

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
(повне найменування закладу вищої освіти)

Навчально-науковий інститут інформаційних технологій і робототехніки
(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра автоматики, електроніки та телекомунікацій
(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи

магістр

(ступінь вищої освіти)

на тему Модернізація систем керування електроприводом компресорних установок середньої потужності в системах газопостачання

Виконав: студент б курсу, групи 601МЕ
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Шеремет М.О.

(прізвище та ініціали)

Керівник Леві Л.І.

(прізвище та ініціали)

Рецензент Галай В.М.


(прізвище та ініціали)

Полтава - 2025 рік

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
Інститут Навчально-науковий інститут інформаційних технологій та
робототехніки
Кафедра Автоматики, електроніки та телекомунікацій
Ступінь вищої освіти Магістр
Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри автоматики,
електроніки та телекомунікацій


« 02 » 09 2024 р. О.В. Шефер

ЗАВДАННЯ

НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Шеремету Михайлу Олександровичу

1. Тема проекту (роботи) «Модернізація систем керування електроприводом компресорних установок середньої потужності в системах газопостачання».

Керівник проекту (роботи) Лєві Леонід Ісаакович, д.т.н., професор.

Затверджена наказом вищого навчального закладу від 09.08.2024 року №818-ф.а

2. Строк подання студентом проекту (роботи) 19.12.2024 р.

3. Вихідні дані до проекту (роботи): Технологічна документація на компресор ЗВШ1.6-3,1/46.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): Аналіз систем керування електроприводом компресора. Модернізація системи керування електроприводом компресора. Синтез системи керування електроприводом компресора. Вибір частотного перетворювача.

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

1) Контактні комутаційні апарати;

- 2) Безконтактні комутаційні апарати;
- 3) Схема керування електричним двигуном з використанням електроконтактного манометра;
- 4) Графік залежності тиску у системі від часу;
- 5) Блок-схема системи керування КУ;
- 6) Графік залежності продуктивності компресорної установки від завдання системи керування;
- 7) Блок-схема автоматичної системи керування компресорною станцією (АСК КС);
- 8) Основні елементи КУ та схема підключення;
- 9) Загальні висновки.

6. Дата видачі завдання 02.09.2024р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| Пор. № | Назва етапів магістерської роботи | Термін виконання етапів роботи | | | Примітка (плакати) |
|--------|---|--------------------------------|-----|------|--------------------|
| 1 | Аналіз систем керування електроприводом компресора | 07.10.24 | | 15% | Пл.1 |
| 2 | Безконтактні комутаційні апарати електроприводу компресора | 16.10.24 | I | 25% | Пл.2 |
| 3 | Модернізація системи керування електроприводом компресора | 05.11.24 | | 40% | Пл.3 |
| 4 | Аналіз та модернізація алгоритму керування електроприводом компресора | 12.11.24 | | 50% | Пл.4 |
| 5 | Синтез системи керування електроприводом компресора | 19.11.24 | II | 60% | Пл.5 |
| 6 | Автоматизація компресорних станцій | 26.11.24 | | 75% | Пл.6 |
| 7 | Вибір частотного перетворювача | 11.12.24 | | 90% | Пл.7 |
| 8 | Оформлення пояснювальної записки | 19.12.24 | III | 100% | Пл.8 |

Магістрант



(підпис)

Шеремет М.О.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи



(підпис)

Лєві Л.І.

(прізвище та ініціали)

ЗМІСТ

| | |
|---|----|
| ВСТУП..... | 6 |
| 1.АНАЛІЗ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ КОМПРЕСОРА..... | 9 |
| 1.1.Проблема пуску асинхронних двигунів..... | 9 |
| 1.2.Контактні комутаційні апарати електроприводу компресора..... | 10 |
| 1.3.Безконтактні комутаційні апарати електроприводу компресора..... | 14 |
| 1.4.Висновки за розділом..... | 27 |
| 2.МОДЕРНІЗАЦІЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ КОМПРЕСОРА..... | 28 |
| 2.1.Загальні вимоги до електроприводу компресорів..... | 28 |
| 2.2.Вимоги до процесу керування компресорною установкою..... | 31 |
| 2.3.Аналіз негативних факторів, що впливають на роботу компресорної установки..... | 33 |
| 2.4.Аналіз алгоритму керування електроприводом компресора..... | 37 |
| 2.5.Модернізація алгоритму керування електроприводом компресора..... | 40 |
| 2.6.Висновки за розділом..... | 43 |
| 3.СИНТЕЗ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА КОМПРЕСОРА..... | 44 |
| 3.1.Доцільність застосування частотного регулювання електродвигунів...44 | 44 |
| 3.2.Скалярне регулювання асинхронним двигуном..... | 46 |
| 3.3.Векторне регулювання асинхронним двигуном | 47 |
| 3.4.Система керування електроприводом компресора..... | 53 |
| 3.5.Автоматизація компресорних станцій..... | 58 |
| 3.6.Висновки за розділом..... | 64 |
| 4.ВИБІР ЧАСТОТНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА | 66 |
| 4.1.Вихідні дані та умови вибору частотного перетворювача компресора..... | 66 |
| 4.2.Функціональні можливості сучасних частотних перетворювачів..... | 71 |

| | |
|--|-----|
| 4.3.Додаткові пристрої для частотно-керованого електроприводу компресора | 76 |
| 4.4.Вибір моделі частотного перетворювача..... | 77 |
| 4.5.Висновки за розділом..... | 80 |
| ВИСНОВКИ..... | 81 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ..... | 82 |
| Додаток А..... | 84 |
| Додаток Б..... | 101 |
| Додаток В..... | 108 |

ВСТУП

Актуальність роботи. На промислових підприємствах використовується значна кількість електричних двигунів із застарілим пуско-регулювальним обладнанням, яке не дозволяє керувати електроприводом у широких межах, та потребує частого технічного обслуговування. Для забезпечення покращення технічних характеристик необхідно провести модернізацію.

Науково-технічний прогрес не стоїть на місці і у сфері керування електроприводом. На заміну застарілим системам генератор-двигун для зміни швидкості обертання асинхронних та синхронних електричних двигунів створили перетворювачі частоти.

Перетворювачами частоти називають електронні пристрої, що застосовуються для зміни швидкості та обертового моменту асинхронних та синхронних електричних двигунів за допомогою подання змінених частоти та напруги живлення на двигун. Як правило, вони застосовуються у системах автоматичного керування таким обладнанням, як насоси, вентилятори, компресори, конвеєри, тощо.

Через необхідність регулювати швидкість обертання електричних двигунів використовують перетворювачі частоти. У переважній більшості первинних джерел живлення (промислова та побутова мережі змінної напруги, контактні мережі електричного транспорту, акумулятори) рівень вихідної напруги та її частота є незмінними, а для зміни швидкості обертання електричних двигунів змінного струму необхідно змінити частоту мережі живлення.

При експлуатації двигунів змінного струму для зміни швидкості обертання використовують перетворювачі частоти (ПЧ, частотні перетворювачі, «частотники»). Саме вони розвивалися останнім часом

найбільш динамічно та повністю перевернули усталені десятиліттями закони використання електроприводу.

Переваги частотних перетворювачів:

1. Енергоефективність: одна з базових переваг застосування перетворювачів частоти - це здатність забезпечувати енергоефективність. При застосуванні перетворювачів частоти можна керувати швидкістю обертання електричного двигуна. Це дозволяє зменшити споживання електроенергії та поліпшити енергоефективність.

2. Регулювання швидкості обертання: перетворювачі частоти можуть плавно регулювати швидкість обертання електричного двигуна змінного струму. Через наявність цієї функції вони є ідеальним вибором для механізмів, де потрібна зміна швидкості обертання (наприклад, для регулювання процесів, або зниження зносу обладнання). Регулювання швидкості дає можливість точно налаштувати швидкість обертання електричного двигуна та підтримувати її на сталому рівні, що збільшує точність та якість його роботи і розширює можливі варіанти використання двигунів змінного струму, обладнаними перетворювачами частоти.

3. Збільшення терміну експлуатації: застосування перетворювачів частоти підвищує термін служби як електричного двигуна, так і механізма, який він приводить в рух. Це твердження виникає внаслідок того, що перетворювач частоти зменшує динамічні навантаження на двигун, що позитивно впливає на термін експлуатації обладнання.

4. Надійність: Так, як перетворювачі частоти проводять постійний моніторинг всіх основних електричних величин у реальному часі, при виникненні аварійного режиму роботи двигуна перетворювач частоти вимкне живлення і запобіжить подальшому розвитку аварійної ситуації.

5. З'являється можливість використовувати більш потужні споживачі у електричних мережах з обмеженою потужністю за рахунок зменшення пускових струмів, що дає можливість використовувати менш потужні трансформатори, в яких менші втрати на струм холостого ходу і вони самі будуть значно дешевше. Як наслідок цього – покращуються економічні показники.

6. Використання у сучасних перетворювачах частоти мікропроцесорного керування дозволяє об'єднувати кілька перетворювачів частоти в одну систему та підвищити рівень автоматизації технологічного процесу.

Метою роботи є дослідження та модернізація системи керування електроприводом компресора ЗВШ1.6-3,1/46 для підвищення енергоефективності та збільшення терміну експлуатації електродвигуна та компресорної установки.

Основними завданнями дослідження є:

Аналіз систем керування електроприводом компресора;

Модернізація системи керування електроприводом компресора;

Синтез автоматизованої системи електропривода компресора;

Вибір частотного перетворювача.

Практична значимість роботи полягає в тому, що на основі проведених досліджень вибраний ефективний спосіб керування асинхронним двигуном.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИМ ДВИГУНОМ КОМПРЕСОРА

1.1. Проблема пуску асинхронних двигунів

Загальновідомо, що прямий пуск електродвигуна супроводжується споживанням з мережі струму, що в 6-8 разів перевищує значення номінального струму. Тривалість протікання надструмів прямо пропорційна моменту інерції механізму, що приводиться в рух, і навантаженню на валу двигуна. Високі значення струму викликають суттєве нагрівання обмоток двигуна, що призводить до старіння ізоляції і, відповідно, до зниження терміну служби двигуна. Через нагрівання обмоток з'являються обмеження на кількість пусків двигуна. Крім того, високі пускові струми призводять до глибоких просадок напруги мережі живлення, що часто викликає "відпадання" контакторів і збої в ланцюгах керування. Ця проблема стає більш ваговою у мережах живлення з обмеженою потужністю, наприклад від дизель-генератора.

Особливо сильно зазначені проблеми виявляються під час пуску двигунів великої потужності. Імпульсні "переструми", що виникають при прямому пуску двигуна, створюють ударний електромагнітний момент, що передається через вал двигуна на механізм і викликає вібрації двигуна і механізму. Наслідком таких ударних навантажень є поломки валів, сполучних муфт, редукторів тощо.

Проблема струмових перевантажень при прямому пуску двигунів істотно ускладнюється механізмами з великим моментом інерції, де пуск стає зтяжним і струмове перевантаження існує протягом тривалого часу. Крім розігріву обмоток двигуна, тут виникає і перегрів силових кабелів двигуна, що призводить до необхідності використання кабелів більшого перерізу.

Описані недоліки притаманні також і схемам пуску двигуна з перемиканням обмоток "зірка-трикутник", з тією різницею, що тут

зменшуються амплітуди струмів і, дещо пом'якшуються негативні наслідки прямого пуску.

1.2. Контактні комутаційні апарати електроприводу компресора

Тривалий час керування електричними двигунами різної потужності здійснювалося лише в режимі «увімкнено – вимкнено», де базовим елементом цієї схеми керування був контактор (рис. 1.1).

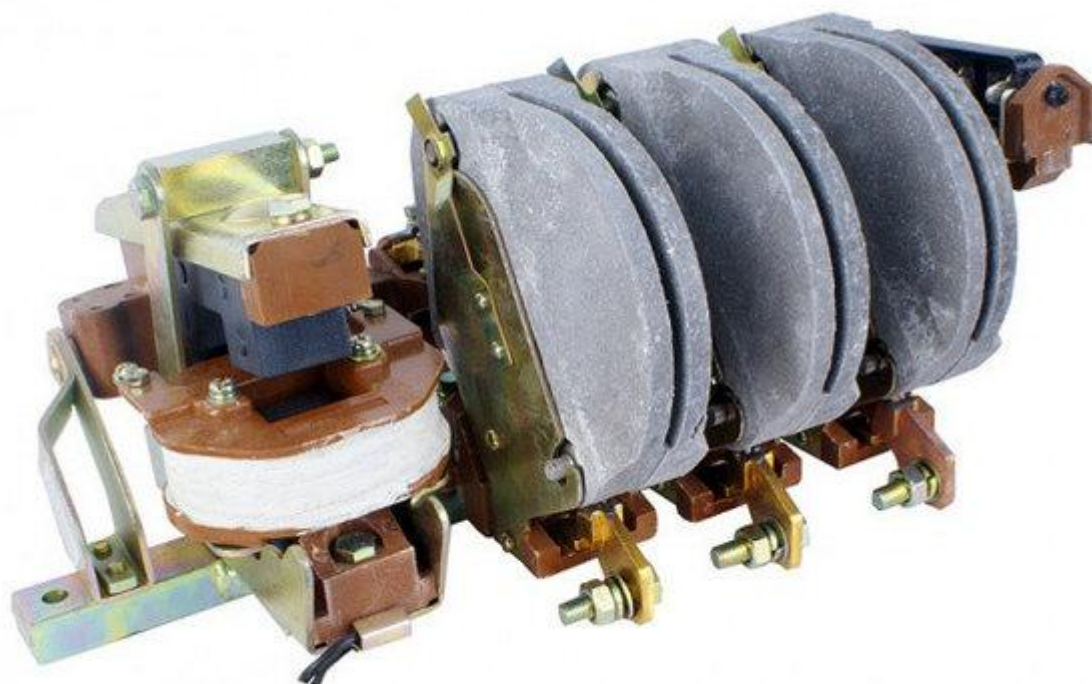


Рис. 1.1 – Зовнішній вигляд контактора

Контактор являє собою електричний апарат, призначений для частих комутацій силових електричних кіл. Замикання чи розмикання контактів контактора здійснюється найчастіше під впливом електромагнітного приводу.

Виробляють контактори з широким діапазоном технічних характеристик[1]:

- за номінальним струмом - від одиниць ампер до кількох кіло ампер

- за номінальною напругою силових контактів - від 27В до 2кВ
- за робочою частотою мережі змінного струму - від 50Гц до 10кГц
- за величиною напруги кіл керування - 12, 24, 48, 110, 220, 380В

Для полегшення пуску асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором використовують 2, 3, 4-швидкісні двигуни, або застосовують пуск за зниженої напруги. Зниження напруги досягається наступним шляхом:

- за допомогою автотрансформатора;
- за допомогою переключення обмоток із "зірки" на "трикутник";

Варто зазначити, що при зниженні напруги зменшується пусковий момент двигуна, при чому ця залежність квадратична ($M = U(n^2)$).

Використання 2, 3, 4-швидкісних двигунів як правило дорожче у реалізації через вартість такого двигуна.

При використанні автотрансформатора для пуску асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором на двигун подається знижена напруга, що зменшує пусковий струм. Після виходу двигуна на усталений режим положення автотрансформатора змінюють, тим самим підвищують напругу живлення. Ця дія повторюється доти, доки напруга живлення двигуна не буде мережевою. Цей спосіб керування потребує покупки автотрансформатора, та погіршує ККД установки за рахунок втрат енергії в ньому. Така схема керування має більше недоліків, ніж переваг.

Використання схеми "зірка – трикутник" (Star-Delta) [рис. 1.2] можливе лише коли напруга живлення двигуна – 380/660В, в інших випадках, коли живлення мотора було наприклад 220/380 - потрібно змінити напругу живлення мережі, для чого використовували трансформатор, а це у свою чергу підвищувало загальну вартість обладнання.

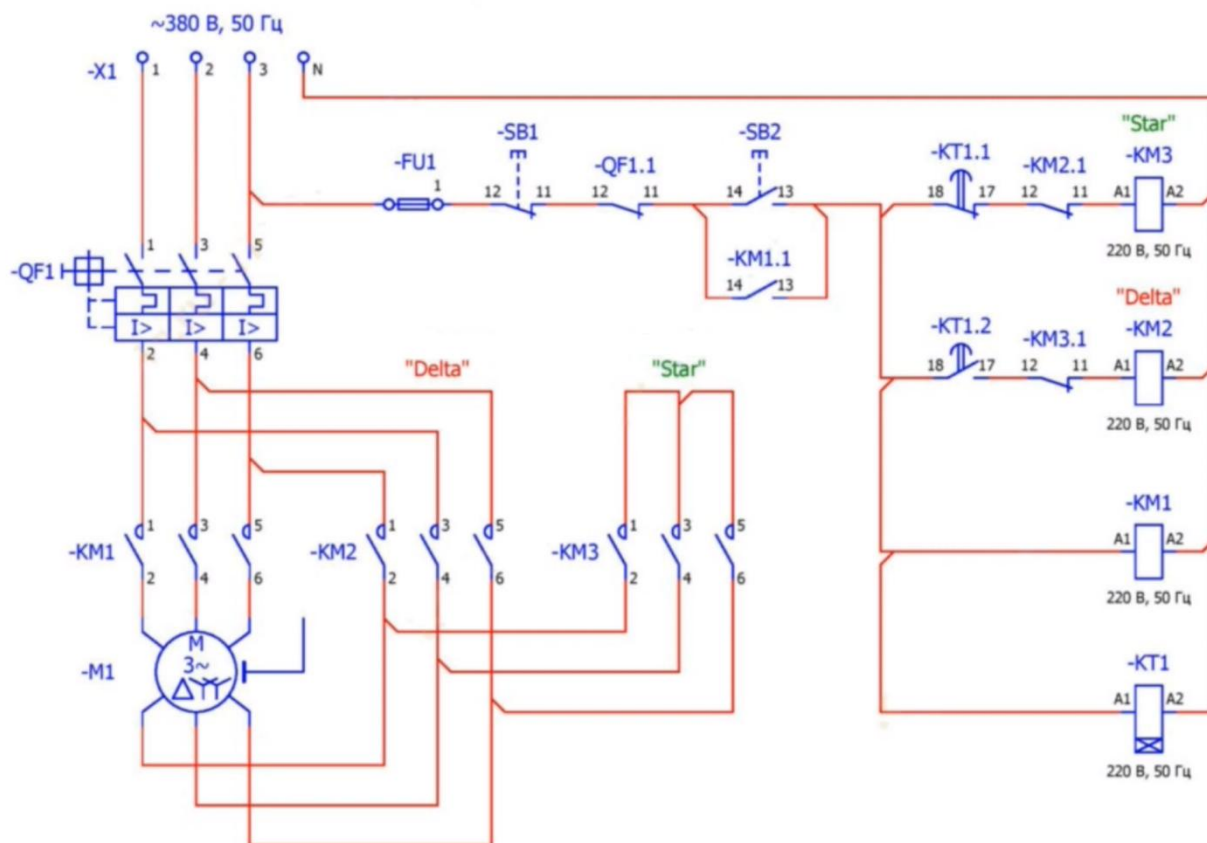


Рис. 1.2 – Електрична схема пуску електричного двигуна "зірка-трикутник"

Принцип роботи даної схеми: Для запуску двигуна потрібно натиснути кнопку SB2. При цьому подається напруга на котушки контакторів KM1 та KM3, реле часу KT1. Двигун розганяється, так як увімкнений за схемою "зірка". Після проходження певного часу, котрий встановлюється на реле часу KT1 (для того, щоб двигун набрав номінальні оберти), контакти 17 і 18 KT1.1 розмикаються, із котушки контактора KM3 знімається напруга, а контакти 17 і 18 KT1.2 замикаються, подається живлення на котушку контактора KM2 – тепер двигун працює за схемою "трикутник". Контакти 12 і 11 контакторів KM2.1 та KM3.1 – реалізація електричного блокування одночасного увімкнення контакторів KM2 і KM3. Для зупинки двигуна потрібно натиснути кнопку SB1. Для захисту кіл керування використано автоматичний вимикач QF1.1 та запобіжник FU1.

Отже, при такому способі пуску перед вмиканням живлення статор вмикають за схемою "зірка" а коли двигун набере номінальні оберти, обмотки статора переключають на схему "трикутник".

Таким чином, при пуску двигуна напруга на статорі в $\sqrt{3}$ разів менше номінальної (лінійної) напруги. Застосовуючи відомі співвідношення для лінійних та фазних напруг і сил струмів трифазної мережі, отримуємо відношення пускових сил струмів:

$$\frac{I_{пуск}^Y}{I_{пуск}^\Delta} = \frac{\frac{U_{л}}{\sqrt{3}} * \frac{1}{Z}}{\sqrt{3} * \frac{U_{л}}{Z}} = \frac{1}{3} \quad (1.1)$$

де: $I_{пуск}^Y$ – пускова сила струму при з'єднанні обмоток "зіркою", [А]; $I_{пуск}^\Delta$ – пускова сила струму при з'єднанні обмоток "трикутником", [А]; $U_{л}$ – лінійна напруга мережі живлення, [В]; Z – опір фази двигуна, [Ом].

З формули (1.1) видно, що пуск двигуна з короткозамкненим ротором способом переключення обмоток із "зірки" на "трикутник" зменшує пусковий струм у три рази.

Переваги даної схеми керування:

- Низька ціна;
- Надійність пуско-регулювального апаратури;
- Простота монтажування та підключення;
- Низькі кваліфікаційні вимоги до електротехнічного персоналу, які монтували, експлуатували, обслуговували та ремонтували це обладнання;
- Стійкість до імпульсних перенапруг, короткочасних перевантажень.

Недоліки:

- Неможливість регулювати потужність, швидкість обертання електричного двигуна;

- Контактори потребували частого технічного огляду та ремонту для продовження їх нормальної роботи;
- Чутливість до просадок напруги мережі живлення, як наслідок – відпадання контакторів і збої в ланцюгах керування;
- Шуми та вібрації під час роботи;
- Заборона встановлення у вибухонебезпечних, пожежонебезпечних приміщеннях.

На базі контакторів неможливо реалізувати пряме регулювання потужності та швидкості обертання, тому для автоматизації технологічного процесу подачі газу компресором в магістральний трубопровід та задовільнити вимоги за величиною тиску та кількості газу (які повинні бути у чітко встановлених межах) використовується метод регулювання потужності за часом.

Коли тиск опускається нижче встановленого мінімального значення датчик тиску подає сигнал на кола керування контактором, і ел. двигун вмикається.

Тиск газу у системі зростає і після того, як він досягне встановленого максимального значення датчик тиску подає на кола керування контактором сигнал і ел. двигун вимикається.

З точки зору механічної зносостійкості часті вмикання та вимикання збільшують ризик поломки компресора, адже він завжди вмикається при важких умовах (конструктивні особливості), зменшують ресурс компресора, що негативно впливає на економічну складову виробництва.

1.3. Безконтактні комутаційні апарати електроприводу компресора

Досягнення силової електроніки дозволили створити безконтактні комутаційні апарати (БКА). БКА - пристрої, призначені для включення і відключення (комутації) електричних ланцюгів без фізичного розриву самого

ланцюга. Основою для побудови безконтактних апаратів служать різні елементи з нелінійним електричним опором, величина якого змінюється в досить широких межах, в даний час це - транзистори, тиристри, а раніше використовувалися магнітні підсилювачі. Одним з часто використовуваних видів БКА є тиристорний пускач [ТП] (рис. 1.3).



Рис. 1.3 – Зовнішній вигляд тиристорного пускача

ТП – це електронний регулятор напруги, основним елементом якого є тиристор. Основне призначення пристрою плавного пуску - плавний розгін асинхронного двигуна до номінальної швидкості шляхом безступінчастого керованого підвищення напруги на статорі двигуна.

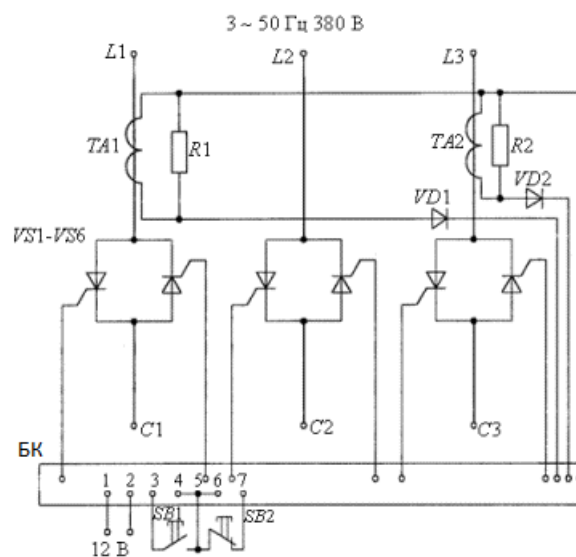


Рис. 1.4 – Принципова схема тиристорного пускача

Регулювання напруги здійснюється системою імпульсно-фазового керування за допомогою зміни кута відкриття тиристорів (рис 1.5). Чим більший кут відкриття тиристора – тим більше буде значення напруги, що прикладається до двигуна, але частота мережі живлення залишається незмінною.

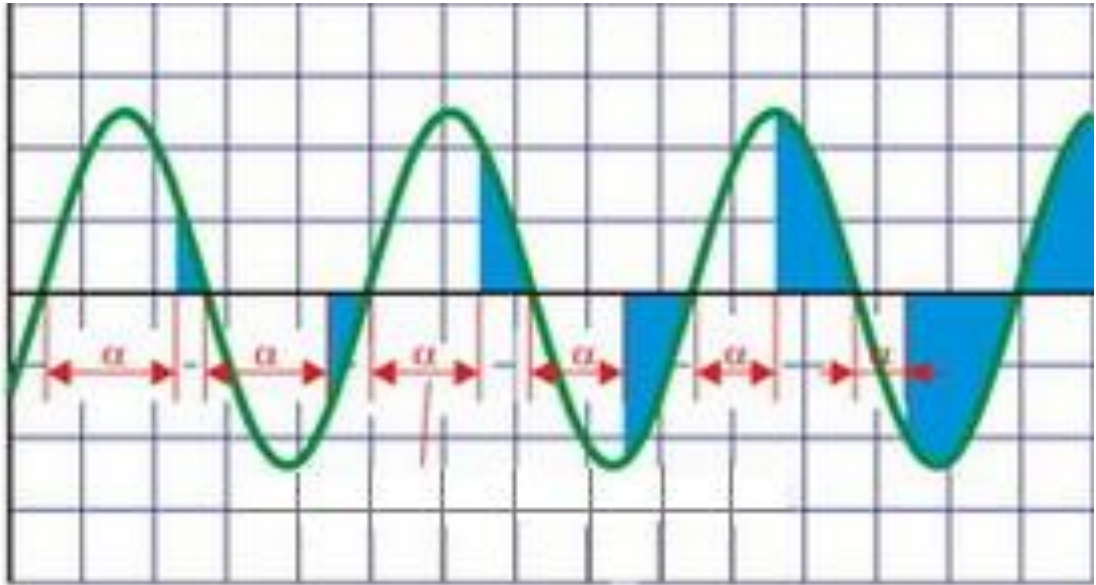


Рис. 1.5 – Формування вихідної напруги ТП зміною кута відкриття тиристорів

Так як обертальний момент асинхронного двигуна пропорційний квадрату напруги, то одночасно з обмеженням напруги відбувається і зниження ударних пускових моментів. Завдяки плавному підвищенню напруги на двигуні забезпечується зниження пускових струмів ($I_{\text{пуск}} = 2 \dots 4 I_{\text{ном}}$), при цьому час пуску двигуна залишається малим, хоч і збільшується у порівнянні з прямим пуском.

Значення пускового струму визначається налаштуванням початкового та кінцевого кутів відкриття тиристорів, а також необхідною тривалістю наростання напруги (часом плавного пуску). При різних параметрах струмообмеження двигуна у процесі пуску виходять різні механічні характеристики двигуна. При цьому слід зазначити, що незважаючи на наявність навантаження $I_{\text{пуск}} = 2 \dots 3 I_{\text{ном}}$, при низьких швидкостях обертання

(на початку пуску) момент, що розвивається двигуном, істотно нижчий за номінальний.

Цей факт призводить до того, що застосування ТП для пуску механізмів з великим статичним моментом на валу при низьких швидкостях обертання можливе лише з суттєвим перевантаженням. Це перевантаження може бути порівняне з струмовим навантаженням, що виникає при прямому пуску таких механізмів.

Слід також враховувати, що незалежно від значення та характеру зміни навантаження на валу, пуск двигуна з використанням ТП при $I_{\text{пуск}} \leq 1,5I_{\text{ном}}$ практично неможливий.

Слід зазначити, що застосування в ТП системи імпульсно-фазового керування призводить до погіршення гармонійної складової струму, що споживається з мережі. При роботі ТП таке погіршення проявляється тільки в режимах плавного пуску та плавної зупинки двигуна, тоді як при роботі двигуна на номінальній швидкості додаткове гармонічне навантаження на мережу відсутнє.

Деякі виробники пристроїв плавного пуску заявляють про наявність вбудованої функції енергозбереження, що дозволяє при зниженні навантаження на двигун досягти додаткової економії електроенергії. Такої економії вони досягають шляхом пониження напруги на обмотках двигуна, проте при цьому замовчується, що в таких режимах зростає гармонійне навантаження на мережу і з'являються додаткові втрати електроенергії, що виникають при комутації тиристорів. Крім того, при роботі в такому режимі енергозбереження струм у двигуні відрізняється від синусоїдального, зростає споживання реактивної потужності, виникають пульсації моменту і швидкості обертання, що зводить нанівець всі переваги режиму.

Одним з обмежень на застосування ТП є значення моменту інерції механізму. У разі надто великого моменту інерції пуск двигуна стає

затяжним (понад 15 секунд); при цьому $I_{\text{пуск}} = 2,5...3I_{\text{ном}}$ протікає протягом тривалого часу, що може призвести до перегріву як двигуна, так і силової частини самого ТП. Тривалий пуск за допомогою ТП є марним за енергетичними, тепловими та технологічними параметрами. ТП лінійно змінює амплітуду напруги, що підводиться на обмотки статора електродвигуна, при цьому частота напруги залишається мережевою (50 Гц). В результаті на низьких швидкостях обертання через підвищене ковзання майже вся енергія, що подається на електродвигун витрачається на тепловиділення.

Оскільки момент електродвигуна має квадратичну залежність від напруги, то пуск двигуна відбудеться лише тоді, коли момент двигуна стане більшим за момент навантаження. Тому при заданні великого часу розгону частина цього часу потрапляє на ділянку з великим ковзанням та малим моментом на валу двигуна, що є неприпустимим з погляду енергетичних та теплових характеристик.

Найсуттєвіше обмеження на застосування ТП накладають принципово обмежені функціональні можливості. При зміні напруги значення критичного ковзання не змінюється, тому максимальний момент за будь-яких змін напруги відповідає значенню ковзання $s = 0,1...0,2$. Цим визначається порівняно вузький діапазон регулювання швидкості обертання валу двигуна, який може забезпечити ТП.

Для пуску компресора необхідний значний обертальний момент, а як відомо обертальний момент асинхронного двигуна пропорційний квадрату напруги. ТП зменшує діючу напругу, а отже і пусковий момент зменшується в квадраті, тому це обладнання не підходить для пуску компресора, тим більше частих пусків тим паче не на вільний вихід. Навіть при використанні їх для пуску компресора електричний двигун швидко перегріється через недостатність пускового моменту (адже плавний пуск займає кілька секунд і цей час через обмотки двигуна буде протікати струм короткого замикання) і

відповідно буде спрацьовувати тепловий захист двигуна, або спрацює автоматичний вимикач. Як наслідок компресор не можна буде увімкнути доти, доки двигун не охолоне, або доки черговий персонал не увімкне автоматичний вимикач. Такі варіанти недопустимі через значний час простою обладнання та необхідність втручання оперативного персоналу для відновлення роботи двигуна.

Тому ТП не можна застосовувати у технологічних процесах, де потрібне постійне регулювання швидкості обертання двигуна чи технологічного параметра (наприклад, тиск у трубопроводі). Для таких завдань оптимальним рішенням є використання перетворювачів частоти.

Необхідно відзначити, що застосування перетворювачів частоти дозволить здійснити плавний пуск двигуна при струмі, що не перевищує значення номінального струму двигуна. У таких механізмах тільки застосування перетворювача частоти забезпечить плавний пуск і усуне всі неприємні аспекти, пов'язані з прямим пуском двигуна. Крім усунення струмових перевантажень, що призводять до перегріву двигуна і провалів напруги мережі, ТП забезпечують інші переваги, що визначаються областю їх застосування.

Переваги ТП у порівнянні з традиційними контактними [16]:

- Плавне регулювання потужності, яка підводиться до електроприймача
- Реалізація плавного безударного пуску і гальмування двигунів
- Висока електрична зносостійкість (15×10^6 циклів).
- Висока надійність і довговічність, зручність в експлуатації.
- Малий час вимикання (0,02 с)
- Обмеження струму
- Фазовмикання
- Відсутність дуги при комутаціях дозволяє їхнє застосування у вибухонебезпечних середовищах.

До недоліків ТП можна віднести:

- Складність схеми
- Великі габарити, вага
- Висока вартість
- Вузький діапазон регулювання швидкості обертання
- Під час пуску з'являється погіршення гармонійної складової струму

Частотні перетворювачі (або частотники) - це електронні пристрої, що використовуються для зміни швидкості та обертового моменту асинхронних та синхронних електродвигунів за допомогою подання змінених частоти та напруги живлення на двигун. Зазвичай вони використовуються в системах автоматичного керування, включаючи промислові та комерційні системи, такі як насоси, вентилятори, компресори, конвеєри та інші.

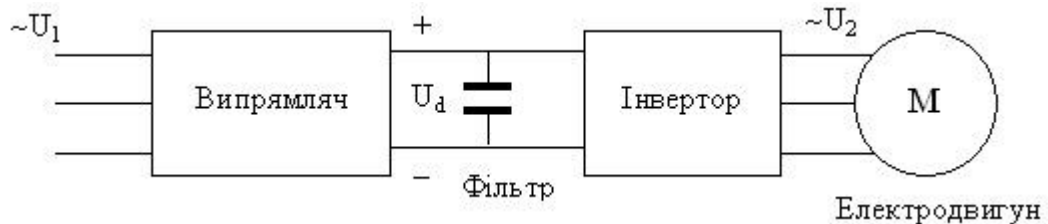


Рис. 1.6 – Структурна схема низьковольтного перетворювача частоти на IGBT транзисторах

Принцип роботи низьковольтного перетворювача частоти на IGBT транзисторах [9]:

Змінна напруга мережі живлення ($U_{вх.}$) з постійною амплітудою і частотою ($U_{вх} = \text{const}$, $f_{вх} = \text{const}$) надходить на керований або некерований випрямляч. Для згладжування пульсацій випрямленої напруги ($U_{випр.}$) використовується фільтр. Випрямляч та ємнісний фільтр утворюють ланку постійного струму. З виходу фільтра постійна напруга (U_d) надходить на вхід автономного імпульсного інвертора. Автономний інвертор сучасних низьковольтних перетворювачів виконується на основі біполярних силових

транзисторів з ізольованим затвором IGBT. В інверторі здійснюється перетворення постійної напруги (U_d) в трифазну імпульсну напругу змінної амплітуди та частоти. За сигналами системи управління кожна обмотка електричного двигуна приєднується через відповідні силові транзистори інвертора до позитивного та негативного полюсів ланки постійного струму.

Тривалість підключення кожної обмотки в межах періоду проходження імпульсів модулюється за синусоїдальним законом. Найбільша ширина імпульсів забезпечується в середині напівперіоду, а до початку та кінця напівперіоду зменшується. Таким чином, система управління забезпечує широтно-імпульсну модуляцію (ШІМ) напруги, що прикладається до обмоток двигуна. Амплітуда і частота напруги визначаються параметрами модулюючої синусоїдальної функції.

При високій частоті ШІМ (2...15 кГц) обмотки двигуна внаслідок їх високої індуктивності працюють як фільтр. Тому в них протікають практично синусоїдальні струми. У схемах перетворювачів з керованим випрямлячем зміна амплітуди напруги може досягатися регулюванням величини постійної напруги (U_d), а зміна частоти - режимом роботи інвертора.

При необхідності на виході автономного інвертора встановлюється фільтр для згладжування пульсацій струму. (У схемах перетворювачів на IGBT через низький рівень вищих гармонік у вихідній напрузі потреба у фільтрах практично відсутня.)

Таким чином, на виході перетворювача частоти формується трифазна (за потреби однофазна) змінна напруга змінної частоти і амплітуди ($U_{\text{вих}} = \text{var}$, $f_{\text{вих}} = \text{var}$).

Для правильної роботи частотника необхідно враховувати кілька факторів: тип двигуна, його потужність, номінальну частоту та напругу, а також необхідний діапазон швидкостей. Крім того, необхідно забезпечити

правильне налаштування параметрів частотного перетворювача та підбір оптимальних налаштувань залежно від конкретних умов експлуатації.

Існує три основних типи перетворювачів частоти: скалярні (V/F), векторні (FOC) і з прямим керуванням обертовим моментом (DTC). Кожен тип має свої сильні та слабкі сторони, тож вибір перетворювача залежить від конкретної задачі та типу двигуна.

Скалярні перетворювачі частоти (V/f)

Перетворювачі V/f, також відомі як скалярні перетворювачі, є найпростішим та найпоширенішим типом перетворювачів частоти. Вони працюють, підтримуючи фіксоване відношення напруги до частоти, яку зазвичай називають «відношенням V/f» [3]. При зміні частоти напруга регулюється пропорційно підтримки співвідношення V/f (рис. 1.7).

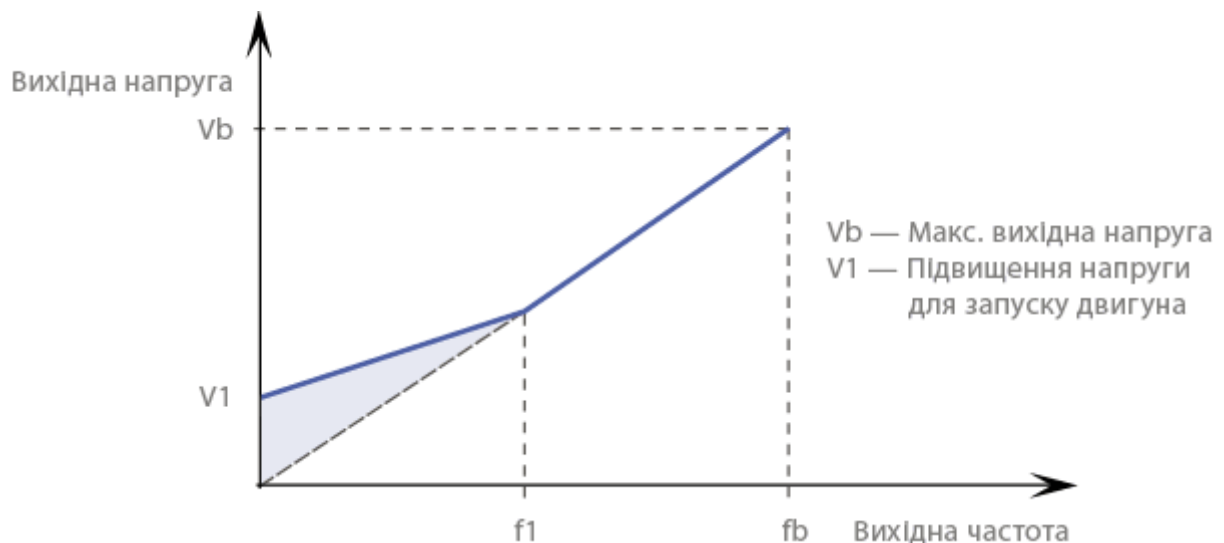


Рис. 1.7 – графік залежності вихідної напруги від вихідної частоти

Скалярні частотні перетворювачі зазвичай використовуються зі стандартними трифазними асинхронними двигунами, що мають постійний обертовий момент. Вони добре підходять для задач, де контроль швидкості не має вирішального значення (наприклад, вентилятори, насоси та конвеєри).

Векторні перетворювачі частоти

Векторні перетворювачі також відомі як перетворювачі з керуванням по полю (FOC). Вони більш досконалі ніж скалярні, бо використовують складніший алгоритм керування, який враховує магнітне поле двигуна і положення ротора. Це дозволяє більш точно контролювати швидкість і обертовий момент двигуна, а ще робить їх добре пристосованими для завдань, де вимагається високопродуктивне управління швидкістю: верстати, крани, робототехніка та будь-які інші застосування, де потрібна точна підтримка частоти обертання.

Векторні перетворювачі в свою чергу поділяються на 2 типи:

- Бездатчикове векторне управління (SFVC)
- Векторне управління у замкнутому контурі (CLVC)

Бездатчикове векторне управління (SFVC) [7]:

Це метод керування асинхронним двигуном, який використовує математичну модель для контролю за моментом і швидкістю двигуна. Він ґрунтується на вимірюванні струму та напруги, а також на обчисленні частоти та потужності мотора, щоб визначити його швидкість та положення ротора. У цьому методі не потрібно використання датчиків вимірювання положення ротора, що робить його більш економічним та зручним у встановленні. Натомість, SFVC використовує математичні алгоритми для обчислення положення ротора, визначаючи його на основі вимірних параметрів. Перевагою методу SFVC є можливість досягнення високої точності підтримання моменту та швидкості асинхронного двигуна. Крім того, цей метод також забезпечує більш плавний пуск та зупинку двигуна, а також покращену ефективність та економію енергії.

Частотні перетворювачі (SFVC) використовуються для керування конвеєрами, шпинделями верстатів та в інших завданнях де допустима

стабільність підтримки частоти обертання в межах $\pm 0,5\%$ від заданого значення.

Векторне управління у замкнутому контурі (CLVC)

Режим керування асинхронним двигуном із закритою петлею векторного контролю (CLVC) — це метод, який використовує інформацію зворотного зв'язку від датчиків для точного контролю швидкості та положення ротора двигуна.

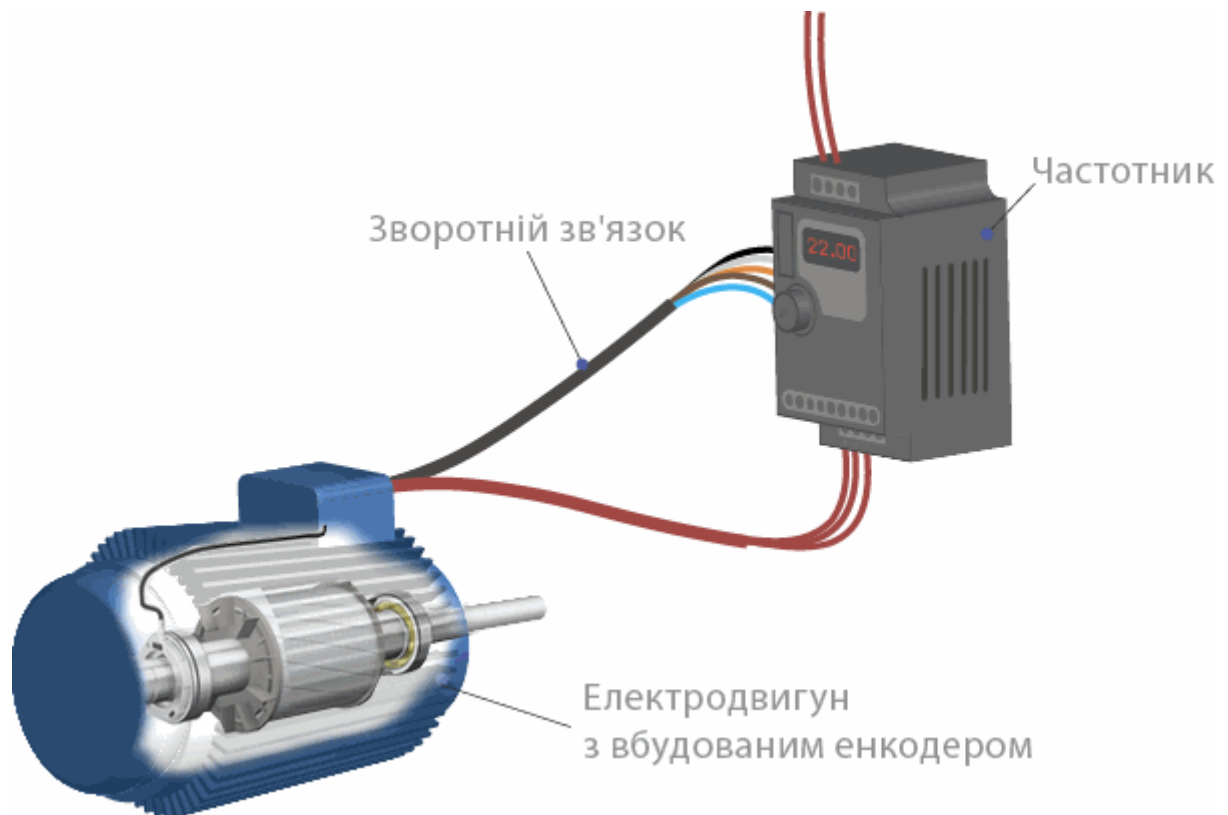


Рис. 1.8 – Схематичне зображення підключення ел. двигуна з вбудованим енкодером до перетворювача частоти

CLVC забезпечує більш точне управління швидкістю і крутним моментом, ніж SFVC, оскільки він використовує датчики зворотного зв'язку, енкодери, які вимірюють швидкість та положення ротора. Це дозволяє контролеру керувати швидкістю мотора з високою точністю, забезпечуючи м'який пуск та зупинку, а також точний контроль положення ротора, що

може бути важливим для деяких механізмів. Даний тип частотних перетворювачів використовується на волочильних верстатах, поліграфічному устаткуванні, машинах з вимогою підвищеної точності для підтримки швидкості і крутного моменту. Алгоритм CLVC забезпечує стабільність підтримки частоти обертання в межах $\pm 0,02\%$ заданого значення.

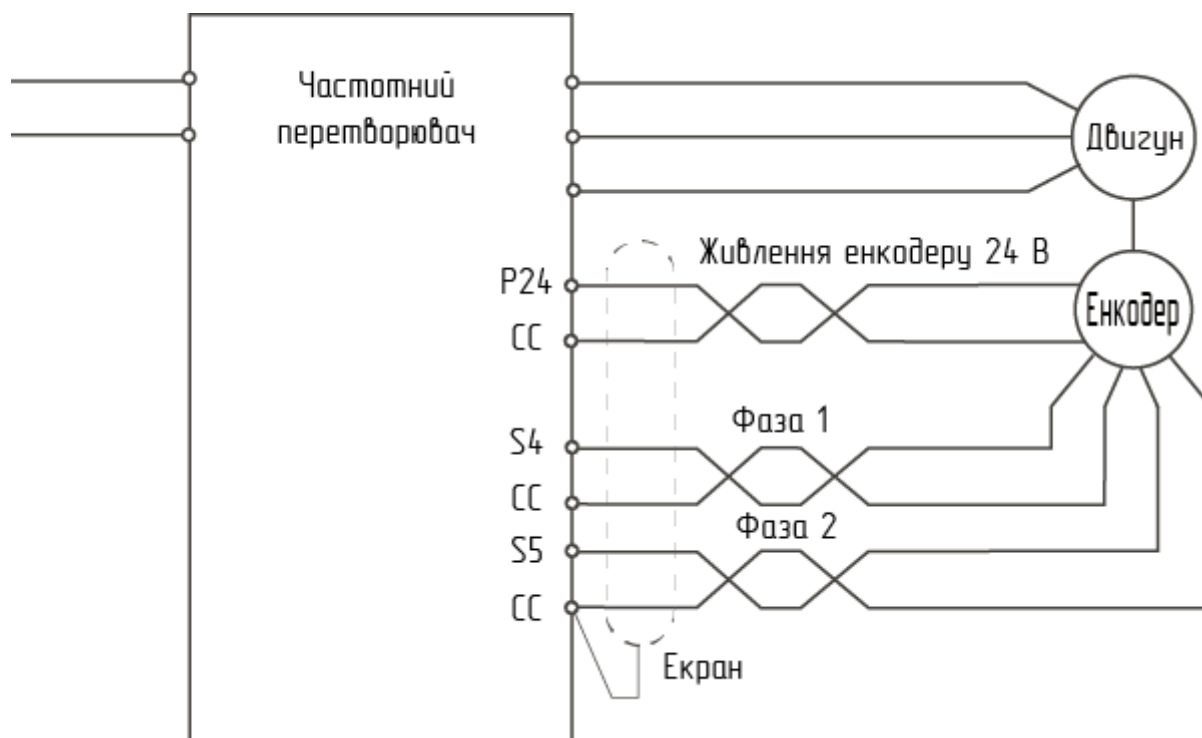


Рис. 1.9 – Структурна схема підключення ел. двигуна з вбудованим енкодером до перетворювача частоти.

Перетворювачі прямого керування крутним моментом (DTC)

Перетворювачі з безпосереднім керуванням обертовим моментом (DTC) є найбільш досконалим типом перетворювачів частоти. Вони використовують прогнозуючий алгоритм для розрахунку необхідної напруги та частоти для двигуна на основі бажаного крутного моменту та швидкості.

Перетворювачі DTC забезпечують найбільш точне управління швидкістю і обертовим моментом двигуна, що робить їх добре придатними для обладнання, що вимагають високоточного керування — наприклад,

друкарські машини, екструдери, кранове і текстильне обладнання. Однак вони також є найскладнішим і найдорожчим типом перетворювача. На точність роботи цієї системи більше впливає якість електродвигуна.

Переваги частотних перетворювачів:

- Енергоефективність
- Регулювання швидкості
- Тривалий термін експлуатації
- Надійність
- Високий рівень автоматизації
- З'являється можливість використовувати більш потужні споживачі у електричних мережах з обмеженою потужністю

До недоліків перетворювачів частоти можна віднести:

- Складність схеми
- Висока вартість

1.4. Висновки за розділом

На основі проведеного аналізу систем керування електроприводом компресора можна зробити кілька важливих висновків.

1. Використання контакторів у комутації споживачів, які характеризуються високою частотою вмикань-вимикань, великим моментом інерції привідного механізму, значним пусковим моментом є недоцільним, через: неможливість регулювати потужність; швидкість обертання електричного двигуна; потребу частого технічного огляду та ремонту для продовження їх нормальної роботи; чутливість до просадок напруги мережі живлення, як наслідок – відпадання контакторів і збої в ланцюгах керування.

2. Використання тиристорних пускачів має ряд переваг у порівнянні з контактними комутаційними апаратами, таких як: плавне регулювання

потужності, яка підводиться до електроприймача; реалізація плавного безударного пуску і гальмування двигунів; висока електрична зносостійкість (15×10^6 циклів); висока надійність і довговічність, зручність в експлуатації; малий час вимикання (0,02 с); обмеження струму, що подається на двигун; фазовмикання; відсутність дуги при комутаціях дозволяє їхнє застосування у вибухонебезпечних середовищах. Але вони мають один дуже вагомий недолік - вузький діапазон регулювання швидкості обертання, чого недостатньо для використання асинхронних двигунів у якості приводних в багатьох механізмах, де потрібно регулювати технологічний параметр у широких межах.

3. В сучасних реаліях для забезпечення повного контролю над швидкістю обертання асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором доцільно використовувати частотний перетворювач. Він володіє усіма перевагами пристрою керування електричним двигуном: енергоефективність; регулювання швидкості; тривалий термін експлуатації; надійність; високий рівень автоматизації і має лише один недолік – високу вартість.

РОЗДІЛ 2. МОДЕРНІЗАЦІЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ КОМПРЕСОРА

2.1. Загальні вимоги до електроприводу компресорів

Потужність електроприводу

Компресор розраховується на певну потужність і якщо потужність двигуна буде меншою за потужність компресора - то при повному навантаженні компресора електричний двигун буде перевантажений. А це в свою чергу призводить до спрацювання захисної апаратури, або до перегріву двигуна, старінню його ізоляції, зменшення його ресурсу роботи та як наслідок - передчасна поломка, яка потребує дорогого ремонту, що негативно впливає на економічну складову виробництва. Якщо потужність двигуна буде більшою за потужність компресора – то двигун буде недовантажений.

Враховуючи, що асинхронні двигуни на виробництві переважно працюють при певному недовантаженні, їх проектують таким чином, щоб ККД мав максимальне значення при $\beta \approx 0,75$;

$$\beta = \frac{P_1}{P_{1н}} \quad (2.1)$$

де β - коефіцієнт завантаження асинхронного двигуна, P_1 – фактична потужність асинхронного двигуна, $P_{1н}$ – номінальна потужність асинхронного двигуна.

Отже, потужність електродвигуна повинна бути більша за потужність компресора $P_{ел. двиг.} > P_{компресора}$ [4].

Номінальна частота обертання електродвигуна повинна відповідати номінальній частоті обертання валу компресора

Як відомо, продуктивність компресора має прямо пропорційну залежність від швидкості обертання його механізму. Отже при більшій

швидкості обертання валу компресора від номінальної його продуктивність зросте. Але це призведе до перегріву як компресора, так і робочого газу, суттєво зменшить ресурс, і датчик температури подасть сигнал на блок керування, який в свою чергу зупинить компресор по аварії перегріву.

Відповідно до зростання продуктивності компресора зросте і споживана потужність, внаслідок чого електропривод (ЕП) компресора буде перевантажений, погіршиться енергоефективність, спрацює захисна апаратура яка зупинить обладнання по аварії перевищення допустимої потужності.

При меншій швидкості обертання валу компресора від номінальної його продуктивність зменшиться, але побічних негативних наслідків не буде. Лише при швидкості обертання валу компресора 1-10% буде спостерігатись сильна вібрація, яка спричинена конструктивними особливостями. Тому експлуатація компресора на таких обертах не допускається.

Так як компресор буде обладнаний електроприводом з широким діапазоном регулювання швидкості обертання на базі частотного перетворювача, а в якості приводного двигуна буде використовуватись асинхронний двигун з короткозамкненим ротором – доцільно обрати двигун, номінальна частота обертання якого відповідатиме номінальній частоті обертання механізму компресора.

Обертний момент, його види:

- Номінальний - значення моменту при стандартному режимі роботи та стандартному номінальному навантаженні на двигун.
- Пусковий - це табличне значення. Сила обертання, що може розвинути електродвигун під час пуску. При підборі електродвигуна необхідно переконатися, що цей параметр вищий, ніж статичний момент обладнання - компресора, насоса, вентилятора, і т.д. В іншому випадку електродвигун не зможе запуститися, що може призвести до перегріву і

перегорання обмотки. Зазвичай вказується кратність пускового моменту до номінального ($M_{\text{пуск}} / M_{\text{ном}} \approx 1.3 - 2.1$).

- Максимальний - граничне значення, після досягнення якого навантаження врівноважить двигун і зупинить його (кратність максимального моменту $M_{\text{max}} / M_{\text{ном}} \approx 1.7 - 2.8$).

Ці параметри закладаються заводом-виробником на етапі проектування електричної машини. Для приводу компресора потрібно обрати двигун з підвищеним коефіцієнтом кратності пускового моменту.

Варто відмітити квадратичну залежність моменту на валу АД від величини напруги живлення. Оскільки електропостачання промисловості характеризується невеликою потужністю силових трансформаторів (для покращення економічного фактору), то напруга живлення АД може змінюватись значно, що впливає на момент, який розвивається двигуном. Якщо двигун вибраний неправильно, то падіння напруги живлення може призвести до зупинки двигуна, який працює під навантаженням.

Наявність кривошипа і маховика (або масивного ротора привода) у складі кінематики компресора характеризує цей механізм наступними особливостями [5]:

- пульсуючий характер навантажувального моменту;
- залежність пульсацій від швидкості привода;
- підвищений момент інерції;
- підвищений пусковий момент;
- затруднений пуск.

Тому для збільшення ресурсу як компресора, так і електропривода, бажано забезпечити плавність розгону та зупинки, низьку частоту увімкнень.

2.2. Вимоги до процесу керування компресорною установкою

Поршневі компресори характеризуються прямо пропорційною (лінійною) залежністю об'ємної продуктивності V в $\text{м}^3/\text{с}$ від швидкості обертання його механізму. Цей зв'язок описується законом пропорційності: зміна подачі (продуктивності) поршневого компресора:

$$\frac{Q_i}{Q_{\text{ном}}} = \frac{\omega_i}{\omega_{\text{ном}}} \quad (2.3)$$

де $Q_{\text{ном}}$, і Q_i – значення подачі відповідно номінальне та деяке поточне значення, що досягається за деякої швидкості ω_i .

Тобто, якщо компресор на номінальній швидкості обертання забезпечує номінальне значення продуктивності (подачі), то із зниженням швидкості обертання на 10% на цю ж величину знизиться його продуктивність.

Асинхронні двигуни характеризуються малою зміною швидкості обертання відносно зміни навантаження на його валу від холостого ходу до номінальної потужності, а для задоволення вимог технологічного процесу потрібні набагато ширші межі регулювання продуктивності компресора, а отже і швидкості обертання електродвигуна.

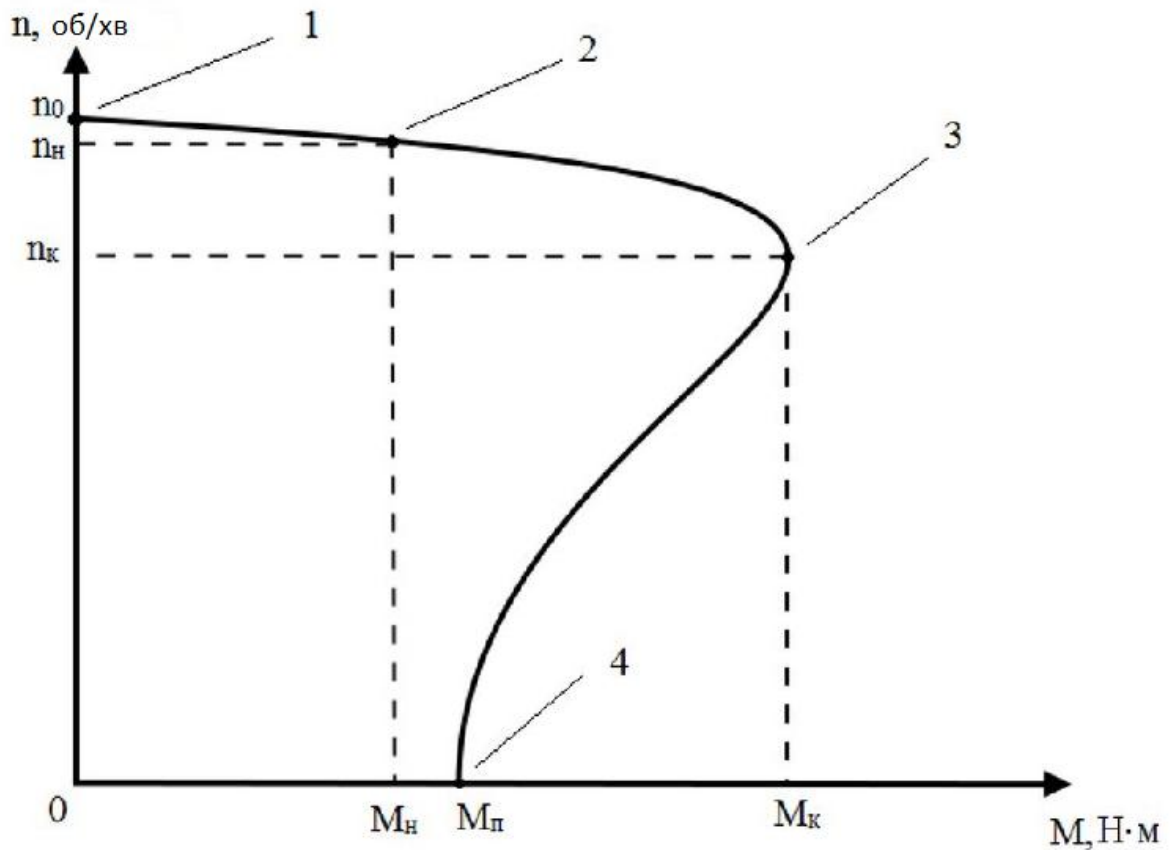


Рис. 2.1 - Графік залежності швидкості обертання асинхронного двигуна від моменту навантаження на його валу (механічна характеристика асинхронного двигуна).

Раніше для регулювання продуктивності використовували кілька менш потужних компресорів замість одного потужного. Під час низьких вимог продуктивності працював лише один з компресорів, зі збільшенням потреб стисненого газу вмикали другий, третій... Коли потреба в стисненому газі була максимальною – тоді вмикали всі компресори в роботу.

Для задоволення потреби широкого діапазону регулювання продуктивності використовували кілька компресорів, при умові, що кожен наступний компресор був вдвічі потужніший за попередній, окрім випадків коли відбувалося резервування для надійності – тоді встановлювали декілька однакових агрегатів.

Компресори обладнуються приводами із змінною швидкістю для виконання умов технологічного процесу, коли потреба в стисненому газі суттєво змінюється протягом робочого циклу. При використанні приводу із змінною швидкістю частота обертання електропривода плавно регулюється в залежності від зміни потреби в стисненому газі, що дає можливість використовувати асинхронний двигун з короткозамкненим ротором у якості приводного та задовольняє вимоги технологічного процесу [15].

Оцінка економічних аспектів впровадження регульованих приводів компресорів показує, що на електричну енергію припадає 80% затрат за весь життєвий цикл компресора, тоді як залишок у 20% витрачається на капітальні витрати та технічне обслуговування.

Отже встановлення частотного перетворювача підвищує економічну ефективність всієї установки за рахунок енергоефективності та позитивно впливає на ресурс обладнання.

2.3. Аналіз негативних факторів, що впливають на роботу компресорної установки

Необхідно враховувати, що під час роботи компресорної установки на неї будуть впливати негативні зовнішні фактори: зміна напруги мережі, знос елементів механічної частини компресора, коливання температури навколишнього повітря, які можуть призвести до виходу з ладу обладнання.

Найбільш суттєвий відсоток виходу з ладу електродвигунів припадає на прогар обмотки (руйнування ізоляції обмотки по причині її теплового пробою) $\approx 45\%$. Найбільш імовірними причинами, що можуть призвести до перегріву струмовідних частин електричної машини та ізоляції, що з ними межує, та до теплового руйнування ізоляції може бути [2]:

- Перевищення унормованої величини тривалості роботи електроприводу компресора, тобто робота з невідповідним значенням тривалості

ввімкнення (ТВ). (У випадку повторно-короткочасного режиму роботи установки);

- Перевантаження електродвигуна через несправність механізму, який приводить в рух двигун;
- Перевантаження електродвигуна пусковими струмами на етапі запуску. Ще більше перевантаження виникає за низьких температур навколишнього середовища, внаслідок зростає початковий момент опору механізму компресора, що є причиною «важкого» пуску. При зниженій напрузі мережі живлення зменшується пусковий момент $[M = f(U^2)]$ та відповідно збільшується час пуску, а отже і час протікання пускових струмів;
- Неправильний підбір електричного двигуна, який приводить в рух механізм (без запасу потужності);
- Порушення умов експлуатації ;
- Неякісні параметри мережі живлення. (Допускається робота при коливаннях напруги у мережі живлення в межах $\pm 5\%$ - номінально, $\pm 10\%$ - гранично. Перекос струмів – до 5%, перекоп напруги – до 2%).

Перевищення параметру ТВ може призвести до перегріву електричного двигуна через недостатність часу паузи, під час якої відбувається охолодження двигуна. Якщо під час перших циклів роботи двигун набирає температуру, але не перевищує її критичне значення за рахунок низької початкової температури двигуна (яка дорівнює температурі навколишнього середовища) та теплової інертності, то після кількох циклів температура двигуна при якій починається цикл стає вищою, а отже в кінці етапу роботи двигуна перед настанням паузи температура обмоток двигуна може перевищити критичне значення.

Для того аби уникнути перевантаження електродвигуна компресора в силовому електричному колі живлення передбачено тепловий захист, що реалізований на теплових біметалевих реле. Практика показує, що часто

теплове реле спрацьовує не у відповідності з налаштуванням, а набагато пізніше ніж того вимагає ситуація.

Оскільки для змащення деталей поршневого компресора в його картері постійно знаходиться деякий об'єм мастила, яке характеризується в'язкістю, то в зимовий період експлуатації це мастило може загустіти і спричинити суттєве збільшення моменту опору на валу приводного двигуна в момент пуску. Поршневі мотор-компресори мають найбільший момент тертя спокою через велику площу поверхонь тертя. За результатами експериментальних досліджень мотор-компресору, проведених в широких температурних умовах, отримана залежність початкового пускового моменту опору від температури при відсутності протитиску (рис. 2.2).

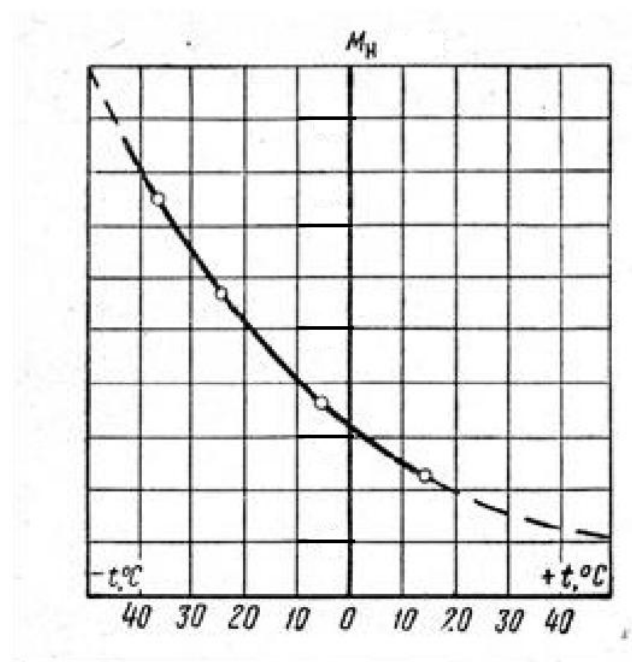


Рис. 2.2 - Залежність моменту опору компресора від температури

Як видно з графіка (рис. 2.2) початковий момент опору суттєво залежить від температури навколишнього середовища. При зниженні температури повітря від $+40^\circ C$ до $+5^\circ C$ величина початкового моменту опору збільшується в 2 рази. Хоча компресорна установка знаходиться в приміщенні, що опалюється в холодну пору року, все одно температура в приміщенні

коливається від +10 взимку до +30 влітку. Експлуатація компресора при температурі навколишнього середовища нижче +5 °С призведе до порушення умов експлуатації та передчасного виходу його з ладу.

Динамічні процеси в електричних колах визначаються параметрами цих кіл, а також характером зовнішніх впливів на них: зміна напруги в контактній мережі, включення і виключення в електричних колах, частковим або повним коротким замиканням, порушенням нормальних умов роботи і т. п. Указані збурення досить різноманітні як за видом функціональної залежності від часу, так і за ймовірністю їх виникнення. Їх можна розділити на дві групи: збурення, які властиві нормальним експлуатаційним режимам, і збурення, які пов'язані з порушенням нормальних режимів.

Перехідні процеси ускладнюють роботу електрообладнання, чинять вплив на якість керування, якщо супроводжуються великими відхиленнями навантаження від сталих значень і якщо час їх завершення відносно великий.

Допустимість таких перехідних процесів оцінюють виходячи з умов надійної роботи електричного обладнання, перевантажень і перенапруги в електричних колах.

Нормальні перехідні процеси в експлуатації не повинні викликати спрацювання пристроїв захисту, призначення яких – запобігати пошкодженню електрообладнання при перехідних процесах, що обумовлені збуреннями.

2.4. Аналіз алгоритму керування електроприводом компресора

Тривалий час керування електроприводом компресора здійснювалося у режимі «увімкнено – вимкнено» за допомогою звичайних контакторів, датчиків тиску, електроконтактних манометрів.

Для підтримки заданого режиму продуктивності застосовують зміну числа компресорів, що працюють паралельно, або метод регулювання продуктивності за часом.

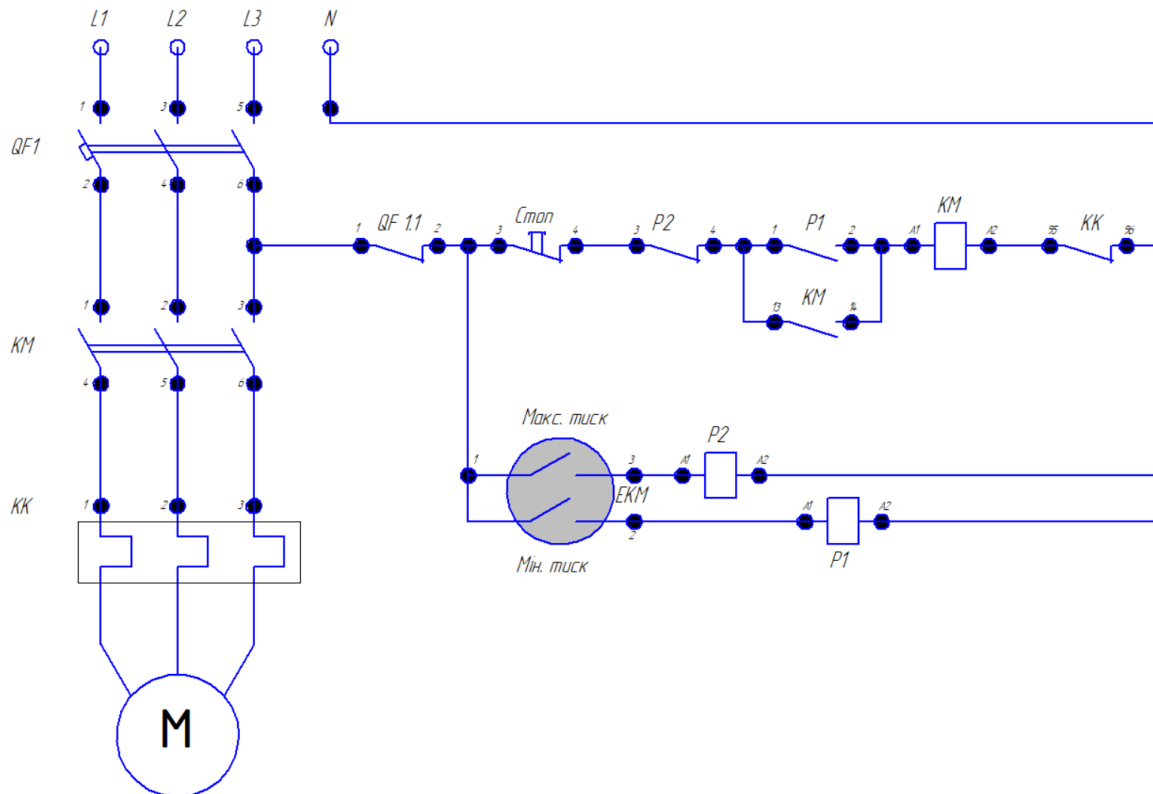


Рис. 2.3 - Електрична схема автоматизованого приводу компресора

де: ЕКМ – електроконтактний манометр; P1, P2 – проміжкові реле; КК – теплове реле; КМ – контактор; QF1, QF1.1 - автоматичні вимикачі; Стоп – кнопка аварійної зупинки; М - асинхронний двигун з короткозамкненим ротором.

На ресивері встановлений електроконтактний манометр (ЕКМ), що являє собою пружинний, вимірювальний механізм якого пов'язаний контактними групами. Стан контактів змінюється залежно від величини тиску. Якщо тиск нижчий, за встановлений мінімальний рівень, то контакти 1 і 2 замкнені. Якщо тиск у системі перевищує встановлений мінімальний рівень, то вони розмикаються. Аналогічна дія ЕКМ з контактами 1 і 3: при тиску газу вище за встановлений максимальний рівень вони замкнені, при

нижчому за встановлений максимальний рівень – розімкнені. Конструктивно контакти 2 і 3 не можуть бути замкнені між собою.

Принцип роботи такої схеми керування [8]:

Коли тиск в системі газопостачання нижче мінімального рівня $P < P_{\min}$, ЕКМ замикає контакти 1 і 2, чим подає живлення на котушку реле Р1. Реле Р1 відповідно замикає свої контакти 1 і 2, чим замикає коло керування контактором, та на котушку контактора подається живлення, а отже двигун вмикається, тиск у системі починає зростати.

Коли тиск газу в системі стає вище за встановлений мінімальний рівень, але нижче за встановлений максимальний рівень $P_{\min} < P < P_{\max}$, контакти ЕКМ 1 і 2 – розмикаються, але двигун продовжує працювати за рахунок замкнених контактів контактора 13 і 14.

Коли тиск газу в системі стає вище за встановлений максимальний рівень $P > P_{\max}$, контакти ЕКМ 1 і 3 - замикаються, подається живлення на котушку реле Р2, яке в свою чергу розмикає свої контакти 3 і 4 - коло керування контактором розмикається і відповідно двигун вимикається. Потім увесь цикл повторюється.

Захист електричної схеми живлення двигуна від струмів короткого замикання та перевантаження здійснюється автоматичним вимикачем QF1. З метою підвищення надійності захисту двигуна від струмів перевантаження в схемі використано також теплове реле КК. При спрацюванні теплове реле розриває ланцюг живлення котушки магнітного контактора КМ і двигун при цьому вимикається. Для захисту схеми керування від струмів короткого замикання використовується автоматичний вимикач QF1.1.

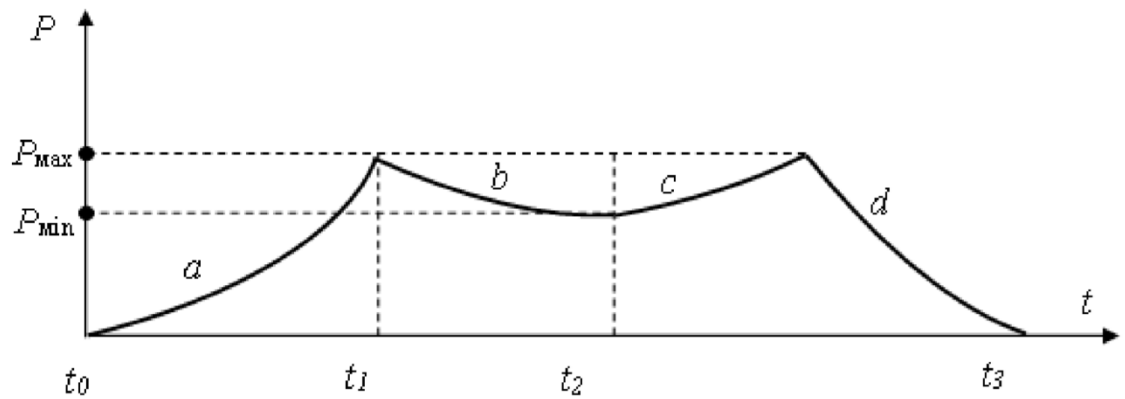


Рис. 2.4 - Діаграма роботи компресора $P = f(t)$

На рис. 2.4 наведена діаграма циклів роботи компресора [6]. У момент часу t_0 , як тільки компресор вмикають, відразу ж починається підйом тиску, крива а. Після досягнення величини тиску значення P_{max} (момент часу t_2), двигун відключається, і тиск починає знижуватися за рахунок витрати стислого газу (крива b). При зниженні тиску до значення P_{min} цикл роботи компресора повторюється (крива c). Якщо живлення компресора буде відключено, то тиск знижуватиметься (за наявності витрати газу) до нуля - крива d.

При умові широкого допустимого діапазону P_{min} та P_{max} описану вище схему керування доцільно використовувати, але для підтримки стабільного тиску у системі на одному рівні при умові невеликої різниці P_{min} та P_{max} необхідно встановити накопичувальну ємність – ресивер, інакше електропривод буде занадто часто вмикатись та вимикатись.

2.5. Модернізація алгоритму керування електроприводом компресора

Основним завданням роботи є покращення контролю за технологічним параметром – тиском. Регулювання тиску здійснюється шляхом регулювання продуктивності компресора. Регулювання продуктивності компресора відбувається за рахунок контролю швидкості обертання механізму

компресора. Контроль швидкості обертання механізму компресора відбувається через контроль швидкості обертання приводного двигуна – асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором.

Завдяки використанню частотного перетворювача вдалося досягнути бажаного результату – використання асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором у якості приводного двигуна для компресора.

Модернізована система керування – слідкуюча за вихідним параметром (тиском) - змінює продуктивність, залежно від тиску у системі. Із збільшенням відхилення від заданого тиску – збільшується рівень впливу на електропривод.

Частотний перетворювач забезпечує широкий діапазон керування швидкістю обертання електродвигуна, а отже, і механізму компресора, чим задовольняє вимоги технологічного процесу підтримання тиску в системі на заданому рівні шляхом регулювання продуктивності компресорної установки (КУ) у широкому діапазоні.

Завдяки використанню сучасної комп'ютеризованої техніки:

- моніторинг всіх параметрів КУ став у разі кращий;
- з'явилась статистика параметрів за час експлуатації;
- у разі виходу за допустимі межі хоча б одного з параметрів КУ – програмне забезпечення (ПЗ) подасть команду на блок керування КУ, який вимкне КУ через аварійний режим роботи;
- вдалося викоринити більшість проблем, пов'язаних з низькою надійністю КУ в аварійних режимах роботи.

На даний час все керування КУ відбувається через один інтерфейс, на базі персонального комп'ютера (ПК). Блок керування та моніторингу компресорною установкою збирає дані від усіх датчиків, встановлених на КУ та частотному перетворювачі (ЧП), виводить їх на монітор. В спеціалізованій

програмі налаштовуються усі необхідні параметри, алгоритми роботи КУ. ПЗ виконує контроль за роботою КУ, в тому числі за частотним перетворювачем, який живить електричний двигун.

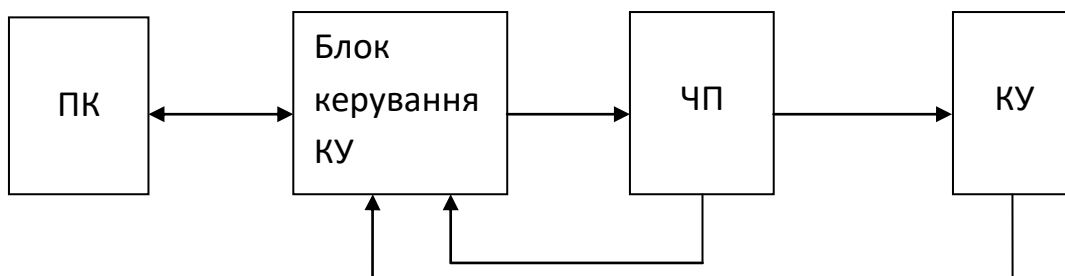


Рис. 2.5 - Блок-схема системи керування КУ

Через ПЗ можна задати слідкуючий режим роботи за продуктивністю КУ, який зображено на рис. 2.5, чого не можна було раніше зробити на базі асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором у якості приводного для компресора через відсутність регулюючого органу для ЕП.

Використання слідкуючого режиму дозволяє зменшити кількість пусків та зупинок КУ, що збільшує ресурс обладнання.

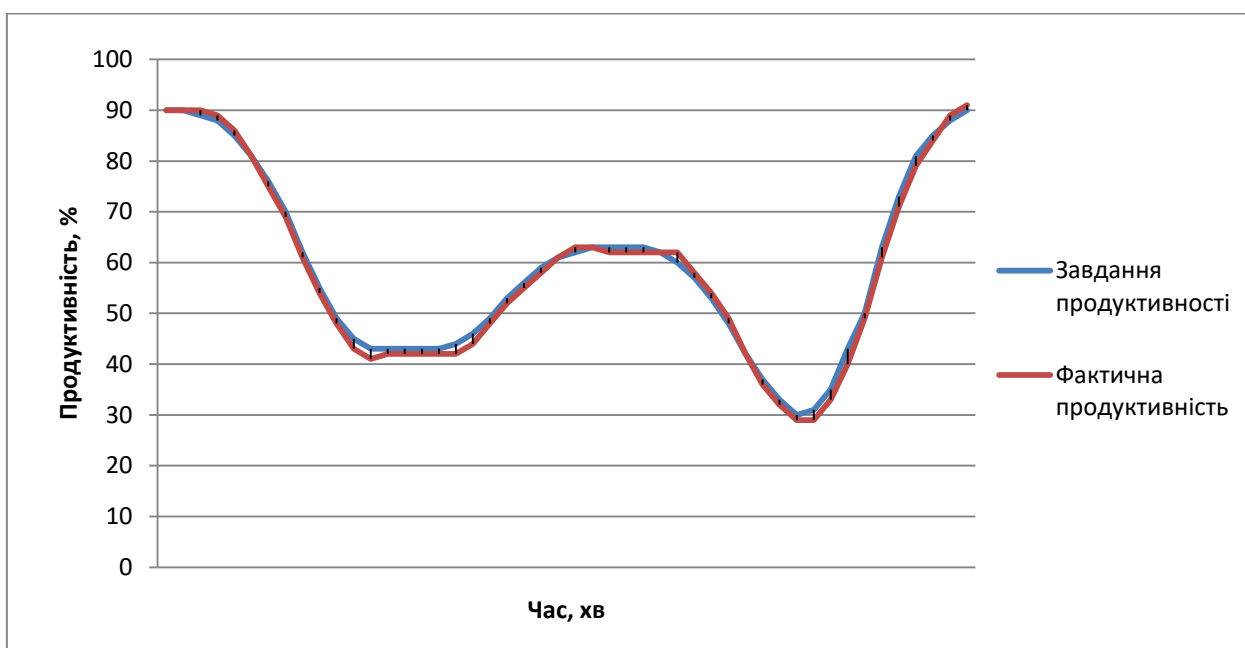
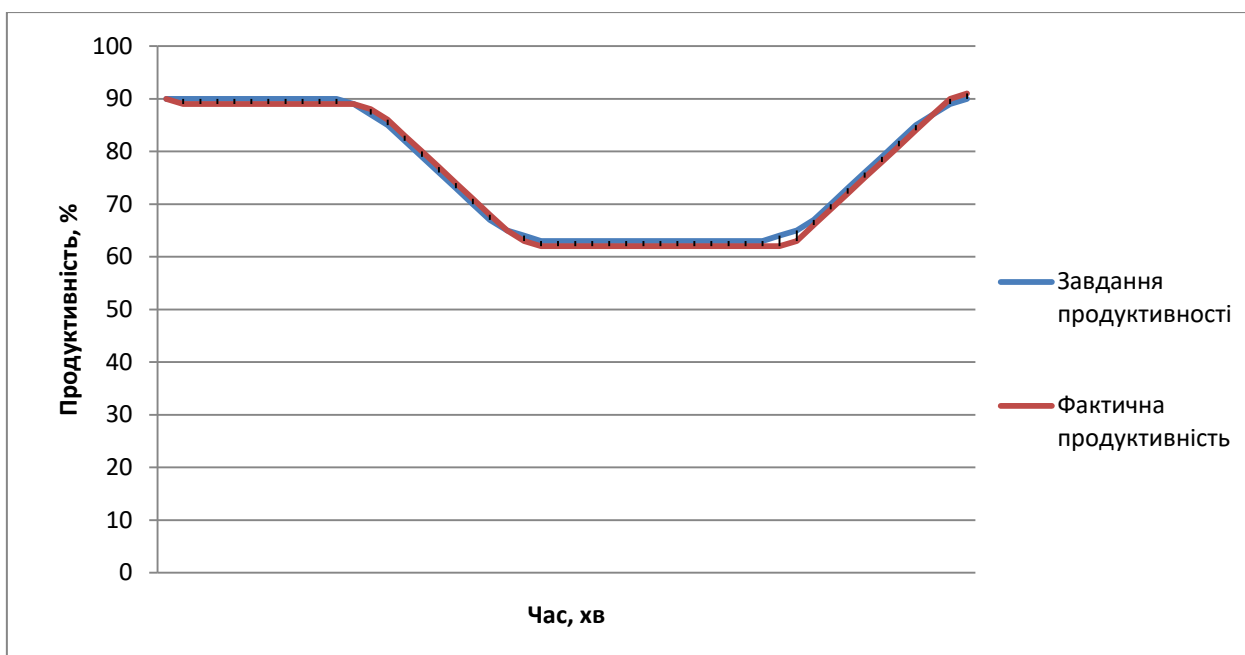


Рис. 2.6 - Графік залежності продуктивності КУ від завдання системи керування

На рис. 2.6 можна побачити, що відхилення фактичної продуктивності від завдання незначне, ці параметри майже однакові, розбіжність вкладається в статистичну похибку. Отже слідкуюча система справляється з поставленою задачею.

2.6. Висновки за розділом

Враховуючи вимоги до електроприводу компресора та на основі проведеного аналізу систем керування компресора можна зробити наступні висновки:

- потужність електродвигуна повинна бути більша за потужність компресора $P_{\text{ел. двиг.}} > P_{\text{компресора}}$.
- Номінальна частота обертання електродвигуна повинна відповідати номінальній частоті обертання валу компресора
- Для приводу компресора в рух потрібно обирати двигун з підвищеним коефіцієнтом кратності пускового моменту.
- Для збільшення ресурсу як компресора, так і електропривода, бажано забезпечити плавність розгону та зупинки, низьку частоту увімкнень.
- При умові широкого допустимого діапазону P_{min} та P_{max} схему керування з використанням ЕКМ доцільно використовувати, але для підтримки стабільного тиску у системі на одному рівні при умові невеликої різниці P_{min} та P_{max} необхідно встановити накопичувальну ємність – ресивер, інакше електропривод буде занадто часто вмикатись та вимикатись.
- Частотний перетворювач забезпечує широкий діапазон керування швидкістю обертання механізму компресора, чим задовольняє вимоги технологічного процесу в широкому регулюванні продуктивності компресорної установки (КУ).
- Використання слідкуючого режиму дозволяє зменшити кількість пусків та зупинок КУ, що збільшує ресурс обладнання.

РОЗДІЛ 3. СИНТЕЗ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ КОМПРЕСОРА

3.1. Доцільність застосування частотного регулювання електродвигунів

Одним із найбільш перспективних є частотне регулювання частоти обертання асинхронного двигуна, що відрізняється високими енергетичними показниками й дозволяє змінювати частоту обертання як униз, так і вгору від синхронної частоти.

Спосіб регулювання частоти обертання визначається видом залежності моменту опору механізму (компресора) від частоти обертання $M = f(n)$, а також величиною моменту опору. Порівняно просто можна регулювати частоту обертання асинхронного двигуна зміною частоти напруги живлення. Для цього використовуються тиристорні ПЧ. Сутність цього методу полягає в зміні частоти мережі живлення електродвигуна, що призводить до зміни частоти обертання магнітного поля статора, а отже, і синхронної частоти обертання ротора двигуна.

При частотному регулюванні асинхронний двигун живиться від перетворювача частоти – електронного пристрою, що забезпечує плавну зміну частоти та амплітуди напруги живлення. При збереженні величини напруги сталою і зміні частоти змінюється магнітний потік двигуна, а разом з ним і електромагнітний момент, а також втрати в обмотках і в сталі.

Частотне регулювання здійснюється плавно в широкому діапазоні. Верхня межа частоти обертання обмежується максимально допустимою частотою обертання за умовами механічної міцності ротора. Мінімальна частота обертання визначається можливістю одержання стійкої низької частоти в перетворювачах частоти.

На рис. 3.1 наведені механічні характеристики асинхронного електродвигуна у вигляді залежності тягового моменту від частоти обертання ротора при різних частотах напруги живлення.

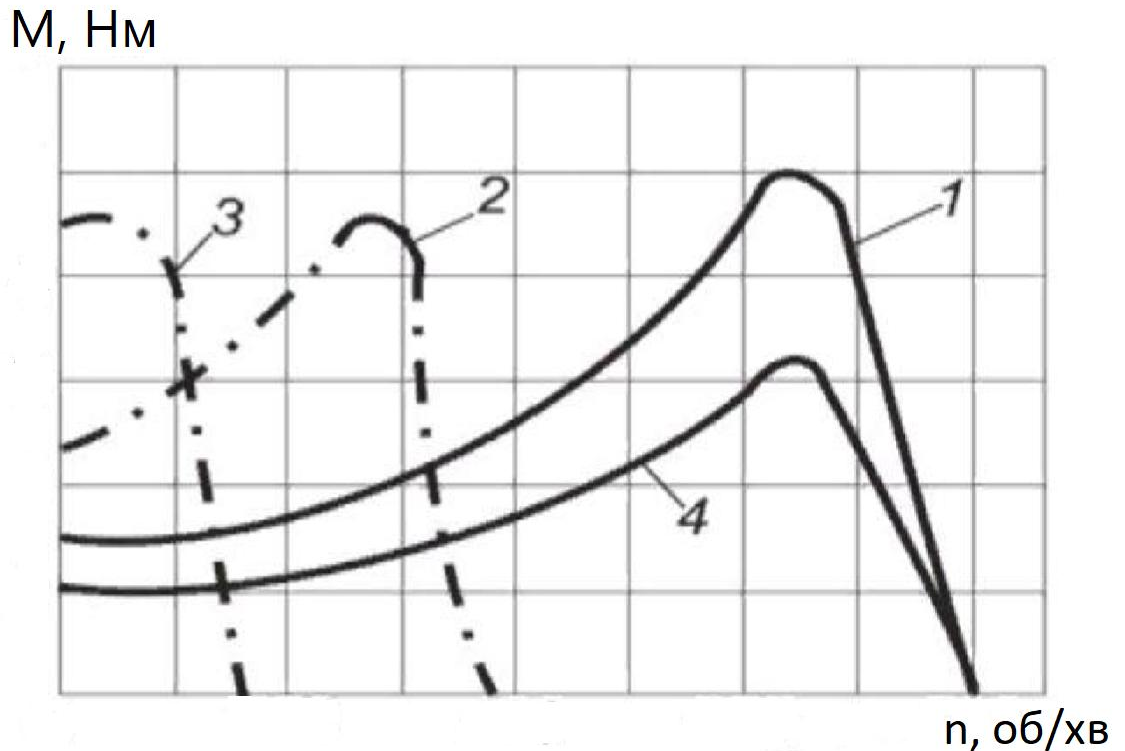


Рис. 3.1 - Механічна характеристика асинхронного електродвигуна при частотному регулюванні

де: 1 – $f = 50$ Гц; 2 – $f = 25$ Гц; 3 – $f = 10$ Гц; 4 – $f = 50$ Гц; $U = 0,8U_{\text{ном}}$

Як видно з рис. 3.1, в усіх випадках пусковий момент двигуна при $n = 0$ значно менший від його значення на номінальному режимі. При частотному регулюванні необхідний момент забезпечується незалежно від частоти обертання вала двигуна. Зниження напруги живлення зменшує номінальний момент, а відповідно споживаний струм та електричну потужність. Таким чином, частотне регулювання дозволяє здійснювати плавний пуск двигуна без перевантажень, оптимальне регулювання його на робочому режимі зі змінним навантаженням, тобто змінною продуктивністю компресора. Для практичної реалізації цього способу регулювання потрібне дооснащення

електричної системи компресорної установки відповідною апаратурою і в першу чергу регульованим частотним перетворювачем. Головним недоліком частотного регулювання необхідно вважати високу вартість та складність перетворювачів частоти.

3.2. Скалярне регулювання асинхронним двигуном

Частотне керування АД має найкращі показники регулювання швидкості порівняно з іншими способами. Єдиним стримуючим фактором тут є висока, поки що, вартість ПЧ. Цей спосіб забезпечує плавне регулювання швидкості у широкому діапазоні, а одержані статичні МХ мають високу жорсткість.

Для кращого використання АД, одержання високих енергетичних характеристик ($\cos \varphi$, ККД та перевантажувальної здатності), одночасно зі зміною частоти живлення f_1 слід змінювати й величину напруги живлення U_1 . Закон зміни напруги при цьому залежить від характеру моменту навантаження, тобто від функції $M = f(\omega)$. При виборі співвідношення між f_1 та U_1 можна виходити з міркувань підтримки постійності перевантажувальної здатності АД.

Перетворювачі U/f , також відомі як скалярні перетворювачі, є найпростішим та найпоширенішим типом перетворювачів частоти. Вони працюють, підтримуючи фіксоване відношення напруги до частоти, яку зазвичай називають «відношенням U/f ». При зміні частоти напруга регулюється пропорційно для підтримки співвідношення U/f .

Скалярні частотні перетворювачі зазвичай використовуються зі стандартними трифазними асинхронними двигунами, що мають постійний обертовий момент. Вони добре підходять для задач, де контроль швидкості не має вирішального значення.

Припущення щодо рівності нулю активного опору статорної обмотки ($R_1 \approx 0$) не вносить помітних похибок в основний закон зміни напруги при

зміні частоти для двигунів великої потужності або при роботі двигунів з незначним зниженням частоти струму. Двигуни великої потужності мають індуктивний опір на порядок більший ніж активний опір. Для двигунів середньої та малої потужності при номінальній частоті живлення на статорній обмотці активний і індуктивний опори приблизно одного порядку. При зниженні частоти струму індуктивний опір пропорційно знижується, а активний залишається сталим. Отже спад напруги на активному опорі статора буде збільшуватись і, як наслідок, перевантажувальна здатність двигуна знизиться.

При зменшенні відносної частоти напруги живлення для різних номінальних потужностей АД (регулювання швидкості АД вниз від номінальної) перевантажувальна здатність двигуна змінюється по різному. Для потужних двигунів при сталій перевантажувальній здатності діапазон регулювання швидкістю обертання ширше, для менш потужних – вузький. Це пов'язано з тим, що зі зменшенням потужності АД збільшується відносна величина активного опору статора і його вплив на електромеханічні процеси.

Діапазон регулювання визначається не тільки задачею збереження перевантажувальної здатності АД, але й умовою забезпечення заданої жорсткості МХ АД. Для двигунів потужністю більше 1...2 кВт зниження жорсткості МХ у діапазоні регулювання $D=10:1$ складає 7-10%, що у більшості випадків задовольняє заданим вимогам значного числа приводів. Якщо ж потрібна більша жорсткість МХ або більший діапазон регулювання, то використовують замкнені системи частотного регулювання, які дозволяють компенсувати спад напруги на активному опорі у значному діапазоні регулювання та отримати потрібну жорсткість МХ.

3.3. Векторне регулювання асинхронним двигуном

Сучасні системи векторного регулювання дозволяють просто й ефективно керувати такими складними об'єктами як АД з КЗ ротором [11]. Це дозволяє істотно розширити область застосування асинхронного приводу і витіснити з автоматизованих керованих приводів двигуни постійного струму. Можливість використання векторних алгоритмів регулювання АД пов'язано в першу чергу з розвитком силової електроніки, яка дозволяє створювати надійні й відносно дешеві перетворювачі, а також з розвитком швидкодіючої мікроелектроніки. Першим етапом процесу розвитку векторного керування АД була розробка універсальної векторно-матричної математичної моделі, що одержала назву узагальненої електричної машини. Цей процес почався у кінці 20-х років і завершилася наприкінці 40-х років ХХ століття. Модель узагальненої електричної машини дозволяє описувати електромагнітні процеси в ідеалізованому електродвигуні за допомогою апарату лінійної алгебри. Практичне використання моделі було відкладено на кілька десятиліть, оскільки при "ручних" розрахунках вона не давала яких-небудь переваг, але вимагала істотних обчислювальних робіт, теоретично ж її успішно використовували для аналізу перехідних процесів в електричних машинах. Як відомо, повна керованість електропривода досягається тоді, коли забезпечується керування електромагнітним моментом двигуна. У електричних двигунах крутний момент утворюється в результаті взаємодії магнітних полів статора й ротора. Обидві величини повинні бути незалежні одна від іншої. Тоді одну з них можна підтримувати постійною, а за допомогою іншої здійснювати регулювання.

У АД з КЗ ротором є тільки один канал, у якому об'єднані обидві складові струму. Отже у завдання системи регулювання входить функція їхнього поділу. Це завдання вирішується при використанні рівнянь узагальненої електричної машини у векторній формі. У результаті вибору пари векторів величин, які утворюють електромагнітний момент, і системи

координат, у якій вони представлені, можна одержати рівняння моменту у вигляді функції незалежних проекцій цих величин на координатні осі. Тоді керування моментом зводиться до керування проекціями векторів. Звідси й назва способу.

Математичною основою його є рівняння електромагнітних процесів в АД у векторній формі, представлені в системі координат орієнтованої по напрямку магнітного поля. В англійській літературі цей принцип називається *field-oriented control (FOC)*, тобто "керування з орієнтацією по полю". Він успішно використовується у наш час і повністю асоціюється з поняттям векторного керування, хоча в останній час із розвитком пристроїв обробки інформації з'явився інший спосіб, у якому також використовується векторне подання величин, але алгоритм керування відрізняється від трансекторного. Цей спосіб називається прямим керуванням моментом (*DTC direct torque control*).

Для побудови систем векторного керування АД можуть бути використані будь-які пари векторів, за допомогою яких можна представити електромагнітний момент АД. Однак від вибору векторів значною мірою залежить ступінь складності системи. Бажано, щоб величини, які представлені векторами в рівнянні моменту, можна було безпосередньо виміряти й впливати на них при керуванні моментом. У АД з КЗ ротором є тільки дві такі величини – це напруга й струм статора, і тільки одна з них, а саме струм статора, може входити в рівняння моменту. Тоді іншою величиною може бути тільки струм ротора або яке-небудь потокозчеплення. Струм ротора принципово неможливо виміряти, а пристрої його ідентифікації по іншим вимірюваним параметрам складні й ненадійні. Тому для вибору залишаються три потокозчеплення: статора, ротора й основне, тобто магнітний потік у зазорі АД. Потокозчеплення статора й робочий потік АД можна безпосередньо виміряти й використати цей сигнал у системі керування, що часто й робиться при створенні приводів високої якості. У

масових виробках розробники намагаються використати сигнали, доступні без установки датчиків, тобто струм і напруга статора, за миттєвим значенням яких можна обчислити, наприклад, потокозчеплення статора.

Однак при виборі потокозчеплення статора або основного потокозчеплення передаточні функції системи керування виходять досить складними й мало підходять для практичного використання. Простіший вигляд мають рівняння електромагнітних процесів в АД у випадку подання їх через вектор потокозчеплення ротора. У системі координат орієнованій по потокозчепленню ротора (ця система координат названа dq -системою. Вона обертається у просторі зі швидкістю ротора).

Таким чином, принцип векторного керування полягає у роздільному керуванні магнітним потоком і моментом АД за допомогою незалежних складових струму статора, які відповідають проекціям вектора струму на осі системи координат dq , орієнтованої по напрямку вектора магнітного потоку ротора.

Отже, якщо задати значення поздовжньої складової струму, що відповідає необхідному магнітному потоку, а поперечної – необхідному моменту на валу, то тим самим буде визначено вектор струму статора в системі координат dq . Після цього здійснюється перетворення системи координат dq у нерухому і розкладання вектора струму на фазні проекції, у результаті чого утворюються синусоїдальні сигнали, що відповідають фазним струмам які потрібно сформувані в обмотках статора, щоб одержати заданий електромагнітний момент.

Перетворення систем координат (з нерухомої у рухому dq) неможливо без інформації про просторове положення опорного вектора потокозчеплення ротора у кожен момент часу. Цю інформацію можна одержати безпосереднім виміром магнітного потоку статора або робочого потоку за допомогою датчиків, а потім обчислити потокозчеплення ротора. Однак при цьому

необхідно включати у конструкцію приводу ненадійні датчики Хола. Уникнути небажаних (і не завжди можливих) змін конструкції АД можна використовуючи виміри інших параметрів:

1. струмів статора АД;
2. напруг на затискачах статора АД;
3. кутової швидкості ротора АД;
4. кутового положення ротора АД.

Для векторного керування АД необхідно вимірювати принаймні дві з перелічених величин.

Більш простим і дешевими є електропривод, розімкнутий по швидкості, який не містить датчик кутової швидкості (безсенсорне керування). Тут виміру підлягає лише струми й напруги статора АД. Швидкість ротора обчислюється в ПЧ по математичній моделі АД, що враховує усереднені типові або реально виміряні параметри АД.

Модель АД представляє собою систему диференціальних рівнянь, які розв'язуються у реальному часі. Невідомими функціями часу в цій системі можуть бути вектори струмів або потокозчеплень ротора, статора і швидкість ротора. При вимірі параметрів і розв'язуванні диференціальних рівнянь у системі керування ПЧ накопичуються похибки, що приводить до неточного визначення орієнтації поля. Для стійкої роботи застосовується безперервна корекція розв'язків системи на основі різниць виміряних і обчислених значень струмів статора. Через складність точного відображення параметрів АД (наприклад, внаслідок зміни температурних умов роботи АД) регульовальні властивості таких векторних безсенсорних електроприводів у зоні нульових швидкостей різко погіршуються, тобто має місце обмеження діапазону регулювання.

Для роботи в необмеженому діапазоні швидкостей використовуються замкнуті по швидкості електроприводи, які мають електромеханічний або

цифровий датчик швидкості (енкодер), встановлений на валу АД. У цьому випадку модель АД значно спрощується й служить тільки для визначення орієнтації потокозчеплення ротора. Ця інформація використовується для перетворень координат. Векторне керування АД, особливо без датчика швидкості, вимагає більшого обсягу й високої швидкості обчислень і може бути реалізоване потужним мікропроцесорним контролером.

Найбільш масове практичне застосування в системах регульованих електроприводів змінного струму одержали ПЧ із проміжною ланкою постійного струму, а з них - перетворювачі з автономними інверторами напруги з ШІМ-модуляцією.

Струм живлення двигуна є несинусоїдальним внаслідок несинусоїдальності вихідної напруги інвертора. Кожна трифазна гармонійна складова напруги створює у двигуні обертове магнітне поле, період обертання якого залежить від номеру гармоніки (частоти струму), а напрямок обертання - від порядку чергування фаз напруг гармоніки. Отже у двигуні збуджується безліч магнітних полів, що обертаються з різними швидкостями в різних напрямках. Однак у порівнянні з основною вищою гармонікою напруги інвертора мають менші амплітуди й більші частоти. Тому споживані двигуном струми вищих гармонік виявляються порівняно малими, а моменти - дуже малими в порівнянні зі струмами й моментами від основної гармоніки.

При зміні ковзання ротора, викликаного наприклад, зміною навантаження, струм першої гармоніки двигуна змінюється в широких межах (цей струм може змінюватись від струму холостого ходу до пускового струму АД), а струми вищих гармонік змінюються незначно. Вищі гармоніки напруги інвертора породжують не стільки додаткові постійні складові моменту, скільки змінні складові, обумовлені взаємодією вищих гармонік з першою гармонікою і між собою. Найбільш значимими в механізмі утворення пульсацій електромагнітного моменту є результати взаємодії

п'ятої й сьомої гармонік струму з основною гармонікою магнітного поля двигуна.

Відповідно до законів механіки пульсації моменту породжують нерівномірність обертання ротора, додаткові вібрації, шуми й умови для виникнення небажаних резонансних явищ у механічній системі. При номінальній частоті напруги (50 Гц) внаслідок підвищеної частоти пульсацій моменту (250, 350 Гц) і інерції механічної системи пульсації швидкості виявляються порівняно невеликими і прийнятними для багатьох виробничих механізмів.

Іншим негативним фактором впливу несинусоїдальності напруги живлення є наявність додаткових втрат від вищих гармонік, що приводить до зниження допустимого навантаження на валу двигуна за умовами його нагрівання. Для усунення відзначених вище небажаних явищ і розширення діапазону регулювання швидкості використовують удосконалені закони комутації ключів інвертора.

3.4. Система керування електроприводом компресора

У залежності від задач керування електроприводом та виробничим механізмом регулювання координат може здійснюватись з метою підтримки заданого рівня параметрів (наприклад підтримка заданої величини тиску у системі) з потрібною точністю, тобто так званий слідкуючий електропривод.

Необхідність регулювання координат електропривода визначається технологічними вимогами, при цьому вибір раціонального способу регулювання є важливою задачею, що вирішується при проектуванні привода. Щоб здійснити такий вибір, слід знати основні узагальнені показники регулювання:

- діапазон регулювання;
- плавність регулювання;

- стабільність регулювання;
- точність регулювання;
- напрямок регулювання;
- допустиме навантаження у діапазоні регулювання;
- динамічні показники (швидкодія, коливальність, перерегулювання, динамічна зміна величини, час відновлення);
- економічність регулювання;

Швидкість обертання механізму компресора доцільно обрати від 0 до номінального значення. Перевищення номінального значення швидкості призведе до передчасного виходу з ладу компресора.

Діапазон регулювання - це основний показник регульованого електроприводу, який характеризується відношенням можливої максимальної швидкості обертання до можливої мінімальної при заданому способі регулювання.

Верхня межа швидкості обмежується максимально допустимим, або максимально можливим значенням швидкості. Нижня межа швидкості обмежується необхідністю точної підтримки заданої швидкості при коливанні моменту опору на низьких швидкостях, небезпекою перегрівання двигуна на малих швидкостях – для двигунів у яких крильчатка вентилятора приводиться у рух від самого двигуна. При виході за межі допустимих значень відбудеться передчасний вихід з ладу агрегату.

Плавність регулювання швидкості характеризує стрибок швидкості при переході від даної швидкості до найближчої можливої. Плавність тим вища, чим менше цей стрибок.

Частотно-керований електропривод може реалізовувати достатньо близькі значення сусідніх кутових швидкостей. Дискретність регулювання частоти у ПЧ сягає сотих долей Герц.

Технологічний процес відбувається, як правило, з певними коливаннями моменту навантаження, як наслідок має місце коливання швидкості робочих органів машин. Звичайно зміна швидкості пов'язана з жорсткістю МХ двигуна.

Стабільність – це зміна кутової швидкості при заданому відхиленні моменту навантаження, яка залежить від жорсткості механічної характеристики. Стабільність тим вища, чим більш жорстка МХ.

Недовантаження двигуна веде до погіршення експлуатаційних показників привода, тому що при цьому зменшується ККД двигуна, а при змінному струмі, крім того, зменшується й коефіцієнт потужності. Тому бажано застосовувати такий спосіб регулювання, при якому двигун був би по можливості повністю завантажений на всіх кутових швидкостях.

Допустиме навантаження двигуна обмежується ступенем його нагрівання. Ступінь нагрівання у свою чергу залежить від втрат енергії у двигуні, а останні визначаються головним чином струмом, споживаним двигуном.

Таким чином, умовою повного використання двигуна при роботі на різних регулювальних характеристиках є сталість споживаного струму. Якщо при роботі на всіх регулювальних характеристиках струм буде дорівнювати номінальному струму двигуна, то це й буде означати, що двигун завантажений повністю при всіх кутових швидкостях. При цьому передбачається, що умови охолодження двигуна залишаються незмінними як при великих, так і при малих кутових швидкостях. З врахуванням цього важливого припущення допустимим навантаженням двигуна можна вважати такий, при якому струм двигуна в його силових колах дорівнює номінальному.

Однак, необхідно мати на увазі, що для самовентильованих двигунів (які мають власний вентилятор для охолодження) зниженню кутової швидкості

повинне відповідати зменшення допустимих втрат у двигуні. На малих кутових швидкостях ці двигуни повинні працювати при струмах, менших від номінального. Отже допустимий момент зменшується при зменшенні кутової швидкості. У випадку зовнішнього вентилявання двигуна це обмеження відпадає і допустимий момент може не змінюватись.

При автоматичному регулюванні координат електропривода важливе значення мають динамічні показники якості регулювання: швидкодія, коливальність, перерегулювання, які оцінюються характером протікання перехідного процесу при регулюванні.

Швидкодія може характеризуватися часом регулювання, за який змінна швидкість перший раз досягне заданого значення, часом першого максимуму, коли відхилення швидкості досягне першого максимуму, або загальним часом перехідного процесу.

Колівальність характеризується часом затухання коливань швидкості. Цей показник повинен бути якнайменшим. Перерегулювання характеризується максимальним відхиленням, протилежним початковому, віднесеному до заданого (усталеного) значення регульованого параметра (швидкості).

Динамічна зміна швидкості визначається максимальним відхиленням швидкості від початкової швидкості задання при зміні моменту навантаження.

Час відновлення швидкості характеризує тривалість процесу зміни швидкості при зміні моменту навантаження. Бажано, щоб цей показник був якомога ближче до 0.

Динамічні показники регулювання залежать від характеру зміни зовнішнього впливу (як змінюється швидкість та за яким законом

відбувається ця зміна), а також від властивостей самої системи ”привод – робоча машина”.

Точність регулювання визначається можливим відхиленням швидкості від її заданого значення під дією різноманітних факторів, таких як, зміна навантаження під час регулювання швидкості, коливання напруги при регулюванні, зміна частоти у мережі живлення, наявність вищих гармонік напруги живлення тощо. У замкнених системах регулювання показник похибки керування менший, ніж у розімкнених.

Дотримання у встановлених межах множини цих характеристик дозволяє якісно регулювати продуктивністю компресора. Для забезпечення технологічних вимог процесу стиснення газу, а також для зменшення непродуктивних витрат енергії необхідний регульований електропривод. Отже, швидкість обертання АД потрібно регулювати зміною параметрів: частоти струму, числом пар полюсів, величиною напруги мережі живлення. Управління швидкістю обертання виконує система керування.

Система керування перетворювачем може бути ручною й автоматичною. При ручному керуванні задання режиму роботи перетворювача проводиться оператором безпосередньо з пульта управління. Завдання оператора – підтримувати заданий тиск на виході з компресорної установки, що контролюється за допомогою манометра. При автоматичному регулюванні використовується система на основі спеціального регулятора, на входи якого подаються задавальний сигнал від датчика регульованого параметра (тиску нагнітання). Сигнал задання може подаватися зовнішніми пристроями, зокрема програмними, наприклад - контролерами, або з пульта управління.

Регулятор формує керуючий сигнал для перетворювача частоти, який за рахунок зміни швидкості обертання електродвигуна підтримує керовану величину такою, що дорівнює заданій. Система містить необхідний набір захисних функцій для безпечної експлуатації.

Для зручності користувача вводяться спеціальні функції, що дозволяють системі визначити аварійну ситуацію. Наприклад, при обриванні трубопроводу витрата газу збільшується за рахунок витікання, при цьому система автоматики доводить частоту обертання двигуна до номінальної, а сигнал із датчика тиску не може досягти заданого значення. Система подає попереджувальний сигнал про аварію.

У разі блокування (закупорювання) трубопроводу тиск у трубопроводі зменшується, і перетворювач збільшує оберти двигуна. Однак витрат газу немає, споживана потужність мала і струм двигуна залишається невеликим. При досягненні максимальної швидкості двигуна система подає попереджувальний сигнал.

Продуктивність компресора й економія електроенергії пропорційні зміні частоти обертання двигуна, а використання перетворювачів частоти дозволяє знизити експлуатаційні витрати на електроенергію до 50 %. Істотно підвищується ресурс електричних та механічних пристроїв за рахунок зменшення зношення, знижуються витрати на ремонт і технічне обслуговування компресорних установок.

3.5. Автоматизація компресорних станцій

Автоматизація компресорної станції передбачає здійснення контролю і керування роботою станції як складного технологічного об'єкта. Використання автоматизованих систем контролю й управління є необхідною умовою оптимізації технологічних процесів з метою зниження споживання електроенергії та забезпечення необхідної якості регулювання.

Сьогодні на підприємствах різних галузей промисловості експлуатуються компресорні станції, споруджені за застарілими проектами з низьким ступенем автоматизації. Станції із комплексною автоматизацією є швидше винятком, ніж правилом. Системи автоматики таких станцій розроблені на основі релейної техніки і не відповідають сучасним вимогам.

За останні десятиліття досягнуто значних успіхів у розвитку сучасних систем автоматики на базі комп'ютерів та мікропроцесорів. Створено елементні бази, що включають надійні датчики, сигналізатори, перетворювачі, виконавчі механізми тощо. Можна з упевненістю зазначити, що в цій галузі техніки відбулися революційні перетворення. Сучасні виробники компресорного устаткування оснащують свої вироби мікропроцесорними блоками, що легко інтегруються в єдину систему, що необмежено розширює можливості ефективного управління компресорною станцією. З іншого боку, компанії-користувачі компресорів більш охоче погоджуються на додаткові витрати, передбачаючи у подальшому більш високу економічність автоматизованих станцій. Системи автоматизації бувають як на рівні компресорного агрегата, так і на рівні компресорної станції.

3.5.1. Автоматизація на рівні компресорного агрегата

Компресорні агрегати поставляються з автономною системою КВП та А (контрольно-вимірювальних приладів та автоматики), необхідною для об'єктивного якісного і кількісного оцінювання показників роботи компресорних установок. Згідно з існуючими правилами кожна компресорна установка повинна бути оснащена такими засобами контролю параметрів:

- Манометри на виході з кожного ступеня (секції), на нагнітанні та всмоктуванні;
- Термометри після проміжного охолодження кожного ступеня (секції), після кінцевого охолоджувача, а також на підведенні і зливанні охолоджувальної системи;
- Прилади для вимірювання температури масла, що надходить на змащування агрегата.

У кожному конкретному випадку цей перелік може бути доповнений. Наприклад, у високонавантажених і швидкохідних компресорах обов'язкове

встановлення приладів контролю температури вкладишів підшипників, вібрації й осевого зсуву ротора. Крім того, встановлюються витратомірні прилади для визначення витрати газу, реле проходження і лічильники охолоджувальної рідини, лічильники моторесурсу та ін. Така система є комбінацією місцевих, локальних контрольно-вимірювальних приладів (манометри, термометри) та дистанційних засобів контролю параметрів, винесених у пультову кімнату станції. У пультовій кімнаті, крім дублювальних вимірювачів параметрів, розміщують також імпульсні лінії від різних датчиків контролю, захисту управління агрегатом.

Сьогодні на ринок поставляються компресори різних типів малої, середньої і навіть великої продуктивності (багатовальні відцентрові), повністю автоматизовані на базі мікропроцесорної техніки. В компресорних установках використовується окрема система керування на базі сучасних мікроконтролерів.

Контролер призначений для оброблення вхідних аналогових та дискретних сигналів і видачі керуючих сигналів на виконавчі пристрої, якими є пуско-регулююча апаратура електродвигунів, електромагнітні клапани, засувки з електроприводом, сирена звукового оповіщення і т.д.

Контролер поставляється у складі пульта керування, готовим до роботи, і не вимагає додаткового програмування. За необхідності параметри системи регулювання можуть бути змінені споживачем самостійно. Контролер оснащений вбудованим модулем енергонезалежної пам'яті, що має великий об'єм, у якому фіксуються протокол роботи компресора (ввімкнення, вимкнення нормальні й аварійні режими роботи) та всі маніпуляції машиніста компресорної установки (зміни налаштування системи управління) упродовж тривалого проміжку часу. За необхідності цей протокол може бути добутий із контролера за допомогою ІВМ-сумісної ЕОМ і проаналізований.

Система керування вбудована в контролер і забезпечує [10]:

- Пуск і зупинення електродвигуна компресора й вентиляторів (ручний та автоматичний);
- Ввімкнення і вимкнення електронагрівачів масла;
- Електричне блокування, що не дозволяє здійснити пуск КУ при:
 - 1) Обриві однієї фази;
 - 2) Зниженій напрузі;
 - 3) Відсутності ключа (або такого, що перебуває в положенні «ВІДКЛ.») в перемикачі керування;
 - 4) Температурі масла на вході в КУ нижче плюс 5 °С;
- Оперативну світлову й аварійну світлову та звукову сигналізацію;
- Вимірювання і візуальну індикацію тиску:
 - 1) масла на вході в компресор;
 - 2) газу кінцевого (споживачеві);
 - 3) перепаду тиску на фільтрі-віддільнику масла;
- Вимірювання та візуальну індикацію температури:
 - 1) газу на нагнітанні;
 - 2) газу споживачеві;
 - 3) масла в масловіддільнику;
 - 4) підшипників головного електродвигуна;
- Урахування часу напрацювання компресора;
- Вимірювання та візуальну індикацію струму статора основного двигуна;
- Ручне переведення КУ в режим холостого ходу;
- Аварійне зупинення КУ кнопкою «Аварійний стоп»;
- Автоматичне керування продуктивністю КУ за тиском газу;
- Підтримання тиску за вбудованим датчиком тиску;
- Автоматичне зливання конденсату із сепаратора;
- Дистанційний пуск/зупинення компресора;
- Дистанційне аварійне зупинення КУ;

- Видачу дистанційного сигналу «Аварія»;
- Видачу дистанційного сигналу «Компресор увімкнений»;
- Автоматичне й ручне керування електромагнітним клапаном стравлювання стисненого газу;
- Захисне відімкнення КУ із увімкненням мережевої та звукової аварійної сигналізації, запам'ятовуванням параметра на момент аварійного вимкнення при:
 - 1) температурі газу на нагнітанні понад встановлену максимальну температуру;
 - 2) перевищенні швидкості збільшення температури нагнітання понад встановлене максимальне значення;
 - 3) тиску нагнітання газу понад встановлене максимальне значення;
 - 4) тиску масла на вході в компресор менше встановленого мінімального значення;
 - 5) перепаді тиску на фільтрі більше встановленого максимального значення;
 - 6) рівні масла в масловіддільнику, нижчому від мінімального;
 - 7) обриві однієї фази, зниженні норми напруги живлення, перевантаження і перегріванні привідного електродвигуна КУ й електродвигунів вентиляторів.

Також КУ може бути оснащена системою пожежогасіння. Експлуатація установки, укомплектованої системою керування, не вимагає постійної присутності обслуговуючого персоналу і наявності постійного робочого місця оператора в безпосередній близькості біля установки.

3.5.2. Автоматизація на рівні компресорної станції (КС)

Інтегрування (об'єднання) систем регулювання всіх агрегатів в одну називається автоматизованою системою керування (АСК) компресорної станції. АСК дає можливість ефективно керувати агрегатами станції. При

цьому стає можливим не лише здійснювати контроль та керування устаткуванням КС, а й виконувати моніторинг споживання енергоресурсів (електроенергії, тепла...), взаємодіяти із зовнішніми об'єктами (наприклад споживачами стисненого газу), а також входити як підсистема до загальної структури автоматизованої системи керування технологічним процесом. Блок-схема АСК КС показана на рис. 3.2.

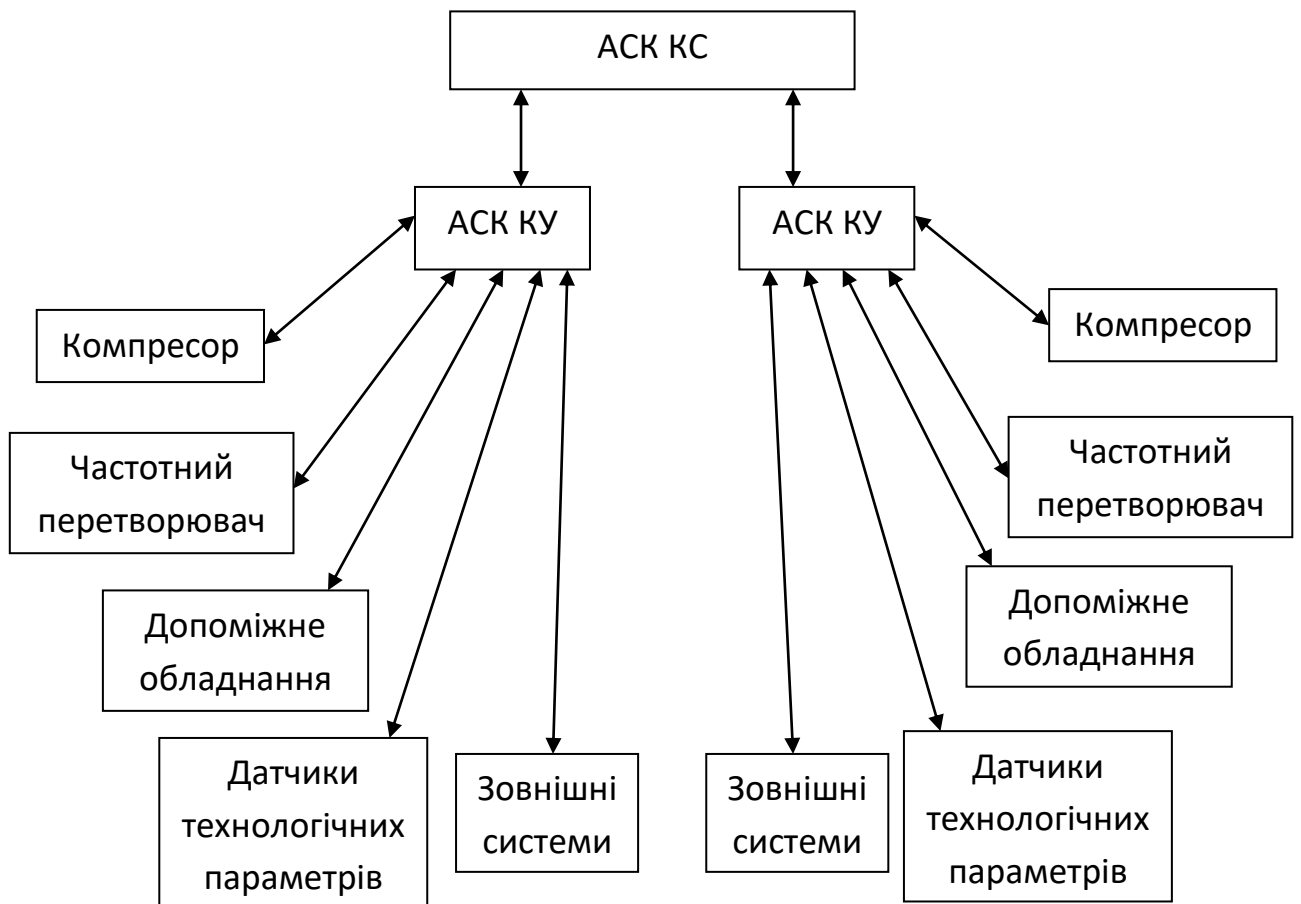


Рис. 3.2 - Блок-схема АСК КС

Сучасний рівень комп'ютерної техніки та засобів комунікації дозволяє досить просто й надійно здійснювати віддалений моніторинг працюючого обладнання на КС, наприклад, із центрального пульта головного диспетчера підприємства або компанії. Якщо кожен компресор працює як самостійна одиниця, то досить важко сказати, наскільки оптимальна робота всієї

компресорної станції. До того ж важко забезпечити рівномірне завантаження і зношення компресорів.

Регулювання на рівні станції – це умисне, системне керування роботою кожного агрегата, що в цілому забезпечує високу ефективність та надійність роботи станції. Під ефективністю тут розуміють досягнення мінімально можливих витрат електроенергії на стиснення певної кількості газу. Забезпечення надійності означає рівномірне навантаження і тривалість роботи кожного агрегата з урахуванням плановопереджувальних робіт.

Управління агрегатами ведеться з центральної пультової станції, оснащеної системою керування на базі комп'ютера. Управління здійснюється автоматично, за заданою програмою. Системи регулювання забезпечені таймерами реального часу, що дозволяють встановлювати добовий або тижневий графік зміни тиску у системі. Це дозволяє автоматично вимикати компресори або змусити систему працювати при зниженому тиску в разі обмеження або за відсутності потреби. За необхідності система повертається до необхідного режиму роботи.

3.6. Висновки за розділом

На основі вище викладеного матеріалу можна зробити наступні висновки:

- При частотному регулюванні необхідний момент забезпечується незалежно від частоти обертання вала двигуна. Зниження напруги живлення зменшує номінальний момент, а відповідно споживаний струм та електричну потужність. Таким чином, частотне регулювання дозволяє здійснювати плавний пуск двигуна без перевантажень, оптимальне регулювання його на робочому режимі зі змінним навантаженням, тобто змінною продуктивністю компресора.
- При зменшенні відносної частоти напруги живлення для різних номінальних потужностей АД (регулювання швидкості АД вниз від

номінальної) перевантажувальна здатність двигуна змінюється по різному. Для потужних двигунів при сталій перевантажувальній здатності діапазон регулювання швидкістю обертання ширше, для менш потужних – вузьчий. Це пов'язано з тим, що зі зменшенням потужності АД збільшується відносна величина активного опору статора і його вплив на електромеханічні процеси.

- Продуктивність компресора й економія електроенергії пропорційні зміні частоти обертання двигуна, а використання перетворювачів частоти дозволяє знизити експлуатаційні витрати на електроенергію до 50 %. Істотно підвищується ресурс електричних та механічних пристроїв за рахунок зменшення зношення, знижуються витрати на ремонт і технічне обслуговування компресорних установок.
- Експлуатація установки, укомплектованої системою керування, не вимагає постійної присутності обслуговуючого персоналу і наявності постійного робочого місця оператора в безпосередній близькості біля установки.
- Сучасний рівень комп'ютерної техніки та засобів комунікації дозволяє досить просто й надійно здійснювати віддалений моніторинг працюючого обладнання на КС, наприклад, із центрального пульта головного диспетчера підприємства або компанії.

РОЗДІЛ 4. ВИБІР ЧАСТОТНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ДЛЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ КОМПРЕСОРА

4.1. Вихідні дані та умови вибору частотного перетворювача компресора

Основні технічні характеристики компресора ЗВШ 1,6-3/46 наведені в таблиці 4.1:

| Найменування | Значення |
|---|--------------|
| Маркування | ЗВШ 1,6-3/46 |
| Об'ємна продуктивність, м ³ /хв. | 3 |
| Тиск початковий, МПа | 0,101 |
| Тиск кінцевий, МПа | 4,51 |
| Витрата оливи на винесення (не більше), кг/год | 0,06 |
| Температура повітря на вході в установку: | |
| номінальна, °С | 20 |
| максимальна, °С | 40 |
| мінімальна, °С | 1 |
| Температура кінцева (після холодильника 3 ступені) [не більше], °С | 60 |
| Частота обертання колінвалу компресора, об/хв | 985 |
| Потужність електродвигуна, кВт | 45 |
| Габаритні розміри: | |
| довжина, мм | 1750 |
| ширина, мм | 1450 |
| висота, мм | 1750 |
| Маса установки, кг | 1600 |
| Середнє напрацювання на відмову (не менше), год | 750 |
| Середній час відновлення працездатного стану (не більше), год | 3,5 |
| Середній ресурс до капітального ремонту (не | 15000 |

| | |
|--|----|
| менше), год | |
| Середній термін служби (не менше), років | 15 |

Таблиця 4.1 - Основні технічні характеристики компресора ЗВШ 1,6-3/46



Рис. 4.1 – Компресор ЗВШ 1,6-3/46

Так, як виробник цієї моделі компресора вже провів необхідні розрахунки потужності електричного двигуна, який буде приводити в рух його механізм, знаючи номінальну частоту обертання механізму компресора а також враховуючи його режим роботи - слідкуючий за вихідним тиском – обрано електричний двигун АІР250S6, параметри якого наведені в таблиці 4.2 [13].

| Найменування | Значення |
|--|----------|
| Маркування | АІР250S6 |
| Номінальна потужність, кВт | 45 |
| Частота обертання магнітного поля статора, об/хв | 1000 |
| Номінальна частота обертання валу, об/хв | 980 |
| Номінальна напруга, В | 220/380 |
| Номінальний струм, А | 151/86 |
| ККД | 92,5 |
| Коефіцієнт потужності | 0,84 |

| | |
|-----------------------------------|------|
| Кратність пускового моменту | 2,0 |
| Кратність пускового струму | 7,0 |
| Момент інерції, кг·м ² | 1,25 |
| Діаметр вала, мм | 75 |
| Вага, кг | 465 |
| Рівень шуму (не більше), дБ | 82 |

Таблиця 4.2 – Паспортні дані двигуна АІР250S6

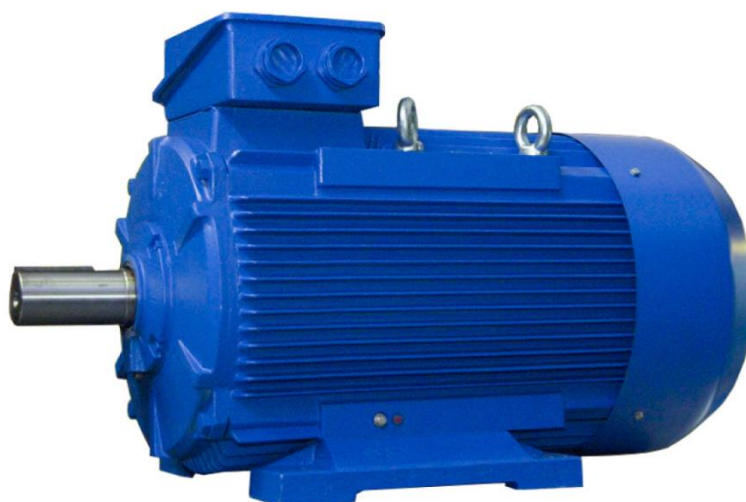


Рис. 4.2 – Електричний двигун АІР250S6

Основні технічні параметри двигуна відповідають необхідним для роботи компресора.

При виборі ПЧ для АД з КЗ ротором необхідно, щоб виконувались такі умови:

1. Паспортна потужність ПЧ повинна бути більшою або рівною паспортній потужності двигуна. Згідно з стандартами для електродвигунів приймається, що потужність в кВт відноситься до механічної потужності двигуна на валу, а не до споживаної від джерела живлення активної потужності, як це прийнято для інших споживачів електричної енергії. Багато

виробників нормують номінальні струми і потужності ПЧ при роботі на змінний і постійний момент. Деякі виробники виділяють спеціальну серію для роботи тільки на навантаження зі змінним моментом.

Для розрахунку потужності ПЧ необхідно визначити повну потужність АД:

$$S_{\text{ном АД}} = \sqrt{3}U_{\text{ном}} \cdot I_{\text{ном АД}} = 1,73 \cdot 380 \cdot 86 = 57,85 \text{ кВА} \quad (4.1)$$

де $S_{\text{ном АД}}$ - повна потужність АД, кВА; $U_{\text{ном}}$ – номінальна напруга живлення АД, В; $I_{\text{ном АД}}$ – номінальний струм АД, А.

При виборі потужності ПЧ необхідне виконання наступної умови:

$$S_{\text{ном ПЧ}} \geq 1,25 \cdot S_{\text{ном АД}} = 1,25 \cdot 57,85 = 72,31 \text{ кВА} \quad (4.2)$$

де $S_{\text{ном ПЧ}}$ - повна номінальна потужність ПЧ, кВА.

2. Номінальний (тривалий) струм ПЧ повинен бути не меншим за фактичний тривалий струм, який споживається двигуном. Пусковий струм двигуна обмежується перетворювачем по рівню (120-200% від номінального струму ПЧ) і за часом дії (зазвичай до 60 с). Ці обмеження впливають з надзвичайної чутливості силових IGBT транзисторів ПЧ до перевантажень. Тому умови пуску двигуна при живленні безпосередньо від мережі і при живленні від ПЧ відрізняються.

При подачі номінальної напруги на двигун безпосередньо (наприклад, рубильником, пускачем) від мережі, пусковий струм може досягати семикратного значення від номінального струму двигуна. При пуску двигуна від ПЧ (це плавний пуск, з плавним наростанням частоти обертання) пусковий струм може бути понижений до номінального або фактично споживаного двигуном в усталеному режимі за допомогою відповідних налаштувань ПЧ (головним чином за рахунок налаштування часу розгону). У разі, якщо вимагається швидко розігнати інерційне навантаження може

знадобитися ПЧ більшої номінальної потужності, аніж номінальна потужність двигуна.

Якщо умова неперевикнення максимального струму ПЧ при розгоні двигуна не виконується, необхідно збільшувати тривалість розгону. При цьому динамічний момент зменшиться і умова виконається. Якщо ж тривалість розгону жорстко задана, то необхідно вибирати ПЧ більшої потужності із більшим максимальним струмом.

Враховуючи, що тиск газу в системі – величина інертна(за рахунок довжини трубопроводів та наявності накопичувальних ємностей), тобто змінюється не миттєво, а з певною затримкою в часі після впливу на нього компресором, а також режим роботи компресорної установки – слідкуючий за вихідним тиском – можна збільшити час розгону електричного двигуна.

Отже, великих пускових струмів та значних струмів перерегулювання в електроприводі з використанням ЧП не буде. Тому достатньо врахувати запас потужності по струму, який повинен бути:

$$I_{\text{ном ПЧ}} \geq 1,5I_{\text{ном АД}} \quad (4.3)$$

Де $I_{\text{ном ПЧ}}$ – номінальний струм перетворювача частоти, А.

$$I_{\text{ном ПЧ}} \geq 1,5 \cdot 86$$

$$I_{\text{ном ПЧ}} \geq 129 \text{ А}$$

Бажано, щоб під час розгону електричного двигуна його момент не перевищував номінальне значення. При тривалому часі розгону можна досягти такої механічної характеристики двигуна, яка буде майже дорівнювати механічній характеристиці навантаження. Потрібен баланс між швидким розгоном (як при прямому увімкненні АД з КЗ ротором у мережу живлення) та занадто повільним (МХ двигуна буде повторяти МХ навантаження).

4.2. Функціональні можливості сучасних частотних перетворювачів

До базових функцій ПЧ відносяться [11]:

1.Реалізація різних методів керування електродвигуном. Існують перетворювачі зі скалярним і векторним керуванням, які втілюють у собі два основні завдання, розв'язувані ПЧ. Для позначення скалярного керування досить часто використовують терміни "вид кривої U/f" або "залежність U/f". Скалярне керування найпоширеніше й максимально задовольняє вимогам таких механізмів, як насоси, вентилятори, компресори, а також таких, для яких важливо підтримувати швидкість обертання, або який-небудь технологічний параметр. Метод досить простий, але має невеликий діапазон регулювання швидкості й вимагає установки додаткових датчиків для реалізації керування по швидкості й моменту. Розмаїття векторних варіантів керування вражає. Приміром, метод DTC (із прямим керуванням моментом, без установки додаткових датчиків) ефективно використовується при відносно невисоких вимогах до точності підтримки швидкості з діапазоном регулювання швидкості $D=700:1$, тобто для таких механізмів, як поршневі компресори, насоси, піднімальні механізми, конвеєри, дробарки, пилки, міксери тощо.

2.ПД-регулятор. Вбудований регулятор використовується для керування зовнішнім процесом за допомогою сигналу зворотного зв'язку. Сигнал задання може надходити через аналоговий вхід, з панелі керування за допомогою задання або через послідовний інтерфейс. При цьому вимірюється відхилення величини, яка потребує стабілізації (наприклад, тиск, швидкість, температура тощо), від заданого значення і генерується керуючий сигнал. Наявність даного регулятора всередині ПЧ дозволяє спростити систему керування й відмовитися від використання зовнішніх регуляторів (контролерів). Наявність ПД-регулятора необхідна там, де потрібна точна підтримка контрольованої величини.

3. Аналогові та цифрові входи і виходи. Аналогові виходи дозволяють більш наочно представити значення якого-небудь параметра. Наприклад, їх часто використовують для відображення на стрілочному вольтметрі частоти обертання двигуна. Однак використання цих сигналів у системах автоматизації малоймовірно, тому що вони, як правило, мають малу потужність і незадовільну якість. Аналогові входи дозволяють подавати сигнали від датчиків прямо в ПЧ, без використання яких-небудь додаткових пристроїв. Як правило, використовуються уніфіковані типи сигналів (0-5 В, 0-10 В, 4-20 мА). Крім того, є можливість використання живлення від перетворювача для підключення потенціометра, наприклад, для задання частоти обертання. Дискретні входи дозволяють керувати ПЧ із кнопок, установлених на лицьовій панелі шафи, або з поста керування. Як правило, входи використовуються для подачі команд типу "Пуск", "Стоп", "Реверс", або для ступінчастого перемикання швидкостей двигуна. Натискаючи кнопки „Пуск”, "Номінальна швидкість 1", "Збільшити швидкість", "Зменшити швидкість", "Стоп" - оператор технологічного процесу може змінювати швидкість обертання АД та зупиняти двигун дистанційно. До дискретних виходів також можна під'єднувати контакти кінцевих вимикачів, перемикачів, реле тощо. Дискретні виходи використовуються також для сигналізації режимів роботи ПЧ, а також для керування зовнішніми реле та логічними схемами. Дискретні виходи можна розділити на дві категорії: силові (релейні) виходи для керування зовнішніми електромагнітними реле і виходи типу "відкритий колектор" для роботи з зовнішніми логічними схемами. До дискретних виходів також можна підключати індикаторні лампочки "Аварія", "Обертання вперед", "Обертання назад" тощо.

4. Інтерфейси зв'язку. У більшості сучасних ПЧ передбачена можливість підключення в мережу автоматичного керування. Звичайно використовуються протоколи RS-485 (RS-232), Modbus, Profibus, Interbus, CANOpen, DeviceNet. З'єднання перетворювачів у мережу дозволяє

побудувати більш складну систему автоматичного керування технологічними процесами з використанням контролерів і промислових комп'ютерів.

5.Моніторинг навантаження (захист двигуна від механічного перевантаження/недовантаження) дозволяє використовувати ПЧ як пристрій для контролю навантаження і захисту двигуна від механічних перевантажень і недовантажень. З появою неномінального навантаження двигуна ПЧ може зупинити двигун і здійснити затримку перед повторним включенням або подати аварійний сигнал. Використання цієї функції дозволяє уникнути дорогої установки додаткових датчиків (оскільки для останніх потрібна установка безпосередньо в технологічний процес).

6.Взаємодія із системою автоматизації верхнього рівня. Здійснюється за принципом "ведучий - ведений" (Master - Slave), причому ПЧ виступає в ролі веденого пристрою. Програмне забезпечення реалізує необхідний протокол обміну, забезпечує прийом і виконання команд керування, а також видачу необхідної інформації про поточний режим роботи, стан датчиків і параметрів ПЧ. У випадку двохпроцесорної системи забезпечується можливість спільної роботи основного контролера ПЧ і контролера пульта керування.

7.Діагностика апаратури і самодіагностика. Діагностика полягає у визначенні працездатності різних модулів, що входять до складу ПЧ (як силових, так і керуючих) і підключеного електродвигуна. Крім того, проводиться контроль цілісності програми й даних, збережених в енергонезалежній пам'яті.

8.Реалізація захисних функцій. Сучасні ПЧ реалізують максимальний струмовий захист, захист від перегріву двигуна і перетворювача, від перевантаження, надмірних відхилень напруги живлення, обриву фази, міжфазного короткого замикання, замикання фази на землю й помилок зв'язку. Коректний вихід зі стану аварії можливий, тільки якщо ліквідовані

причини її виникнення. Для окремих видів аварій (наприклад, провалу напруги в мережі, аварії з в'язку) система в стані самостійно відстежити можливість продовження роботи. Відновлення працездатності системи після інших аварій вимагає втручання обслуговуючого персоналу.

9.Збереження інформації про режими, тривалість роботи, періодичності включення ПЧ, ведення журналу збоїв і аварій, що відбулися. Це дозволяє проаналізувати ефективність використання ПЧ й полегшує пошук причин збоїв у роботі устаткування.

10.Вибір несучої частоти ШІМ. Оптимальний вибір цього параметра являє собою складне завдання. З одного боку збільшення частоти ШІМ дає ряд позитивних ефектів:

- підвищується динамічна точність відтворення вхідних впливів (завдань);
- розширюється діапазон робочих частот системи ПЧ-АД;
- зменшуються амплітуди пульсацій струмів і електромагнітного моменту двигуна, а також залежні від них складові втрат у АД і колі живлення;
- зменшується додатковий шум двигуна, що дозволяє в деяких випадках відмовитися від установки вихідних фільтрів;
- створюються умови для підвищення швидкодії й поліпшення інших показників якості замкнених систем автоматичного регулювання АД.

З іншого боку збільшення частоти ШІМ призводить до ряду негативних ефектів, а саме:

- підвищення частоти комутації транзисторів IGBT викликає пропорційне збільшення комутаційних втрат, внаслідок цього знижується корисна потужність інвертора;

- збільшуються діючі значення ємнісних струмів у кабелях живлення й елементах конструкції двигуна, що збільшує втрати від цих струмів у системі ПЧ-АД;
- ускладнюється проблема обмеження перенапруг.

Оптимальне значення частоти модуляції вибирається в кожному випадку з урахуванням конкретних умов застосування ПЧ і домінуючих вимог. Діапазон частот модуляції сучасних транзисторних ПЧ із ШІМ для електропривода лежить у межах від одиниць до десятків кілогерц.

11. Плавний пуск і зупинка двигуна з вибором форми кривої зміни швидкості (звичайно використовують лінійну, S- і U- подібну характеристики зміни швидкості) і роздільним налаштуванням часу розгону і гальмування з автоматичною корекцією прискорення у випадку перевищення допустимого моменту (ця опція дозволяє задавати мінімальну тривалість розгону та гальмування без необхідності перевірки умови перевищення максимального струму ПЧ. У випадку якщо таке перевищення має місце ПЧ самостійно збільшує тривалість розгону/гальмування АД).

12. Режим гальмування (на вибігу, частотне гальмування, гальмування постійним струмом). Найпростіший тип гальмування двигуна – на вибігу – відбувається від дії моментів опору у приводі та робочій машині. При цьому ПЧ не керує двигуном. Частотне гальмування АД полягає у поступовому зменшенні частоти напруги живлення АД (рекуперативне гальмування). Гальмування постійним струмом (динамічне гальмування) часто використовується для „догальмовування” двигуна на низькій швидкості.

13. Пропуск частот, при яких робота електропривода небажана, наприклад, через ризик виникнення механічних резонансів.

14. Фіксовані набори параметрів. Велика кількість параметрів дає користувачеві можливість більш гнучко налаштувати ПЧ під необхідні завдання. Цю функцію зручно використовувати, коли потрібно змінити

режим роботи двигуна. Це здійснюється шляхом вибору в меню набору параметрів, які відповідають потрібному режиму роботи. Тобто один ПЧ може працювати з декількома електродвигунами різної потужності, що функціонують на різних робочих механізмах.

15. Підтримка високого пускового моменту на низьких частотах за рахунок додаткового збільшення напруги.

16. Стабілізація швидкості обертання шляхом впливу на частоту у функції навантаження (функція компенсація ковзання).

17. Налаштування реакції на стрибок швидкості або моменту навантаження з урахуванням інерційних властивостей механізму.

18. Автоматичне визначення параметрів підключеного електродвигуна (індуктивність, опір обмоток тощо).

19. Регулятор швидкості обертання внутрішнього вентилятора, дозволяє зменшити загальне енергоспоживання ПЧ.

4.3. Додаткові пристрої для частотно-керованих електроприводів компресора

1. Дросель виконує захисну функцію як відносно самого перетворювача, так і відносно мережі електропостачання. Він є двостороннім буфером між нестабільною мережею електропостачання і ПЧ - джерелом вищих гармонік (5-ої, 7-ої, 11-ої, 13-ої тощо). Вищі гармоніки спотворюють синусоїду мережі живлення, викликаючи збільшення втрат потужності електричних машин і приладів, що живляться від мережі, а також можуть привести до некоректної роботи електронних пристроїв, які отримують живлення від цієї мережі. Мережевий дросель, як елемент електричного кола, для вищих гармонік має великий опір і зменшує їхній вплив на мережу електропостачання. З іншого боку, він захищає ПЧ від коротких замикань на його виході, обмежуючи

швидкість наростання струму короткого замикання і сталий струм короткого замикання, сприяючи успішному спрацьовуванню струмового захисту ПЧ.

2. Гальмівний резистор є додатковим пристроєм, що перетворює надлишкову енергію у тепло, при гальмуванні двигуна, керованого від ПЧ (наприклад при гальмуванні значних обертових мас).

Оскільки компресор має значний момент опору та відносно малий момент інерції його зупинка шляхом відключення електричного двигуна від мережі живлення відбувається досить швидко, тому встановлення гальмівного резистора в електропривод компресора є недоцільним.

3. Рекуперативний модуль. Під час рекуперативного гальмування (повернення енергії в живильну мережу), двигун діє як генератор, віддаючи потужність через модуль IGBT у проміжну ланку постійної напруги. Рекуперативний модуль може бути у базовій комплектації ПЧ, однак при цьому значно підвищується вартість ПЧ. Такі ПЧ рекомендується використовувати для приводів з частими пусками і зупинками. Загалом рекуперативне гальмування бажано застосовувати в тих випадках, коли швидкість двигуна повинна тільки зменшуватися без досягнення повної зупинки.

Враховуючи, що ПЧ використовується в компресорній установці, в якій немає значних обертових мас – генерація електроенергії буде мізерною, у порівнянні із споживаною, тому використання рекуперативного модуля в електроприводі компресора є нераціональним.

4.4. Вибір моделі частотного перетворювача

Основні умови вибору ПЧ ($S_{\text{ном ПЧ}} = 75 > 72,31$ кВА; $I_{\text{ном ПЧ}} = 150 > 129$ А) виконуються, отже для живлення електричного двигуна вибираємо перетворювач частоти E.NEXT e.f-drive.pro.75, паспортні дані якого наведені в таблиці 4.3 [14].

| Найменування | Значення |
|--|------------------|
| Маркування | e.f-drive.pro.75 |
| Напруга живлення, В | 380 |
| Частота напруги живлення, Гц | 50; 60 |
| Вихідна напруга, В | 0-380 |
| Вихідна частота при векторному керуванні, Гц | 0-300 |
| Вихідна частота при скалярному керуванні, Гц | (0-3200) |
| Номінальна потужність, кВт | 75 |
| Номінальний струм, А | 150 |
| Роздільна здатність частоти, Гц | 0,01 |
| Діапазон швидкості | 1:100 |
| Точність стабілізації швидкості, % | ±0,5 |
| Перевантажувальна здатність, до 150% (до 180%), с | 60 (3) |
| Рекомендована температура навколишнього середовища при експлуатації, °С | -10 ~ +40 |
| Рекомендована вологість повітря навколишнього середовища при експлуатації (не більше), % | 90 |
| Габаритні розміри: | |
| висота, мм | 557 |
| ширина, мм | 307 |
| глибина, мм | 266 |

Таблиця 4.3 – Паспортні дані перетворювача частоти



Рис. 4.3 – Частотний перетворювач E.NEXT e.f-drive.pro.75

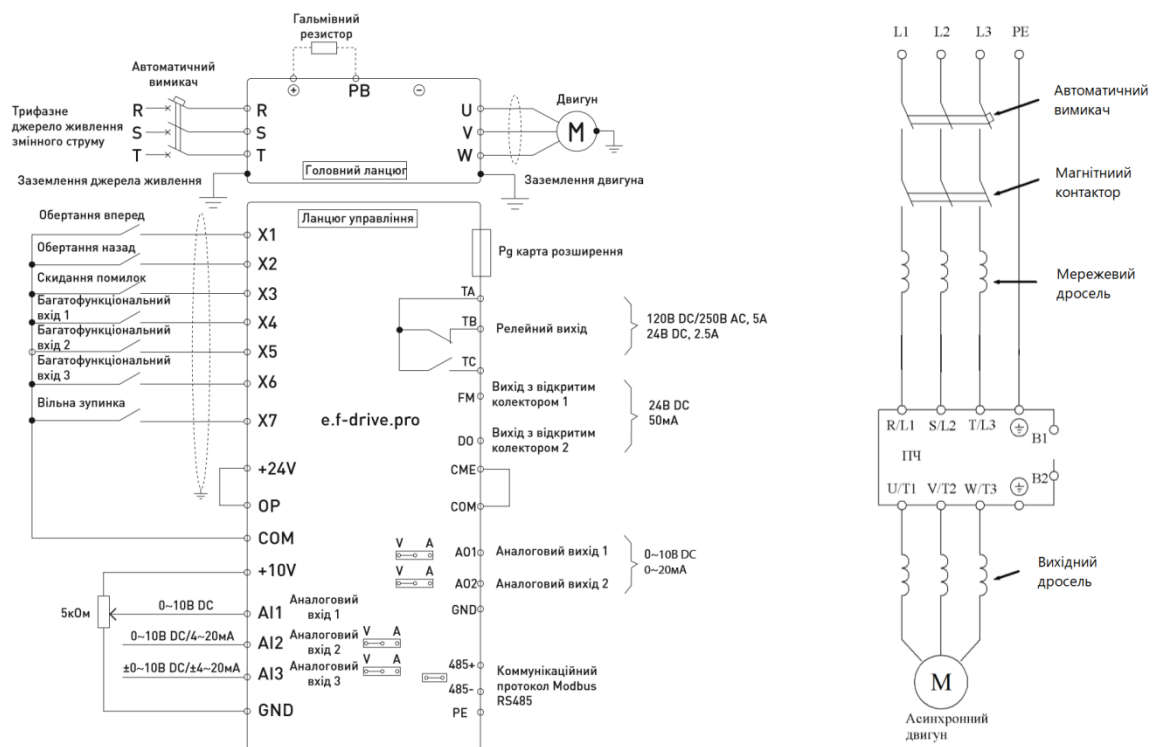


Рис. 4.4 – Загальна схема підключення ПЧ

Рекомендовано встановити дросель з номінальним струмом ПЧ, який підключити на вихідні клеми ПЧ (U,V,W) для зменшення впливу вищих гармонік струму та як наслідок - покращення теплового режиму двигуна.

4.5. Висновки за розділом

Відповідно до технічних параметрів компресора було обрано електричний двигун, який приводить компресор в рух.

Розраховано основні характеристики, за якими виконується вибір частотного перетворювача для даного електричного двигуна.

При виборі ЧП враховано його функціональні можливості, які будуть використовуватись, доцільність застосування додаткових пристроїв для ЧП.

Врахувавши всі параметри та розрахунки, які необхідні для вибору ЧП, для керування електричним двигуном АИР250S6 компресора ЗВШ 1,6-3,1/46 вибираємо перетворювач частоти E.NEXT e.f-drive.pro.75.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі магістра розглянуто питання модернізації системи керування електроприводом компресорної установки середньої потужності в системах газопостачання.

Проведено аналіз систем керування електроприводом компресора, розглянуто проблему пуску асинхронних двигунів, використання контактних та безконтактних комутаційних апаратів електроприводу компресора.

Розглянуто основні шляхи модернізації системи керування електроприводом компресора, а саме: перелік загальних вимог до електроприводу компресорів, процесу керування компресорною установкою. Описаний аналіз негативних факторів, що впливають на роботу компресорної установки, існуючий алгоритм керування електроприводом компресора. Запропоновано шлях модернізації алгоритму керування електроприводом компресора.

Описано синтез автоматизованої системи електропривода компресора, доцільність застосування частотного регулювання електродвигунів, скалярне та векторне регулювання асинхронним двигуном, систему керування електроприводом компресора та автоматизацію компресорних станцій.

Розглянуто вихідні дані для вибору частотного перетворювача, умови його вибору, функціональні можливості сучасних частотних перетворювачів та додаткові пристрої для них, здійснено вибір моделі частотного перетворювача для компресора.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Пускорегулювальна контактна і безконтактна апаратура. Доступ до ресурсу: <https://studfile.net/preview/5680047/page:4/>
2. Аналіз впливу напруги живлення на тепловий стан електродвигуна поршневого компресора ДК-406 / Губріч І.С. – Дніпро.: 2023. – 74с.
3. Електропривод: Навч. посіб. / О.М. Закладний, В.В. Прокопенко, О.О. Закладний –К.: НТУУ «КПІ», 2008. – 316 с.
4. Основи електропривода виробничих машин та комплексів: навч. посіб. / В.Е. Воскобойник, В.А. Бородай, Р.О. Боровик, О.Ю. Нестерова – Д.: Національний ТУ «Дніпровська політехніка», 2021. – 254 с.
5. Електропривод гірничо-металургійних виробництв. Доступ до ресурсу: https://moodle.znu.edu.ua/pluginfile.php/1186610/mod_resource/content/1/16%20%E2%80%94%20%D0%BA%D0%BE%D0%BF%D0%B8%D1%8F.pdf
6. Основи промислового електроприводу: лаб. практик. / В.П. Лукавенко, А.І. Зілінський - НТУУ «КПІ», 2022. – 71 с.
7. Що таке частотний перетворювач. Доступ до ресурсу: <https://spc.com.ua/blogs/frequency-inverters/what-is-a-frequency-inverter-and-why-is-it-needed-and-how-to-choose-it>
8. Електропривод робочих машин: підручник / П.О. Василега. – Суми: Сумський державний університет, 2022 – 290 с.
9. Принцип роботи частотного перетворювача. Доступ до ресурсу: <https://prk.com.ua/ua/a456638-printsip-raboty-chastotnogo.html>
10. Компресорні станції : підручник / Г. А. Бондаренко, Г. В. Кирик. – Суми : Сумський державний університет, 2016. – 385 с.
11. Частотне керування асинхронним приводом: Методичні вказівки для самостійної роботи з дисципліни „Основи електропривода” для

- студентів напряму підготовки б .100101 – „Енергетика т а електротехнічні системи в АПК” / Ловейкін В.С., Ромасевич Ю.О.– Ніжин.: 2011. – 98 с.
12. Сучасні перетворювачі частоти в системах електропривода: навч. посібник/ М.В. Загірняк, Т.В. Коренькова, А.П. Калімов, А.І. Гладир, В.Г. Ковальчук – 2-ге вид., перероблене і доповн. – Харків: Видавництво «Точ-ка», 2017. –206 с.
 13. Технічні характеристики електричного двигуна АИР250S6. Доступ до ресурсу:<https://slemz.com.ua/elektrodviguni/zagalnopromyslovi/elektrodvugun-air-250s6-45kvt-1000obhv>
 14. Частотний перетворювач e.f-drive.pro. Посібник користувача. 213с.
 15. Обґрунтування енергоресурсозберігаючих режимів і принципів керування електроенергетичних комплексів гірничометалургійних підприємств / Півняк Г., Випанасенко С., Бешта О.: 2009. – 312 с
 16. Будова тиристорного пускача та принцип дії. Доступ до ресурсу: <https://studfile.net/preview/9196007/page:5/>
 17. Теорія електроприводу: Навчальний посібник. – 2-е вид. перероб. і доп. – Д. Колб А. А, Колб А. А., Національний гірничий університет, 2011. – 540 с.
 18. Теорія електропривода/ В. І. Колотіло, О. В. Донець; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2021. – 148 с.

Додаток А

CHAPTER 1. ANALYSIS OF ELECTRIC COMPRESSOR MOTOR CONTROL SYSTEMS

1.1. The problem of starting induction motors

It is well known that direct start of an electric motor is accompanied by a current consumption from the network, which is 6-8 times higher than the nominal current. The duration of overcurrents is directly proportional to the moment of inertia of the driven mechanism and the load on the motor shaft. High current values cause significant heating of the motor windings, which leads to aging of the insulation and, accordingly, to a decrease in the service life of the motor. Due to the heating of the windings, there are restrictions on the number of motor starts. In addition, high starting currents lead to deep voltage drops in the power supply network, which often causes contactors to "drop out" and failures in the control circuits. This problem becomes more significant in power supply networks with limited power, for example, from a diesel generator.

These problems are especially pronounced during the start of high-power engines. Impulse "overcurrents" that occur during direct engine start create a shock electromagnetic moment that is transmitted through the engine shaft to the mechanism and causes vibrations of the engine and mechanism. The result of such shock loads is breakage of shafts, couplings, gearboxes, etc.

The problem of current overloads during direct engine start is significantly complicated by mechanisms with a large moment of inertia, where the start becomes protracted and the current overload exists for a long time. In addition to heating the engine windings, there is also overheating of the engine power cables, which leads to the need to use cables with a larger cross-section.

The described disadvantages are also inherent in engine start schemes with "star-delta" winding switching, with the difference that here the current amplitudes are reduced and the negative consequences of direct start are somewhat mitigated.

1.2. Contact switching devices of the compressor electric drive

For a long time, control of electric motors of various powers was carried out only in the "on - off" mode, where the basic element of this control scheme was a contactor (Fig. 1.1).

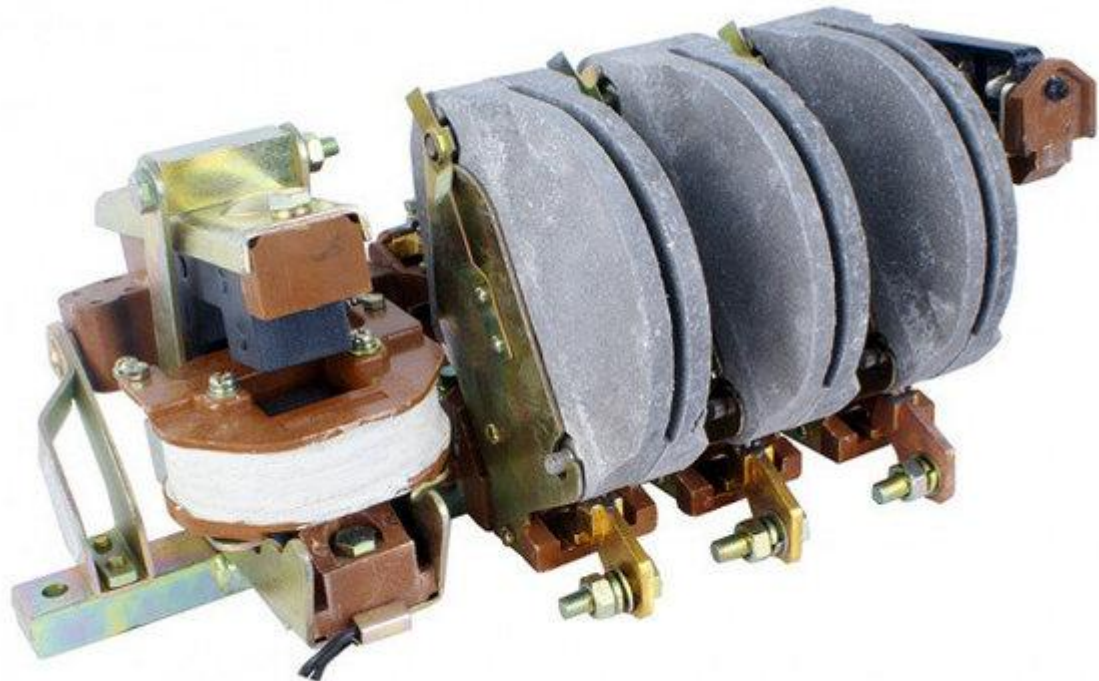


Fig. 1.1 – Appearance of a contactor

A contactor is an electrical device designed for frequent switching of power electrical circuits. Closing or opening of the contactor contacts is most often carried out under the influence of an electromagnetic drive.

Contactors are produced with a wide range of technical characteristics[1]:

- by rated current - from units of amperes to several kiloamperes
- by rated voltage of power contacts - from 27V to 2kV
- by operating frequency of the alternating current network - from 50Hz to 10kHz

- by voltage of control circuits - 12, 24, 48, 110, 220, 380V

To facilitate the start of an asynchronous motor with a squirrel-cage rotor, 2, 3, 4-speed motors are used, or a reduced voltage start is used. Voltage reduction is achieved in the following ways:

- using an autotransformer;

- by switching the windings from "star" to "delta";

It is worth noting that when the voltage is reduced, the starting torque of the motor decreases, and this dependence is quadratic ($M = U(n^2)$).

The use of 2, 3, 4-speed motors is usually more expensive to implement due to the cost of such a motor.

When using an autotransformer to start an asynchronous motor with a squirrel-cage rotor, a reduced voltage is applied to the motor, which reduces the starting current. After the motor reaches a steady state, the position of the autotransformer is changed, thereby increasing the supply voltage. This action is repeated until the motor supply voltage is the mains voltage. This control method requires the purchase of an autotransformer, and worsens the efficiency of the installation due to energy losses in it. Such a control scheme has more disadvantages than advantages.

Using the "star-delta" scheme (Star-Delta) [Fig. 1.2] is possible only when the motor supply voltage is 380/660V, in other cases, when the motor supply was, for example, 220/380 - it was necessary to change the mains supply voltage, for which a transformer was used, which in turn increased the total cost of the equipment.

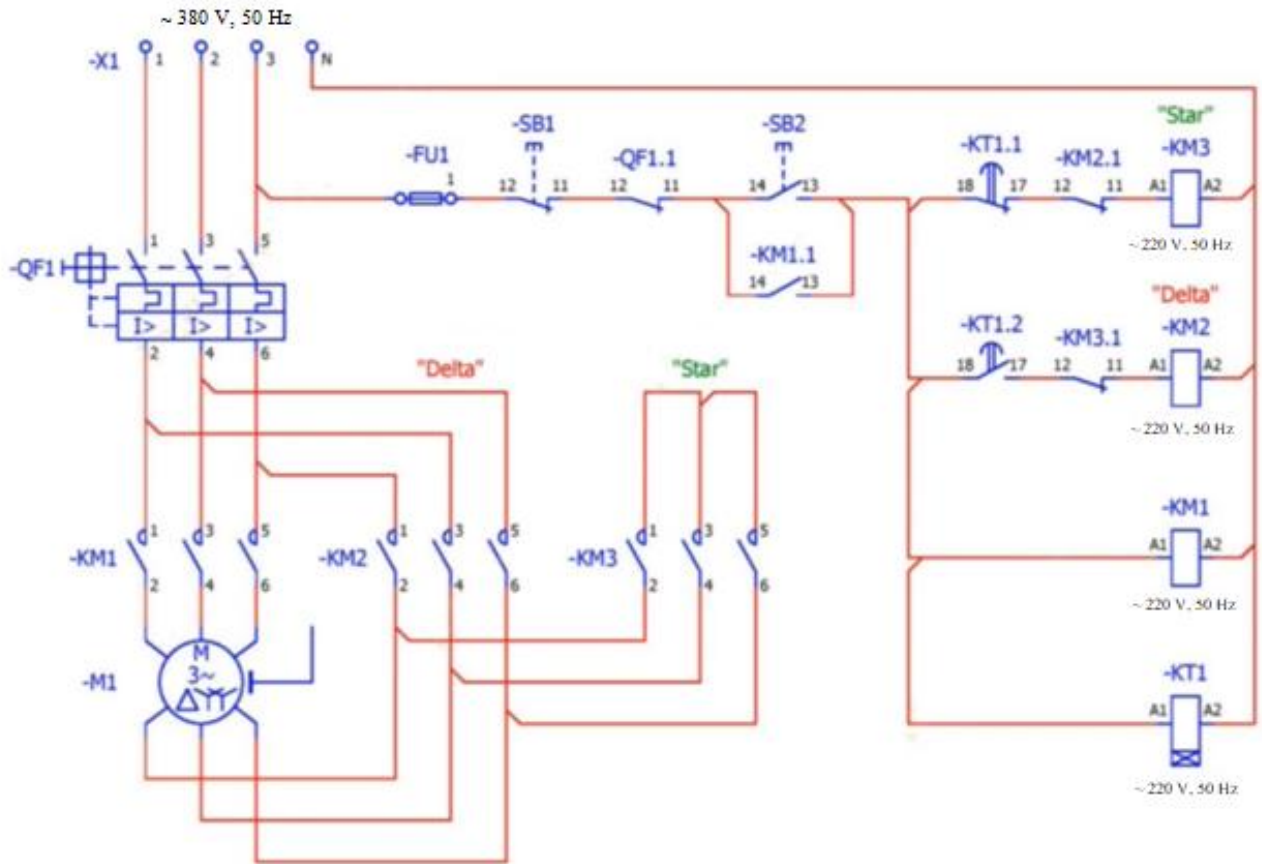


Fig. 1.2 – Electrical diagram of starting an electric motor “star-delta”

The principle of operation of this scheme: To start the engine, you need to press the SB2 button. At the same time, voltage is applied to the coils of contactors KM1 and KM3, time relay KT1. The engine accelerates, since it is switched on according to the “star” scheme. After a certain time has passed, which is set on the time relay KT1 (so that the engine reaches its rated speed), contacts 17 and 18 of KT1.1 open, voltage is removed from the coil of contactor KM3, and contacts 17 and 18 of KT1.2 close, power is supplied to the coil of contactor KM2 – now the engine operates according to the “delta” scheme. Contacts 12 and 11 of contactors KM2.1 and KM3.1 – implement electrical blocking of simultaneous switching on of contactors KM2 and KM3. To stop the engine, you need to press the SB1 button. To protect the control circuits, a QF1.1 circuit breaker and a FU1 fuse are used.

So, with this starting method, before turning on the power, the stator is turned on according to the "star" scheme, and when the engine reaches its rated speed, the stator windings are switched to the "delta" scheme.

Thus, when the engine starts, the voltage on the stator is $\sqrt{3}$ times less than the rated (linear) voltage. Applying the known ratios for linear and phase voltages and currents of a three-phase network, we obtain the ratio of the starting currents:

$$\frac{I_{start}^Y}{I_{start}^\Delta} = \frac{\frac{U_{lin}}{\sqrt{3}} * \frac{1}{Z}}{\sqrt{3} * \frac{U_{lin}}{Z}} = \frac{1}{3} \quad (1.1)$$

where: I_{start}^Y – starting current when connecting the windings in a "star", [A]; I_{start}^Δ – starting current when connecting the windings in a "delta", [A]; U_{lin} – linear voltage of the power supply network, [V]; Z – phase resistance of the motor, [Ohm].

From formula (1.1) it is clear that starting a motor with a squirrel-cage rotor by switching the windings from a "star" to a "delta" reduces the starting current by three times.

Advantages of this control scheme:

Low price;

Reliability of the starting and regulating equipment;

Ease of installation and connection;

Low qualification requirements for electrical personnel who installed, operated, maintained and repaired this equipment;

Resistance to impulse overvoltages, short-term overloads.

Disadvantages:

Inability to regulate the power, speed of rotation of the electric motor;

Contactors required frequent technical inspection and repair to continue their normal operation;

Sensitivity to voltage drops in the power supply network, as a result - contactors fail and failures in the control circuits;

Noise and vibration during operation;

Prohibition of installation in explosive, fire-hazardous premises.

It is impossible to implement direct power and speed control based on contactors, therefore, to automate the technological process of supplying gas by the compressor to the main pipeline and satisfy the requirements for the pressure and gas quantity (which must be within clearly established limits), the time-based power control method is used.

When the pressure drops below the set minimum value, the pressure sensor sends a signal to the contactor control circuits, and the electric motor turns on.

The gas pressure in the system increases and after it reaches the set maximum value, the pressure sensor sends a signal to the contactor control circuits and the electric motor turns off.

From the point of view of mechanical durability, frequent switching on and off increases the risk of compressor failure, because it always turns on under difficult conditions (design features), reduces the compressor resource, which negatively affects the economic component of production.

1.3. Contactless switching devices of the compressor electric drive

Achievements in power electronics have made it possible to create contactless switching devices (CSDs). CSDs are devices designed to turn on and off (switch) electrical circuits without physically breaking the circuit itself. The basis for the construction of contactless devices are various elements with nonlinear electrical resistance, the value of which varies within quite wide limits, currently these are transistors, thyristors, and previously magnetic amplifiers were used. One of the frequently used types of CSDs is a thyristor starter [TS] (Fig. 1.3).



Fig. 1.3 – Appearance of a thyristor starter

TS is an electronic voltage regulator, the main element of which is a thyristor. The main purpose of the soft starter is to smoothly accelerate an asynchronous motor to its rated speed by means of a stepless controlled increase in the voltage on the motor stator.

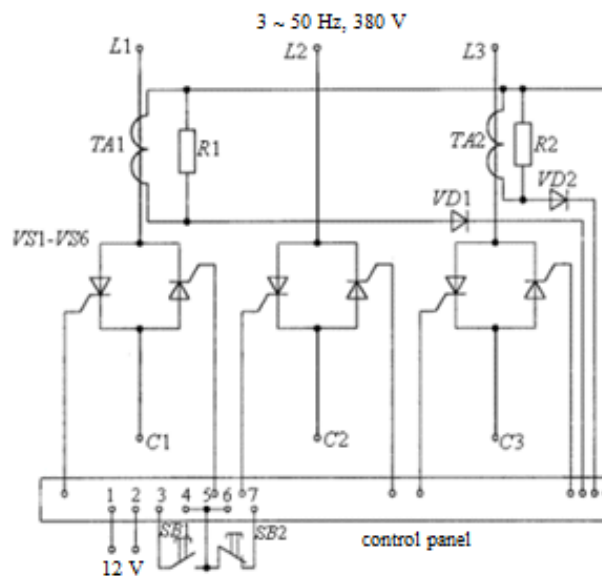


Fig. 1.4 – Schematic diagram of a thyristor starter

Voltage regulation is carried out by a pulse-phase control system by changing the opening angle of the thyristors (Fig. 1.5). The larger the opening angle of the thyristor, the greater the voltage applied to the motor, but the frequency of the power supply remains unchanged.

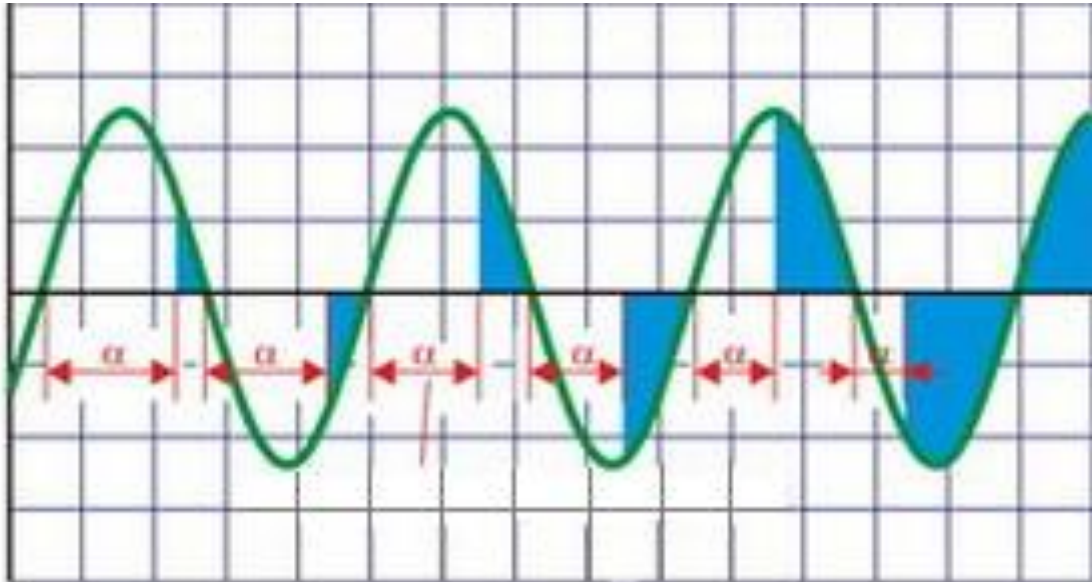


Fig. 1.5 – Formation of the output voltage of the TS by changing the opening angle of the thyristors

Since the torque of an asynchronous motor is proportional to the square of the voltage, simultaneously with the voltage limitation, a decrease in the starting torque occurs. Due to the smooth increase in the voltage on the motor, a decrease in the starting currents is ensured ($I_{\text{start}} = 2...4I_{\text{nom}}$), while the motor starting time remains small, although it increases compared to direct start.

The value of the starting current is determined by the setting of the initial and final opening angles of the thyristors, as well as the required duration of the voltage increase (smooth start time). With different parameters of the motor current limitation, different mechanical characteristics of the motor are obtained during the start-up process. It should be noted that despite the presence of a load $I_{\text{start}} = 2...3I_{\text{nom}}$, at low speeds of rotation (at the beginning of the start-up), the torque developed by the motor is significantly lower than the nominal one.

This fact leads to the fact that the use of TS for starting mechanisms with a large static torque on the shaft at low speeds is possible only with a significant overload. This overload can be compared with the current load that occurs during direct start of such mechanisms.

It should also be taken into account that regardless of the value and nature of the change in the load on the shaft, starting the engine using TS at $I_{\text{start}} \leq 1.5I_{\text{nom}}$ is practically impossible.

It should be noted that the use of a pulse-phase control system in TS leads to a deterioration of the harmonic component of the current consumed from the network. When TS is operating, such deterioration is manifested only in the modes of soft start and soft stop of the engine, while when the engine is operating at rated speed, there is no additional harmonic load on the network.

Some manufacturers of soft starters claim to have a built-in energy saving function, which allows you to achieve additional electricity savings when reducing the load on the engine. They achieve such savings by reducing the voltage on the motor windings, but it is not mentioned that in such modes the harmonic load on the network increases and additional electricity losses occur that occur when switching thyristors. In addition, when operating in such an energy-saving mode, the current in the motor differs from the sinusoidal one, the consumption of reactive power increases, and pulsations of torque and rotation speed occur, which nullifies all the advantages of the mode.

One of the limitations on the use of TS is the value of the moment of inertia of the mechanism. In the case of too large a moment of inertia, the motor start becomes protracted (more than 15 seconds); in this case, $I_{\text{start}} = 2.5...3I_{\text{nom}}$ occurs for a long time, which can lead to overheating of both the motor and the power part of the TS itself. Long-term start-up using TS is useless in terms of energy, thermal and technological parameters. The TS linearly changes the amplitude of the voltage supplied to the stator windings of the electric motor, while the voltage frequency remains the mains (50 Hz). As a result, at low speeds of rotation due to increased slip, almost all the energy supplied to the electric motor is spent on heat generation.

Since the torque of the electric motor has a quadratic dependence on the voltage, the motor will start only when the motor torque becomes greater than the load torque. Therefore, when setting a long acceleration time, part of this time falls

on the section with high slip and low torque on the motor shaft, which is unacceptable from the point of view of energy and thermal characteristics.

The most significant limitation on the use of TS is imposed by fundamentally limited functionality. When the voltage changes, the value of the critical slip does not change, therefore, the maximum torque for any voltage changes corresponds to the slip value $s = 0.1 \dots 0.2$. This determines the relatively narrow range of adjustment of the motor shaft rotation speed that the TS can provide.

To start the compressor, a significant torque is required, and as is known, the torque of an asynchronous motor is proportional to the square of the voltage. The transformer reduces the operating voltage, and therefore the starting torque decreases in square, so this equipment is not suitable for starting the compressor, especially with frequent starts, especially not for freewheeling. Even when using them to start the compressor, the electric motor will quickly overheat due to insufficient starting torque (after all, a soft start takes several seconds and during this time a short-circuit current will flow through the motor windings) and, accordingly, the thermal protection of the motor will be triggered, or the circuit breaker will trip. As a result, the compressor cannot be turned on until the motor cools down, or until the personnel on duty turn on the circuit breaker. Such options are unacceptable due to the significant downtime of the equipment and the need for intervention by operational personnel to restore engine operation.

Therefore, TS cannot be used in technological processes where constant regulation of the engine speed or technological parameter (for example, pressure in the pipeline) is required. For such tasks, the optimal solution is to use frequency converters.

It should be noted that the use of frequency converters will allow for a smooth start of the engine at a current that does not exceed the rated current of the engine. In such mechanisms, only the use of a frequency converter will ensure a smooth start and eliminate all the unpleasant aspects associated with direct engine start. In addition to eliminating current overloads that lead to engine overheating and

network voltage drops, TSs provide other advantages determined by the area of their application.

Advantages of TSs compared to traditional contact ones [16]:

- Smooth regulation of the power supplied to the electrical receiver
- Implementation of smooth shock-free start and braking of engines
- High electrical durability (15×10^6 cycles).
- High reliability and durability, ease of operation.
- Short shutdown time (0.02 s)
- Current limitation
- Phase switching
- The absence of an arc during switching allows their use in explosive environments.

The disadvantages of TS include:

- Circuit complexity
- Large dimensions, weight
- High cost
- Narrow speed control range
- Deterioration of the harmonic component of the current occurs during start-up.

Frequency converters (or frequency converters) are electronic devices used to change the speed and torque of asynchronous and synchronous electric motors by applying a changed frequency and supply voltage to the motor. They are usually used in automatic control systems, including industrial and commercial systems such as pumps, fans, compressors, conveyors, and others.

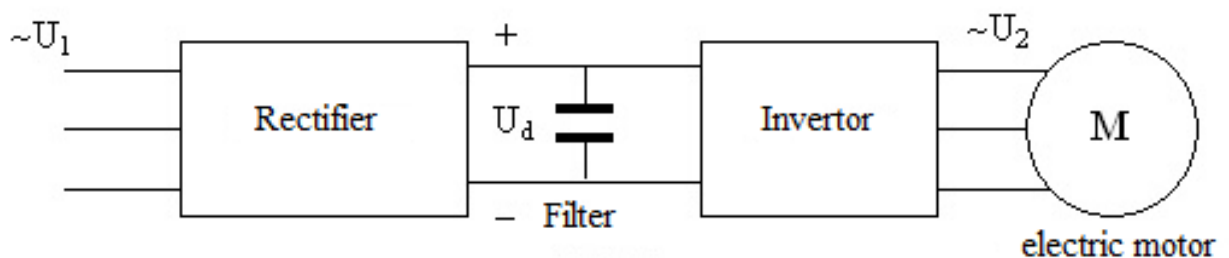


Fig. 1.6 – Block diagram of a low-voltage frequency converter based on IGBT transistors

The principle of operation of a low-voltage frequency converter based on IGBT transistors [9]:

The alternating voltage of the power supply network (U_{in}) with a constant amplitude and frequency ($U_{in} = \text{const}$, $f_{in} = \text{const}$) is supplied to a controlled or uncontrolled rectifier. A filter is used to smooth out the ripples of the rectified voltage (U_{rect}). The rectifier and the capacitive filter form a direct current link. From the filter output, a direct voltage (U_d) is supplied to the input of an autonomous pulse inverter. The autonomous inverter of modern low-voltage converters is based on bipolar power transistors with an insulated gate IGBT. The inverter converts the direct voltage (U_d) into a three-phase pulse voltage of variable amplitude and frequency. According to the signals of the control system, each winding of the electric motor is connected through the corresponding power transistors of the inverter to the positive and negative poles of the DC link.

The duration of connection of each winding within the pulse passage period is modulated according to a sinusoidal law. The largest pulse width is provided in the middle of the half-period, and decreases towards the beginning and end of the half-period. Thus, the control system provides pulse-width modulation (PWM) of the voltage applied to the motor windings. The amplitude and frequency of the voltage are determined by the parameters of the modulating sinusoidal function.

At a high PWM frequency (2...15 kHz), the motor windings, due to their high inductance, act as a filter. Therefore, practically sinusoidal currents flow in them. In converter circuits with a controlled rectifier, a change in voltage amplitude can be achieved by adjusting the value of the DC voltage (U_d), and a change in frequency - by the inverter operating mode.

If necessary, a filter is installed at the output of the stand-alone inverter to smooth out current ripples. (In IGBT converter circuits, due to the low level of higher harmonics in the output voltage, there is practically no need for a filter.)

Thus, a three-phase (if necessary, single-phase) alternating voltage of variable frequency and amplitude ($U_{out} = \text{var}$, $f_{out} = \text{var}$) is formed at the output of the frequency converter.

For the correct operation of the frequency converter, several factors must be taken into account: the type of motor, its power, nominal frequency and voltage, as well as the required speed range. In addition, it is necessary to ensure the correct setting of the frequency converter parameters and the selection of optimal settings depending on the specific operating conditions.

There are three main types of frequency converters: scalar (V/F), vector (FOC) and direct torque control (DTC). Each type has its own strengths and weaknesses, so the choice of the converter depends on the specific task and type of motor.

Scalar Frequency (V/f) Converters

V/f converters, also known as scalar converters, are the simplest and most common type of frequency converter. They operate by maintaining a fixed voltage-to-frequency ratio, commonly referred to as the “V/f ratio” [3]. As the frequency changes, the voltage is adjusted proportionally to maintain the V/f ratio (Figure 1.7).

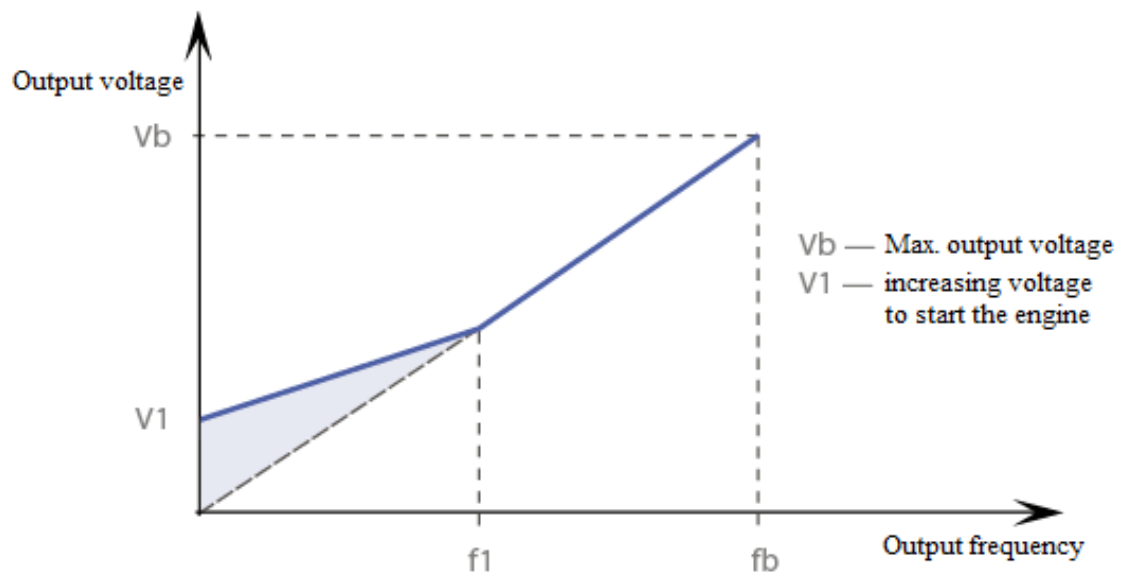


Fig. 1.7 – Output voltage vs. output frequency graph

Scalar frequency converters are typically used with standard three-phase asynchronous motors that have constant torque. They are well suited for applications where speed control is not critical (e.g. fans, pumps, and conveyors).

Vector frequency converters

Vector converters are also known as field-controlled (FOC) converters. They are more advanced than scalar converters because they use a more sophisticated control algorithm that takes into account the motor magnetic field and rotor position. This allows for more precise control of the motor speed and torque, and also makes them well suited for applications where high-performance speed control is required: machine tools, cranes, robotics, and any other application where precise speed control is required.

Vector converters are in turn divided into 2 types:

- Sensorless Vector Control (SFVC)
- Closed Loop Vector Control (CLVC)

Sensorless Vector Control (SFVC) [7]:

This is a method of controlling an induction motor that uses a mathematical model to control the torque and speed of the motor. It is based on measuring the current and voltage, as well as calculating the frequency and power of the motor to determine its speed and rotor position. This method does not require the use of sensors to measure the rotor position, which makes it more economical and convenient to install. Instead, SFVC uses mathematical algorithms to calculate the rotor position, determining it based on the measured parameters. The advantage of the SFVC method is the ability to achieve high accuracy in maintaining the torque and speed of the induction motor. In addition, this method also provides smoother motor starting and stopping, as well as improved efficiency and energy savings.

Frequency converters (SFVC) are used to control conveyors, machine tool spindles, and other applications where stability of maintaining the speed within $\pm 0.5\%$ of the set value is acceptable.

Closed-loop vector control (CLVC)

The closed-loop vector control (CLVC) mode of control of an induction motor is a method that uses feedback information from sensors to precisely control the speed and position of the motor rotor.

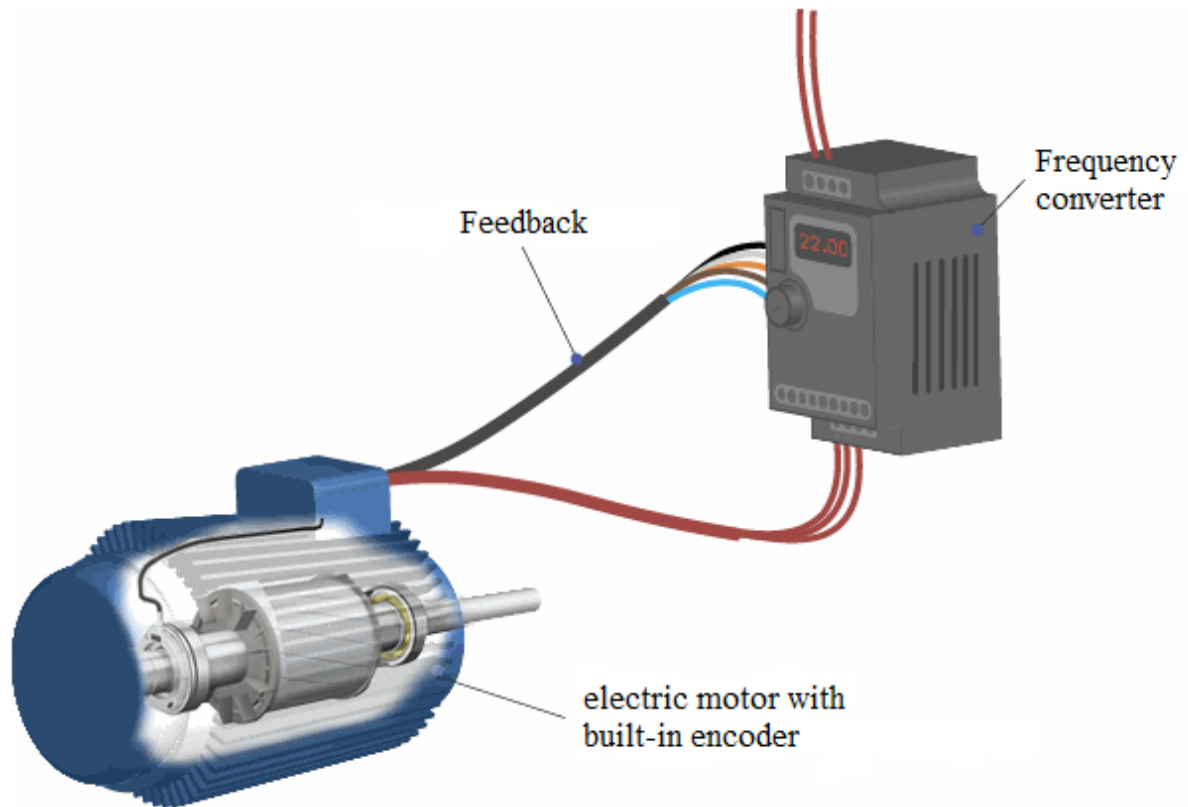


Fig. 1.8 – Schematic diagram of connecting an electric motor with a built-in encoder to a frequency converter

CLVC provides more accurate speed and torque control than SFVC, since it uses feedback sensors, encoders that measure the speed and position of the rotor. This allows the controller to control the motor speed with high accuracy, providing soft start and stop, as well as precise control of the rotor position, which can be important for some mechanisms. This type of frequency converters is used on drawing machines, printing equipment, machines with increased accuracy for maintaining speed and torque. The CLVC algorithm provides stability in maintaining the speed within $\pm 0.02\%$ of the set value.

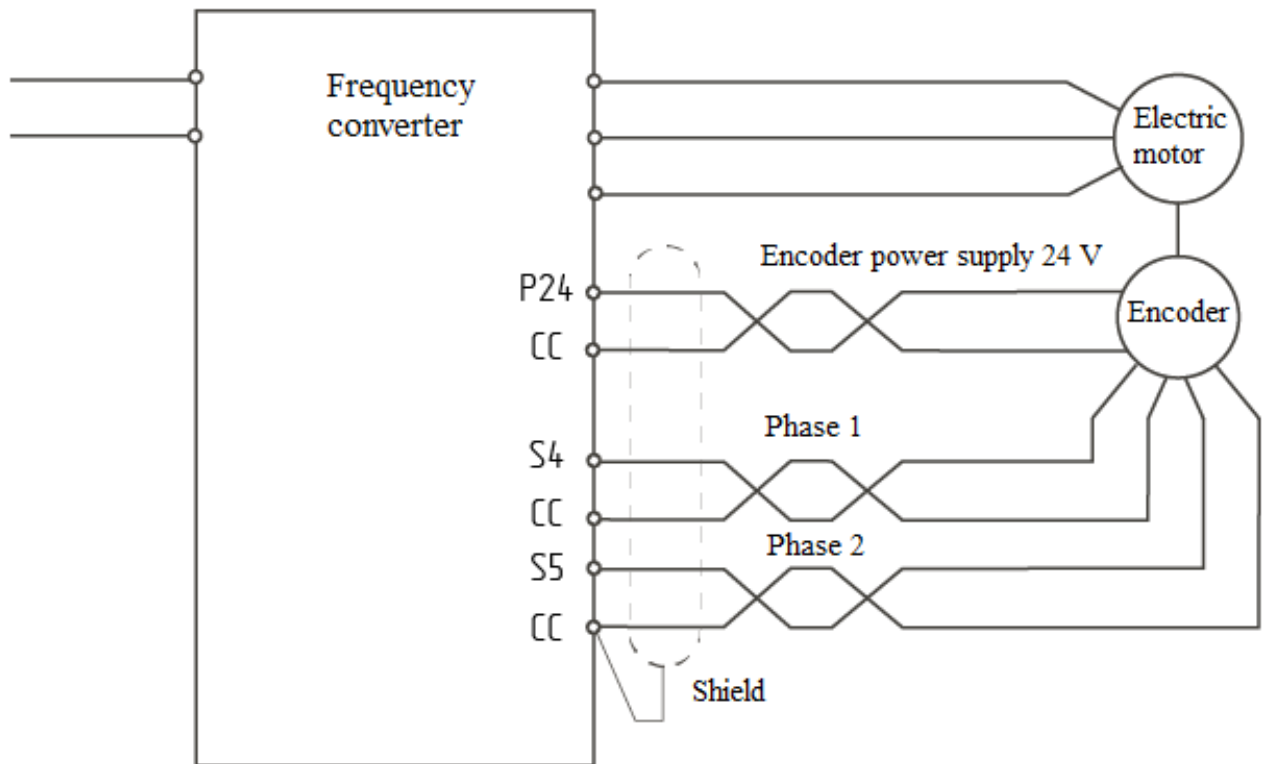


Fig. 1.9 – Block diagram of connecting an electric motor with a built-in encoder to a frequency converter.

Direct Torque Control (DTC) Converters

Direct Torque Control (DTC) converters are the most advanced type of frequency converters. They use a predictive algorithm to calculate the required voltage and frequency for the motor based on the desired torque and speed.

DTC converters provide the most accurate control of the motor speed and torque, which makes them well suited for equipment that requires high-precision control - for example, printing presses, extruders, crane and textile equipment. However, they are also the most complex and expensive type of converter. The accuracy of this system is more affected by the quality of the electric motor.

Advantages of frequency converters:

- Energy efficiency
- Speed regulation
- Long service life
- Reliability
- High level of automation

- It becomes possible to use more powerful consumers in electrical networks with limited power

The disadvantages of frequency converters include:

- Circuit complexity
- High cost

1.4. Conclusions by section

Based on the analysis of compressor electric drive control systems, several important conclusions can be drawn.

1. The use of contactors in switching consumers characterized by a high frequency of on-off, a large moment of inertia of the drive mechanism, and a significant starting torque is impractical due to: the inability to regulate power; the speed of rotation of the electric motor; the need for frequent technical inspection and repair to continue their normal operation; sensitivity to voltage drops in the power supply network, as a result - the loss of contactors and failures in the control circuits.

2. The use of thyristor starters has a number of advantages compared to contact switching devices, such as: smooth adjustment of the power supplied to the electrical receiver; implementation of smooth shockless starting and braking of motors; high electrical wear resistance (15×10^6 cycles); high reliability and durability, ease of operation; short shutdown time (0.02 s); limitation of the current supplied to the motor; phase switching; the absence of an arc during switching allows their use in explosive environments. But they have one very significant drawback - a narrow range of speed regulation, which is not enough for the use of asynchronous motors as drives in many mechanisms where it is necessary to regulate the technological parameter within wide limits.

3. In modern realities, to ensure full control over the speed of rotation of an asynchronous motor with a squirrel-cage rotor, it is advisable to use a frequency converter. It has all the advantages of an electric motor control device: energy efficiency; speed regulation; long service life; reliability; high level of automation and has only one drawback - high cost.

Додаток Б

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ПОЛТАВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА ІМЕНІ ЮРІЯ КОНДРАТЮКА»

ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ

за матеріалами X Всеукраїнської науково-практичної конференції

«ЕЛЕКТРОННІ ТА МЕХАТРОННІ СИСТЕМИ:
ТЕОРІЯ, ІННОВАЦІЇ, ПРАКТИКА»

20 грудня 2024 року



Полтава 2024

УДК 004.89 + 681.51

Збірник наукових праць за матеріалами X Всеукраїнської науково-практичної конференції «Електронні та мехатронні системи: теорія, інновації, практика», 20 грудня, 2024 р. / Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка».

Редколегія: О.В. Шефер (головний редактор) та ін. – Полтава: НУ «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», 2024. – 121 с.

У збірнику представлені результати наукових досліджень та розробок в області сучасних електромеханічних систем та автоматизації, електричних машини і апаратів, моделювання та методів оптимізації, енергозбереження в електромеханічних системах, управління складними технічними системами, проблем аварійності та діагностики в електромеханічних системах та електричних машинах, інформаційно-комунікаційних технологіях та засобах управління. Призначений для наукових й інженерно-технічних працівників, аспірантів і магістрів.

Матеріали відтворено з авторських оригіналів та рекомендовано до друку IX Всеукраїнської науково-практичної конференції «Електронні та мехатронні системи: теорія, інновації, практика». Редакція не обов'язково поділяє думку автора і не відповідає за фактичні помилки, яких він припустився.

Відповідальний за випуск - д.т.н., професор О.В. Шефер.

Редакційна колегія:

О.В. Шефер – головний редактор, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри автоматичної електроніки та телекомунікацій Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»;

Н.В. Єрмілова – кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматичної електроніки та телекомунікацій Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»;

С.Г. Кислиця – кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматичної електроніки та телекомунікацій Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

Б.Р. Боряк – кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматичної електроніки та телекомунікацій Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка».

© Національний університет
«Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

| | |
|---|-----|
| О.Г. Дрючко, Н.В. Бунякіна, І.А. Штанько, М.Ю. Першін, М.В. Качан З'ЯСУВАННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ФУНКЦІОНУВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧОЇ СИСТЕМИ УСТАНОВКИ КОМПЛЕКСНОЇ ПІДГОТОВКИ ГАЗУ..... | 83 |
| Е.В. Kyslytsia, О.В. Petryaeva MANAGEMENT SKILLS OF A HEALTHCARE FACILITY MANAGER IN THE CONTEXT OF TREATING PATIENTS WITH COMBAT INJURIES..... | 85 |
| С.Г. Кислиця, А.С. Боровик НАДІЙНІСТЬ ДУБЛЬОВАНОЇ МЕРЕЖІ СИСТЕМ КОМП'ЮТЕРНОГО УПРАВЛІННЯ..... | 87 |
| А.М. Федоренко МОДЕЛЬ НАЗЕМНОЇ РОБОТОТЕХНІЧНОЇ ПЛАТФОРМИ ДЛЯ УСУНЕННЯ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ У ГАЛУЗІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКИ..... | 89 |
| С.С. Голубцов ОРГАНІЗАЦІЙНА СТРУКТУРА СИСТЕМИ КІБЕРБЕЗПЕКИ В ПС ПОЛЬОВИХ ВУЗЛІВ ЗВ'ЯЗКУ ПУ РІЗНИХ ЛАНОК УПРАВЛІННЯ ЗБРОЙНИХ СИЛ УКРАЇНИ..... | 90 |
| С.В. Волоський, М.А. Штомпель АНАЛІЗ ЗАСТОСУВАННЯ ПАСИВНИХ ОПТИЧНИХ МЕРЕЖ В УМОВАХ ТРИВАЛИХ ВІДКЛЮЧЕНЬ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ..... | 92 |
| П.В. Соловійов, Л.О. Токар ДОСЛІДЖЕННЯ АЛГОРИТМУ АДАПТИВНОЇ БАЗОВОЇ КЛАСТЕРІЗАЦІЇ У МЕРЕЖІ ЗА ТЕХНОЛОГІЄЮ VANET..... | 94 |
| О. Sokolov INTELLIGENT ROUTING IN AD HOC NETWORKS USING NEURAL NETWORKS..... | 97 |
| Л.І. Леві, М.О. Шеремет ЗАСТОСУВАННЯ ЧАСТОТНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ДЛЯ КЕРУВАННЯ ПРИВОДОМ КОМПРЕСОРИВ..... | 100 |
| С.Г. Кислиця, А.О. Ткаченко РОЗРОБЛЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ СКРУЧУВАННЯ..... | 102 |
| О.В. Шефер, О.С. Ястреба, О.С. Педченко АНАЛІЗ ЧИННИКІВ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ЗОВНІШНІХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ВИПРОМІНЮВАНЬ У ВНУТРІШНЬОМУ ПРОСТОРИ БПЛА..... | 104 |

УДК 004.42

Л.І. Леві, д.т.н., професор,

М.О. Шеремет, магістрант

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

ЗАСТОСУВАННЯ ЧАСТОТНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ДЛЯ КЕРУВАННЯ ПРИВОДОМ КОМПРЕСОРІВ

Станом на сьогоднішній день досі являється актуальним питання модернізації систем керування електроприводом. На промислових підприємствах використовується значна кількість електричних двигунів із застарілим пуско-регулювальним обладнанням, яке не дозволяє керувати електроприводом у широких межах, та потребує частого технічного обслуговування.

Тривалий час керування електроприводом компресора здійснювалось у режимі «увімкнено – вимкнено» за допомогою звичайних контакторів, датчиків тиску, електроконтактних манометрів. Але для того, щоб зменшити діапазон між P_{\min} та P_{\max} доводилось збільшувати кількість включень, а через складні умови пуску значно зменшується ресурс електропривода та механізму, який він приводить у рух.

Використання тиристорного пускача (ТП), як елементу електропривода компресора є недоцільним, так як для пуску компресора необхідний значний обертальний момент, а як відомо обертальний момент асинхронного двигуна пропорційний квадрату напруги. ТП зменшує діючу напругу, а отже і пусковий момент зменшується в квадраті, тому це обладнання не підходить для пуску компресора. Навіть при використанні їх для пуску компресора електричний двигун швидко перегріється через недостатність пускового моменту (адже плавний пуск займає кілька секунд і цей час через обмотки двигуна буде протікати струм короткого замикання) і відповідно буде спрацьовувати тепловий захист двигуна, або спрацює автоматичний вимикач. Як наслідок компресор не можна буде увімкнути доти, доки двигун не охолоне, або доки черговий персонал не увімкне автоматичний вимикач. Такі варіанти недопустимі через значний час простою обладнання та необхідність втручання оперативного персоналу для відновлення роботи двигуна.

Найсуттєвіше обмеження на застосування ТП накладають принципово обмежені функціональні можливості. при зміні напруги значення критичного ковзання не змінюється, тому максимальний момент за будь-яких змін напруги відповідає значенню ковзання $s=0,1 \dots 0,2$. Цим визначається порівняно вузький діапазон регулювання швидкості обертання валу двигуна, який може забезпечити ТП.

Тому ТП не можна застосовувати у технологічних процесах, де потрібне постійне регулювання швидкості обертання двигуна чи технологічного параметра (наприклад, тиск у трубопроводі). Для таких завдань оптимальним

рішенням є використання перетворювачів частоти, на основі яких можна модернізувати електропривод.

На час виходу частотних перетворювачів на світовий ринок їхня ціна була високою, не було широкого вибору потужності, але вони все одно швидко завоювали ринок, асортимент швидко збільшився з ростом попиту на цей клас пристроїв. Можна навіть сказати перевернули норми, які працювали десятиліттями, адже раніше асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором використовувалися лише для приводу простих агрегатів, таких як насоси, вентилятори, тобто там, де не потрібно точно регулювати технологічний параметр. А з використанням частотних перетворювачів асинхронні двигуни почали використовувати механізми, де потрібне регулювання швидкістю обертання механізму в широкому діапазоні.

Новий клас пристроїв володіє численними перевагами, такими як: енергоефективність, регулювання швидкості, тривалий термін експлуатації, надійність, високий рівень автоматизації і має лише один недолік – високу вартість.

Це дозволить набагато точніше регулювати вихідний тиск шляхом зміни продуктивності компресора. А так, як поршневі компресори характеризуються прямо пропорційною залежністю продуктивності від швидкості обертання його механізму, використання частотного перетворювача дозволяє змінювати продуктивність в широких межах без погіршення енергетичних характеристик двигуна.

Для компресора, як суб'єкту керування частотного перетворювача, не потрібно точного визначення положення його валу в просторі, а отже економічно доцільно використати скалярний вид перетворювачів частоти.

Досягнення в мікропроцесорній техніці дозволяє об'єднувати електроприводи окремих машин і механізмів в один складний комплекс, що дає можливість автоматизувати більшість технологічних операцій, зменшити вплив «людського фактору» на виробництві, покращити ефективність керування.

ЛІТЕРАТУРА:

1. *Частотне керування асинхронним приводом: Методичні вказівки з дисципліни «Основи електропривода» для студентів напряму підготовки 6.100101 – «Енергетика та електротехнічні системи в АПК» / В.С.Ловейкін, Ю.О.Ромасевич – Ніжин: 2011. – 98 с.*

2. *Основи електропривода виробничих машин і комплексів: навч. посіб. / В.Е.Воскобойник, В.А.Бородай, Р.О.Боровик, О.Ю.Нестерова – Д.: Національний ТУ «Дніпровська політехніка», 2021. – 254 с.*

APPLICATION OF FREQUENCY CONVERTERS TO CONTROL THE DRIVE OF COMPRESSORS

L. Lievi, Sc. D, Professor,

M. Sheremet, Master's Student

National University "Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic"

АЛФАВІТНИЙ ВКАЗІВНИК

| Автор | Сторінки | Автор | Сторінки |
|-------------------|--|--------------------|-------------------------|
| Белей Р.А. | 68 | Марченко О.С. | 43 |
| Бікчентаєв М.О. | 8 | Марчук А.В. | 41, 74 |
| Боровик А.С. | 87 | Мельник Є.О. | 78 |
| Боряк Б.Р. | 8 | Мешко О.А. | 116 |
| Брижак К.К. | 14 | Мигаль С.В. | 49 |
| Бунякіна Н.В. | 83 | Митрофанов П.Б. | 30 |
| Вишнеський І.О. | 109 | Михайленко В.О. | 63 |
| Вітченко Є.В. | 79 | Обілець М.В. | 39 |
| Войченко А.С. | 14 | Остепенко А.І. | 66 |
| Волоський С.В. | 92 | Панич В.В. | 37 |
| Галай В.М. | 43, 72 | Пантелєєв В.О. | 35 |
| Голубцов С.С. | 90 | Пащенко А.В. | 81 |
| Гребенюк Б.С. | 68 | Педченко О.С. | 104 |
| Губицький М.М. | 64 | Першін М.Ю. | 83 |
| Демус С.І. | 54 | Петряєва О.Б. | 85 |
| Дзюбан О.С. | 16, 76 | Плешкань Д.П. | 72 |
| Дрючко О.Г. | 24, 51, 68, 83 | Плюйко І.П. | 56 |
| Дюдюк І.М. | 47 | Погрібняченко Д.А. | 68 |
| Євдоченко О.І. | 106 | Польцер С.В. | 14 |
| Єндіяров І.О. | 112 | Пушкарь В.В. | 118 |
| Єрмілова Н.В. | 22, 33, 112, 116 | Романенко В.І. | 45 |
| Заніздра Є.М. | 107 | Руденко В.В. | 11 |
| Захарченко Р.В. | 30, 39 | Сілін І. | 62 |
| Зоць Я.О. | 56 | Слепченко Н.М. | 58 |
| Іванов О.А. | 22 | Соколов О. | 97 |
| Індик С.В. | 37, 63 | Соловійов П.В. | 94 |
| Капітон А.М. | 16, 76 | Сухоребрій О.В. | 51 |
| Качан М.В. | 83 | Талибов Р.М. | 16, 76 |
| Качуровський Б.В. | 28 | Тітов В.О. | 33 |
| Кислиця Д.В. | 19 | Ткаченко А.О. | 102 |
| Кислиця Є.В. | 85 | Токар Л.О. | 94 |
| Кислиця С.Г. | 14, 19, 54, 58, 66, 79, 87, 102, 109, 114 | Удовик С.С. | 24, 60 |
| Ковган Р.М. | 114 | Федоренко А.С. | 89 |
| Кожушко Г.М. | 19 | Фещенко Д.О. | 68 |
| Криворот А.І. | 30 | Фомін О.С. | 18, 21, 47 |
| Куденко О.О. | 51 | Шеремет М.О. | 100 |
| Леві Л.І. | 28, 100 | Шефер О.В. | 24, 45, 49, 56, 81, 104 |
| Лисечко В. | 62 | Штанько І.А. | 83 |
| Малород В.О. | 30 | Штомпель М.А. | 92 |
| | | Ястреба О.С. | 104 |

Наукове видання

Збірник наукових праць за матеріалами X Всеукраїнської науково-практичної
конференції
«ЕЛЕКТРОННІ ТА МЕХАТРОННІ СИСТЕМИ: ТЕОРІЯ, ІННОВАЦІЇ,
ПРАКТИКА»

Дизайн і комп'ютерна верстка
Відповідальний за випуск

Боряк Б.Р.
Шефер О.В.

Оригінал-макет виготовлено на кафедрі автоматичної, електроніки та
телекомунікацій
Національного університету
«Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

Додаток В

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондрачука»

Навчально-науковий інститут інформаційних технологій і робототехніки

Кафедра автоматики, електроніки та телекомунікацій

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА

**На тему: Модернізація систем керування електроприводом компресорних установок
середньої потужності в системах газопостачання**

Виконав: студент групи 601-МЕ Шеремет М.О.

Керівник кваліфікаційної роботи: Леві Л.І.

Полтава 2025

Модернізація систем керування електроприводом компресорних установок середньої потужності в системах газопостачання

Метою роботи є дослідження та модернізація системи керування електроприводом компресора ЗВШ1.6-3,1/46 для підвищення енергоефективності та збільшення терміну експлуатації електродвигуна та компресорної установки.

Основними завданнями дослідження є:

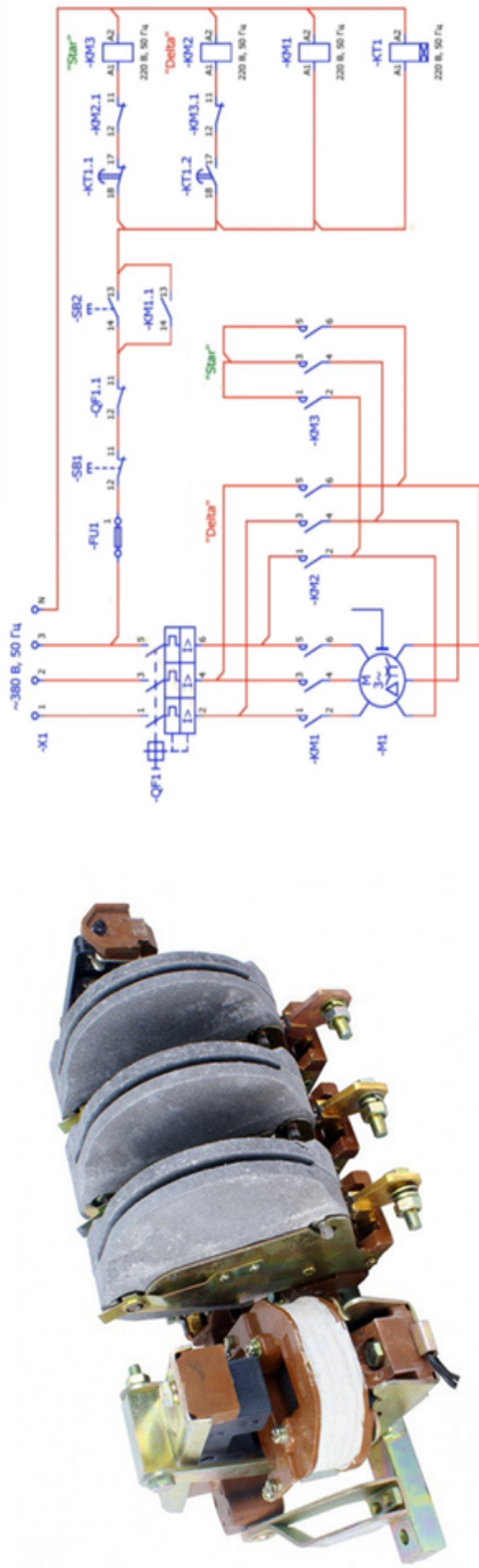
- Аналіз систем керування електроприводом компресора;
- Модернізація системи керування електроприводом компресора;
- Синтез автоматизованої системи електропривода компресора;
- Вибір частотного перетворювача.

Практична значимість роботи полягає в тому, що на основі проведених досліджень вибраний ефективний спосіб керування асинхронним двигуном.

Контактні комутаційні апарати

Тривалий час керування електричними двигунами різної потужності здійснювалося лише в режимі «увімкнено – вимкнено», де базовим елементом цієї схеми керування був контактор.

Для полегшення пуску асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором використовують 2, 3, 4-швидкісні двигуни, або застосовують пуск за зниженої напруги, наприклад з використанням схеми «зірка-трикутник».



Загальновідомо, що прямий пуск електродвигуна супроводжується споживанням з мережі струму, що в 6-8 разів перевищує значення номінального струму. Тривалість протікання надструмів прямо пропорційна моменту інерції механізму, що приводиться в рух, і навантаженню на валу двигуна. Імпульсні "переструми", що виникають при прямому пуску двигуна, створюють ударний електромагнітний момент, що передається через вал двигуна на механізм і викликає вібрації двигуна і механізму. Наслідком таких ударних навантажень є поломки валів, сполучних муфт, редукторів тощо.

Безконтактні комутаційні апарати

Тиристорний пускач – це електронний регулятор напруги, основним елементом якого є тиристор. Основне призначення пристрою – плавного пуску – плавний розгін асинхронного двигуна до номінальної швидкості шляхом поступінчастого керування підвищення напруги на статорі двигуна.

Частотні перетворювачі – це електронні пристрої, що використовуються для зміни швидкості та обертового моменту асинхронних та синхронних електродвигунів за допомогою подання змінених частоти та напруги живлення на двигун. Вони використовуються в системах автоматичного керування насосами, вентиляторами, компресорами, конвеєрами та ін.

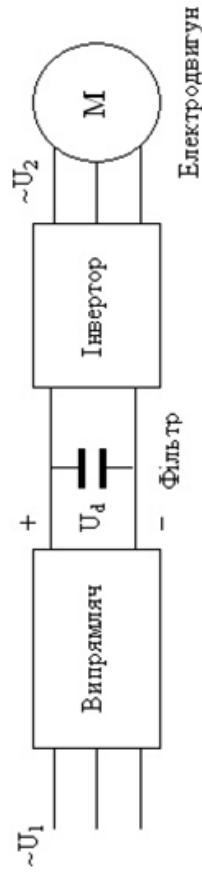
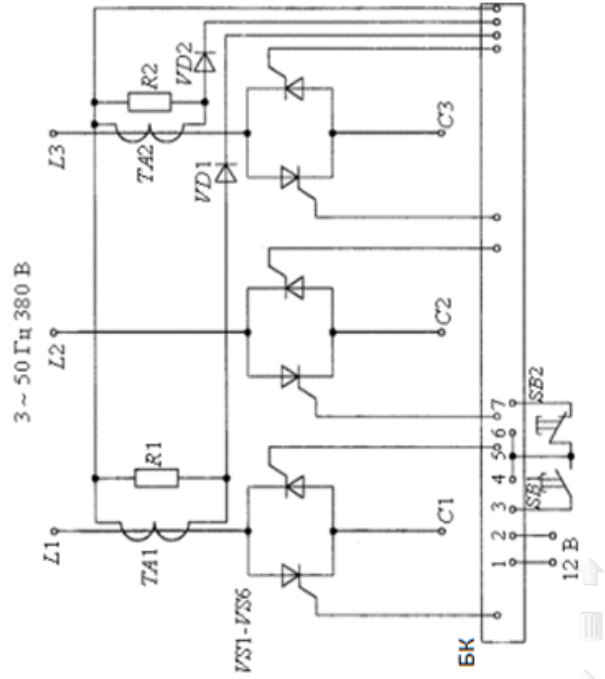
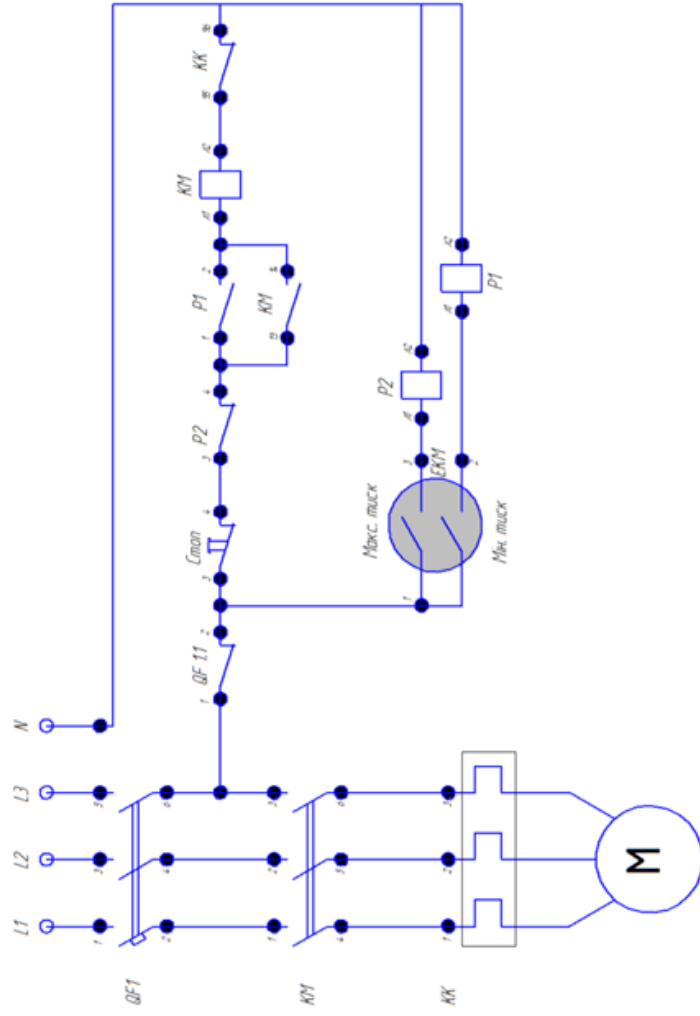
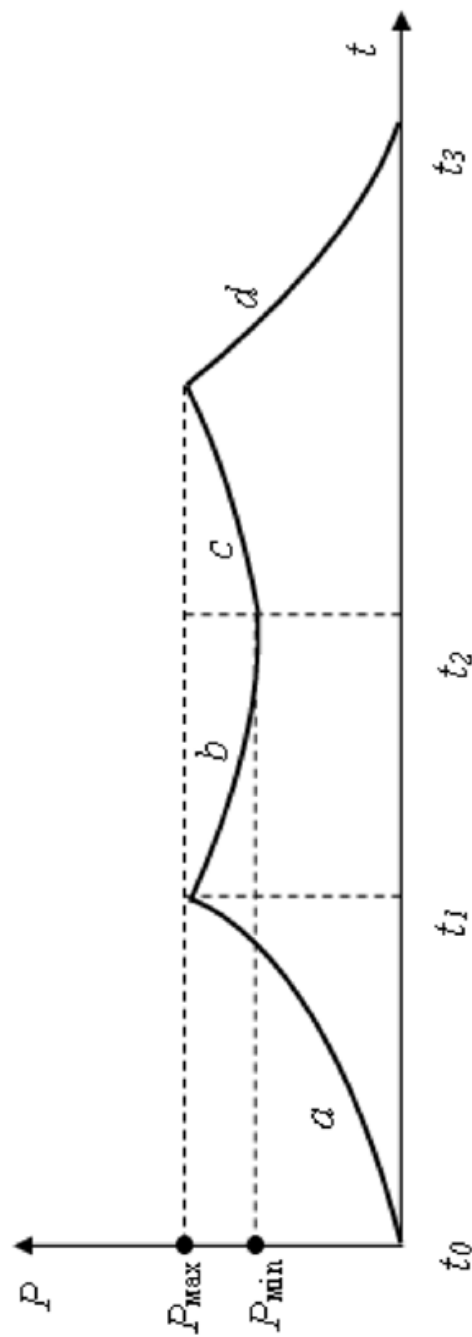


Схема керування електричним двигуном з використанням електроконтактного манометра

Тривалий час керування електроприводом компресора здійснювалося у режимі «увімкнено – вимкнено» за допомогою звичайних контакторів, датчиків тиску, електроконтактних манометрів, а для підтримки заданого режиму продуктивності застосовують зміну числа компресорів, що працюють паралельно, або метод регулювання продуктивності за часом. Один з варіантів схеми керування ЕП:



Графік залежності тиску у системі від часу

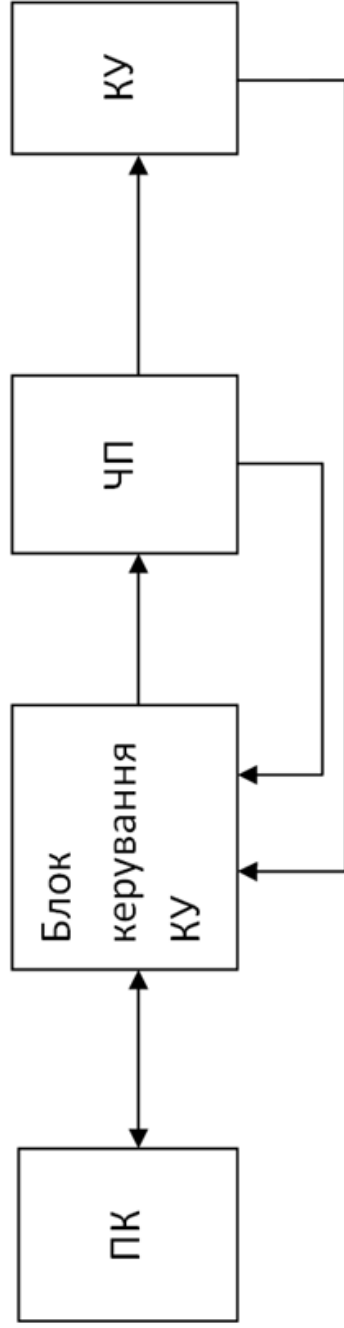


Результатом використання наведеної раніше схеми керування компресором є такий графік залежності тиску у системі від часу.

При умові широкого допустимого діапазону P_{\min} та P_{\max} описану вище схему керування доцільно використовувати, але для підтримки стабільного тиску у системі на одному рівні – завдання технологічного процесу, при умові невеликої різниці P_{\min} та P_{\max} необхідно використати слідкуючий режим за вихідним параметром – тиском.

Досягти цього можна встановивши частотний перетворювач між джерелом живлення та електричним двигуном.

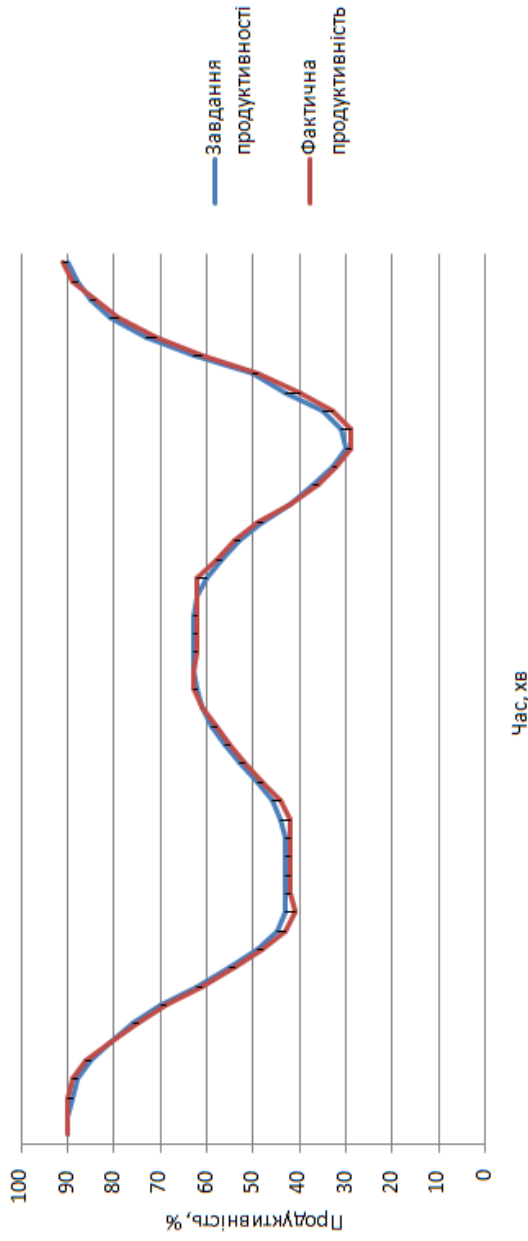
Блок-схема системи керування КУ



На даний час керування компресорною установкою (КУ) відбувається через один інтерфейс, на базі персонального комп'ютера (ПК). Блок керування компресорною установкою збирає дані від усіх датчиків, встановлених на КУ та частотному перетворювачі (ЧП), виводить їх на монітор. В спеціалізованій програмі налаштовуються усі необхідні параметри, алгоритми роботи КУ. Програмне забезпечення виконує контроль за роботою КУ, в тому числі за частотним перетворювачем, який живить електричний двигун.

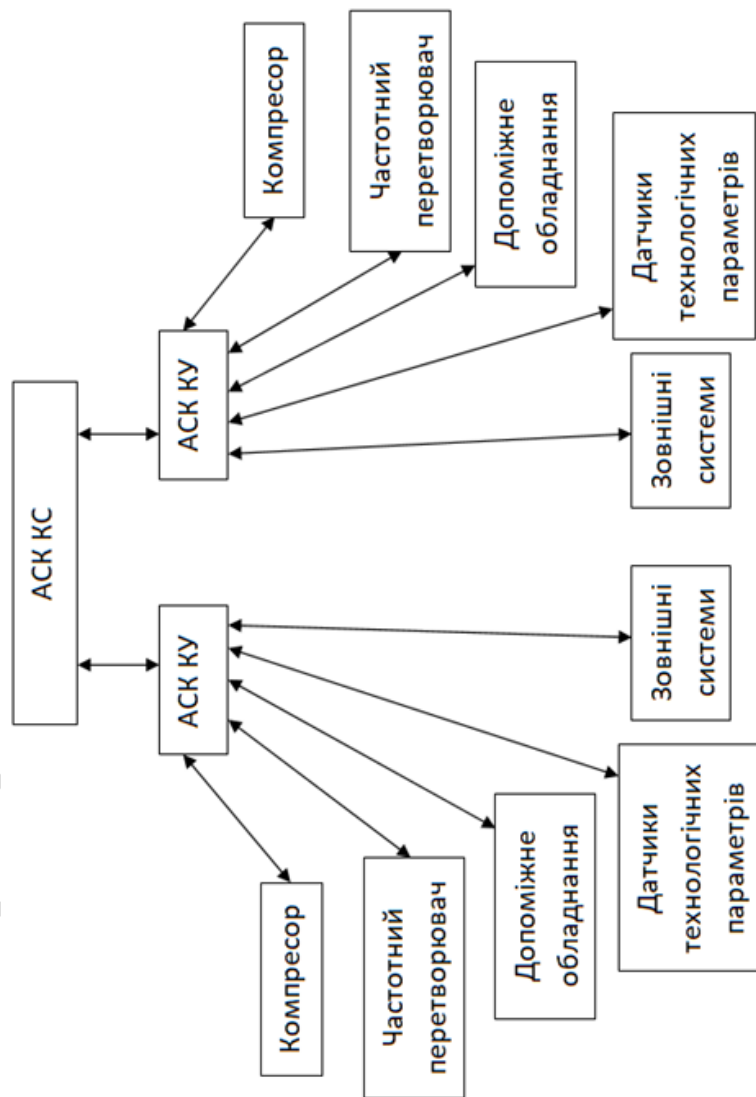
Графік залежності продуктивності компресорної установки від завдання керування

Регулювання тиску здійснюється шляхом регулювання продуктивності компресора. Регулювання продуктивності компресора відбувається за рахунок контролю швидкості обертання механізму компресора. Контроль швидкості обертання механізму компресора відбувається через контроль швидкості обертання приводного двигуна – асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором.



Модернізована система керування – слідкуюча за вихідним параметром (тиском) - змінює продуктивність, залежно від тиску у системі. Із збільшенням відхилення від заданого тиску – збільшується рівень впливу на електропривод.

Блок-схема автоматичної системи керування компресорною станцією (АСК КС)

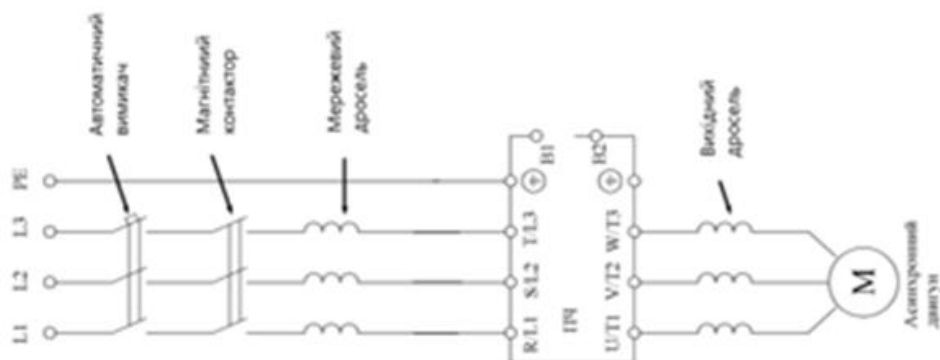


Автоматизація компресорної станції передбачає здійснення контролю і керування роботою станції як складного технологічного об'єкта. Використання автоматизованих систем контролю й управління є необхідною умовою оптимізації технологічних процесів з метою зниження споживання електроенергії та забезпечення необхідної якості регулювання. Досягти цього можна шляхом об'єднання систем керування всіх агрегатів в

Основні елементи КУ та схема підключення

10

Для керування електричним двигуном АІР250S6 компресора ЗВШ 1,6-3,1/46 було обрано перетворювач частоти E.NEXT e.f-drive.pro.75.



Загальні висновки

У кваліфікаційній роботі магістра розглянуто питання модернізації системи керування електроприводом компресорної установки середньої потужності в системах газопостачання.

Проведено аналіз систем керування електроприводом компресора, розглянуто проблему пуску асинхронних двигунів, використання контактних та безконтактних комутаційних апаратів електроприводу компресора.

Розглянуто основні шляхи модернізації системи керування електроприводом компресора, а саме: перелік загальних вимог до електроприводу компресорів, процесу керування компресорною установкою. Описаний аналіз негативних факторів, що впливають на роботу компресорної установки, існуючий алгоритм керування електроприводом компресора. Запропоновано шлях модернізації алгоритму керування електроприводом компресора.

Описано синтез автоматизованої системи електропривода компресора, доцільність застосування частотного регулювання електродвигунів, скалярне та векторне регулювання асинхронним двигуном, систему керування електроприводом компресора та автоматизацію компресорних станцій.

Розглянуто вихідні дані для вибору частотного перетворювача, умови його вибору, функціональні можливості сучасних частотних перетворювачів та додаткові пристрої для них, здійснено вибір моделі частотного перетворювача для компресора.

Дякую за увагу!

