипломного проектування. – К.: НТУУ "КПІ", 2013. – 132 с.

16. ПЧ SPLC-AT20-132G/160P-4 manual                      Режим доступу:  
<https://shop.spc.com.ua/ua/p1429994338-splc-at20-132g160p4.html>