

Вінницький національний технічний університет

(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет електроенергетики та електромеханіки

(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів

(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

## МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

«Система керування частотним перетворювачем для асинхронних  
електродвигунів зі зворотнім зв'язком»

Виконав: студент 2-го курсу, гр. ЕПА-22м  
спеціальності 141 – Електроенергетика,  
електротехніка та електромеханіка

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Грубий Іван Іван ГРУБИЙ  
(прізвище та ініціали)

Керівник: д.т.н., проф. кафедри КЕМСК

Проценко Дмитро Дмитро ПРОЦЕНКО  
(прізвище та ініціали)

«21» 11 2023 р.

Опонент: Ф.М.Н., доц. каф. ЕСЕМ

Шульце Ю.А. Шульце Ю.А.  
(прізвище та ініціали)

«11» 12 2023 р.

Допущено до захисту

Зав. кафедри Грубий Іван  
«28» 11 2023 р.

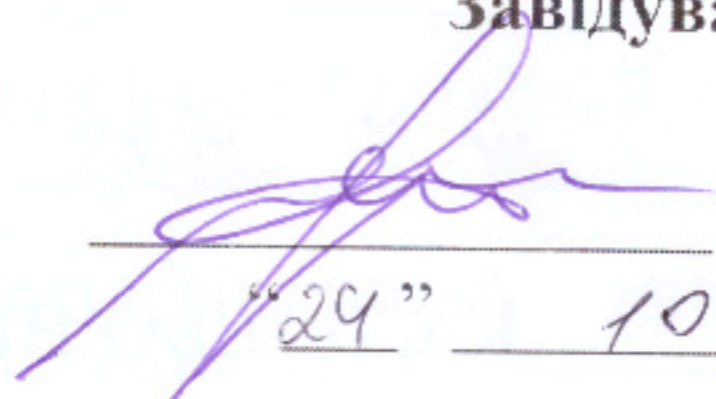
Вінницький національний технічний університет  
Факультет Електроенергетики та електромеханіки  
Кафедра Комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів  
Освітньо-кваліфікаційний рівень магістр  
Спеціальність 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка  
Освітня програма Електромеханічні системи автоматизації та електропривод

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

**Завідувач кафедри**

к.т.н., доц.

Микола МОШНОРИЗ



"29" 10 2023 року

**ЗАВДАННЯ  
НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Грубому Івану Петровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. **Тема роботи:** система керування частотним перетворювачем для асинхронних електродвигунів зі зворотнім зв'язком

керівник роботи Проценко Дмитро Петрович, к.т.н., доцент каф. КЕМСК

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від "18" 09 2023 року №247

2. **Строк подання студентом роботи** 28.11.2023 р.

3. **Вихідні дані до роботи** Встановлена потужність системи – 2,2 кВт, напруга живлення системи – 220 В, алгоритм керування – векторний, вимоги до органів керування системою – можливість аварійної зупинки, керування зовнішньої напругою 0...10В.

4. **Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно зробити)** 1. Огляд систем керування асинхронними електродвигунами;

2. Розрахунок режимів роботи електроприводу зі зворотнім зв'язком; 3. Розробка математичної моделі та вибір апаратного забезпечення; 4. Розробка апаратного забезпечення та тестування системи; 5. Економічна частина; 6. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях.

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

1. Алгоритм роботи системи керування.

2. Блок-схема системи керування.

3. Повна принципова електрична схема системи.

4. Графіки роботи двигуна з середовища Matlab Simulink.

### 6. Консультанти розділів роботи

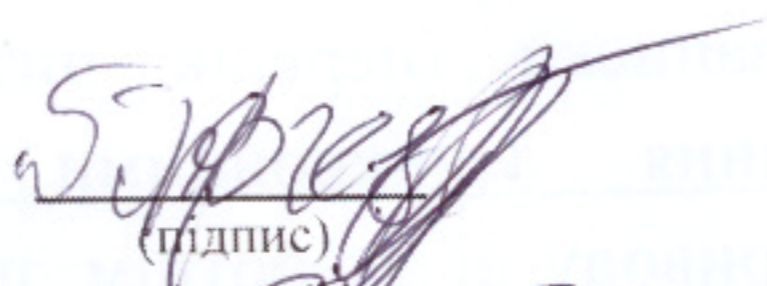
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Спеціальна частина	Проценко Д.П., к.т.н., доц. каф. КЕМСК	24.10.2023	21.11.2023
Економічна частина	Шулле Ю. А. к. т. н., доц. каф. ЕСЕЕМ	24.10.2023	21.11.2023
Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	Кобилянський О.В., д.пед.н., проф., зав. каф. БЖДПБ	24.10.2023	28.11.2023

7. Дата видачі завдання 24.10.2023

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Формування та затвердження теми магістерської кваліфікаційної роботи (МКР)	03.10.2023	Пром. КЕМСК ДС
2	Виконання спеціальної частини МКР. Перший рубіжний контроль виконання МКР	21.11.2023	
3	Виконання спеціальної частини МКР. Другий рубіжний контроль виконання МКР	28.11.2023	
4	Виконання розділу «Економічна частина»	21.11.2023	
5	Виконання розділу «Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях»	28.11.2023	
6	Попередній захист МКР	28.11.2023	
7	Нормоконтроль МКР	28.11.2023	
8	Рецензування МКР	11.12.2023	
9	Захист МКР	12.12.2023	

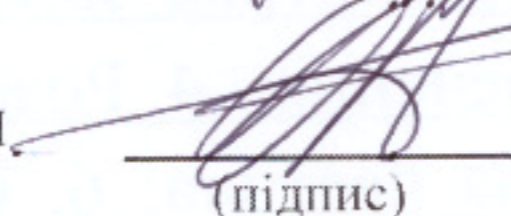
Студент

  
(підпис)

Іван ГРУБІЙ

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

  
(підпис)

Дмитро ПРОЦЕНКО

(прізвище та ініціали)

## АНОТАЦІЯ

УДК: 62-551.4

Грубий І. П. Система керування частотним перетворювачем для асинхронних електродвигунів зі зворотнім зв'язком. Магістерська кваліфікаційна робота зі спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, освітня програма - електрична інженерія.

На укр. мові. Бібліогр.: 22 назви; рис.: 39; табл. 7.

В даній магістерській кваліфікаційній дипломній роботі було запропоновано рішення для підвищення ефективності та надійності роботи електроприводів на базі асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором, що містять у своєму складі контур зворотнього зв'язку. Проведено аналіз систем керування даним типом двигунів та виконано огляд аналогів. У основній частині роботи розроблено оптимальний алгоритм керування електродвигунів різних потужностей з підтримкою зворотнього зв'язку та зовнішнім регулюванням (інтерфейс: 0...10В). Розроблено схему та виконано апаратну реалізацію. Система унеможлиблює вихід з ладу двигуна при перевантаженні або несправності кіл зворотнього зв'язку.

Графічна частина складається з 17 плакатів з результатами роботи.

Ключові слова: електропривод, асинхронний двигун, система керування, зворотній зв'язок, режими роботи, моделювання, механічні характеристики, математична модель.

## **ABSTRACT**

Ivan P. Grubiyi. Controlling system of variable frequency drive of induction motors with feedback loop. Master qualification thesis in the speciality 141 – Electric power industry, electrotechnics and electromechanics, education program – Electric engineering.

In Ukrainian. bibliography.: 22 nomenclatures; 39 drawings; 7 tables.

The master qualification thesis deals with improving efficiency and reliability of electrical drives based on induction motors with short-circuited rotor with feedback loop. There was done the analysis of controlling systems for such type of motors. Main part of this work describes the design and development process of hardware described above. Special attention is paid to controlling algorithm, schematic and printed circuit board design. The method proposed in this thesis makes impossible motor overload and critical faults in case of mechanical overload or feedback open loop.

Graphical part consists of 17 drawings with final results.

Key words: electric drive, variable frequency drive, induction motor, controlling system, feedback loop, operation mode, simulation, mechanical characteristics, mathematical model.

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	5
<b>1 СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ АСИНХРОННИМИ ЕЛЕКТРОДВИГУНАМИ</b>	<b>8</b>
1.1 Системи керування АД на базі магнітних підсилювачів .....	8
1.2 Тиристорні перетворювачі частоти на базі дискретної логіки .....	11
1.3 Перетворювачі частоти на базі потужних БТІЗ з керуванням від дискретної логіки .....	14
1.4 Перетворювачі частоти на сучасних силових модулях з мікропроцесорним управлінням .....	18
1.5 Висновки .....	21
<b>2 РЕЖИМИ РОБОТИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ЗІ ЗВОРОТНІМ ЗВ'ЯЗКОМ</b>	<b>22</b>
2.1 Висновки .....	24
<b>3 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ТА ВИБІР АПАРАТНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ</b>	<b>25</b>
3.1 Параметри двигуна, та вибір математичної моделі двигуна .....	25
3.2 Розрахунок параметрів двигуна.....	29
3.3 Розрахунок параметрів опорів та індукцій двигуна .....	30
3.4 Результати моделювання асинхронного двигуна .....	32
3.5 Додавання перетворювача частоти в модель.....	34
3.6 Вибір та огляд алгоритму керування.....	36
3.7 Вибір апаратного забезпечення .....	39
3.8 Висновки .....	41
<b>4 РОЗРОБКА АПАРАТНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА ТЕСТУВАННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЗІ ЗВОРОТНІМ ЗВ'ЯЗКОМ</b>	<b>42</b>
4.1 Розробка принципової електричної схеми.....	42
4.2 Розробка та трасування друкованої плати .....	53
4.3 Тестування системи керування частотним перетворювачем для асинхронних електродвигунів зі зворотнім зв'язком .....	57
4.4 Висновки .....	60
<b>5 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИЙ ОБРАХУНОК</b> .....	<b>61</b>
5.1 Висновок .....	67
<b>6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ</b> .....	<b>68</b>
6.1 Технічні рішення з безпечної експлуатації об'єкта .....	68

6.2 Технічні рішення з гігієни праці і виробничої санітарії .....	72
<b>ВИСНОВКИ .....</b>	<b>79</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....</b>	<b>80</b>
Додаток А. Технічне завдання.....	83
Додаток Б. Ілюстративна частина.....	87

## ВСТУП

**Актуальність теми розробки.** Технології постійно розвиваються, і людство невпинно винаходить нові технології у всіх галузях своєї діяльності. Перші електродвигуни з'явилися на початку XIX століття. Автором розробки асинхронного двигуна є Нікола Тесла, який у Будапешті навесні 1882 р. вирішив питання створення обертового магнітного поля за допомогою нерухомої багатофазної обвитки змінного струму, а 1884 року у Страсбургу представив робочу модель власного двигуна.

З часом постало цілком раціональне питання як змінювати частоту обертання даних електродвигунів. Через брак технологій перші рішення з регулюванням обертів мали низький коефіцієнт корисної дії та невеликий діапазон регулювання обертів.

Перші «зовнішні» пристрої для регулювання обертів асинхронних двигунів з'явилися у кінці 1940-х років на базі магнітних підсилювачів. Перші системи керування для даних двигунів на базі напівпровідників винайшли на початку 1960-х.

З розвитком мікропроцесорної та обчислювальної техніки можливості керування асинхронними і синхронними двигунами почали значно збільшуватись. Сьогодні завдяки мікропроцесорним системам керування, синхронні й асинхронні машини залишаються найпоширенішими в усіх видах техніки, від дронів і пілососів до величезних верстатів з двигунами потужністю в сотні кіловат.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Робота виконувалася відповідно до наукового напрямку кафедри комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів ВНТУ.

### **Мета і завдання розробки.**

Метою роботи є покращення характеристик (жорсткість, діапазон регулювання, швидкість реакції на задані значення) асинхронного електропривода, за рахунок використання оптимізованого алгоритму керування перетворювачем частоти.



До **задач** магістерської кваліфікаційної роботи можна віднести:

- аналіз існуючих систем керування асинхронними електродвигунами;
- розрахунок режимів роботи системи електроприводу зі зворотнім зв'язком;
- розробка математичної моделі системи;
- розробка та огляд алгоритму роботи системи;
- вибір апаратного забезпечення;
- розробка принципної електричної схеми;
- розробка та трасування друкованої плати пристрою;
- тестування отриманої системи.

**Об'єктом розробки** є система керування асинхронним електродвигуном на базі частотного перетворювача зі зворотнім зв'язком, у котрій використовується оптимізований алгоритм керування.

**Предметом розробки** є апаратне і програмне забезпечення (частотний перетворювач), котрий використовує для керування оптимізований алгоритм на базі прямого та зворотнього перетворень Кларка-Парка.

#### **Наукова новизна одержаних результатів**

Отримав подальший розвиток метод синтезу системи керування асинхронним електродвигуном на базі частотного перетворювача зі зворотнім зв'язком, у котрій використовується оптимізований алгоритм керування на базі прямого та зворотнього перетворень Кларка-Парка.

**Практичне значення одержаних в роботі результатів полягає в наступному:**

- оптимізація алгоритму керування асинхронним електродвигуном, що дозволяє використовувати дану систему керування для вирішення багатьох задач;
- розробка надійного апаратного забезпечення для вище названої системи.

**Особистий внесок здобувача.** Основні результати магістерської кваліфікаційної роботи отримано автором особисто.

**Апробація результатів роботи.** Основні положення і результати розробки доповідались та обговорювались на науково-технічній конференції «Молодь в науці: дослідження проблеми перспективи» (МН-2023).

**Публікації.** За тематикою розробки опубліковано 1 тезу доповідей матеріалів конференцій:

- Алгоритм керування асинхронними машинами на базі перетворень Кларка-Парка/ Д. П. Проценко, І. П. Грубий – Матеріали конференції «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2024)», Вінниця, 2024 – 3с.

## **1 СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ АСИНХРОННИМИ ЕЛЕКТРОДВИГУНАМИ**

Системи керування асинхронними електродвигунами пройшли складний шлях еволюції за понад 100 років. Від баластних резисторів та магнітних підсилювачів до надсучасних мікропроцесорних систем керування на базі силової частити з карбід-кремнієвих компонентів. В даному розділі виконується огляд систем керування асинхронними двигунами, котрі дійсно були передовими рішеннями на своїх відрізках часу.

### **1.1 Системи керування АД на базі магнітних підсилювачів**

Магнітний підсилювач — це електромагнітний пристрій, що складається з одного або більше магнітопроводів з обмотками, де струм або напруга можуть змінюватися в електричному ланцюзі, що живиться від джерела змінної напруги або струму, і його дія заснована на використанні явища насичення феромагнетика при намагнічуванні постійним магнітним полем.

Принцип роботи магнітного підсилювача заснований на зміні індуктивності котушки з феромагнітним сердечником при намагнічуванні постійним струмом (або низькочастотним сигналом) в таких пристроях для регулювання великого струму може використовуватися відносно слабкий електричний сигнал. Керуючим елементом магнітного підсилювача є осердя, на яке впливають два змінних магнітних поля. Одне змінюється в залежності від частоти джерела живлення, а інше - від частоти сигналу, що підсилюється. Якщо на керуючу обмотку не подається струм, робоча обмотка має невелику кількість витків, тому осердя (магнітопровід) не буде насичуватися, і реактивний опір робочої обмотки впаде майже у всіх напругах. Якщо подати струм на керуючу обмотку, відбувається насичення муздратрау, навіть при невеликих значеннях. В результаті реактивний опір робочої обмотки різко зменшується, а величина струму в ланцюзі збільшується. [1]

Магнітний Підсилювач перемикає струмовий ланцюг, змінюючи його індуктивний електричний опір в широкому діапазоні, але його величина залежить від насиченості магнітного поля.

Магнітні підсилювачі знайшли широке застосування в електроприводах різних верстатів через їх надійність і великий термін служби (вони вважаються одними з найнадійніших елементів систем автоматики), відсутність рухливих частин, можливості виконання магнітних підсилювачів потужністю від декількох ват до сотень кіловат, великої міцності та стійкості по відношенню до вібрацій та ударного навантаження. Крім цього завдяки магнітним підсилювачам можна легко здійснити сумування сигналів. Вони мають великий коефіцієнт підсилення. У магнітних підсилювачах відсутній електричний зв'язок між вхідними та вихідними ланцюгами.

Струм навантаження регулюють зміною струму в обмотці підмагнічування магнітного підсилювача. Обмотка зміщення служить для створення початкового підмагнічування, необхідного щоб струм у навантаженні змінювався по-різному залежно від полярності сигналу управління, а також вибору точки на прямолінійному ділянці характеристики. Обмотка зворотного зв'язку призначена для отримання необхідної форми вихідних характеристик.

Конструктивно магнітний підсилювач є сердечником з листового феромагнітного матеріалу, на який намотані обмотки змінного і постійного струму, що показано на ризунку 1.1. Для усунення наведень ЄРС змінного струму у кола обмоток постійного струму обмотки змінного струму намотані окремо на різних сердечниках, а обмотки постійного струму охоплюють обидва сердечники.

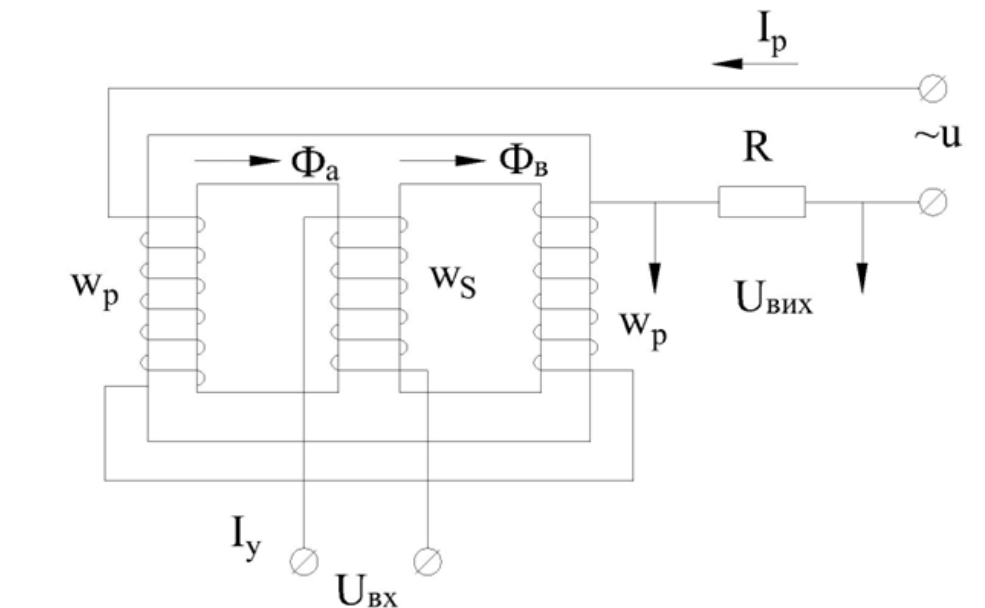


Рисунок 1.1 – Схема найпростішого магнітного підсилювача

Магнітний підсилювач може мати кілька обмоток керування. При такому розкладі в робочому режимі струм навантаження визначатиметься сумарним струмом керування. Це надає змогу використати у якості суматора електричних не пов'язаних між собою сигналів (сумуються постійні сигнали).

Магнітні підсилювачі можуть бути нереверсивними, так і реверсивними. У нереверсивних магнітних підсилювачах зміна полярності сигналу управління не викликає зміни фази та полярності струму навантаження. [2, 10]

Сердечники магнітних підсилювачів виготовляють як із трансформаторної сталі, так і з пермалою, причому трансформаторну сталь застосовують при потужності магнітного підсилювача, більшої за 1 Вт. Величина магнітної індукції в осерді з трансформаторної сталі досягає 0,8 - 1,0 Т. Коефіцієнт посилення таких магнітних підсилювачів становить від 10 до 1000.

Пермалой застосовують у магнітних підсилювачах, потужність яких менше 1 В. Прямокутний характер петлі гістерезису для пермалою дозволяє отримати коефіцієнт посилення від 1000 до 10 000 і вище.

Осердя магнітного підсилювача шихтують з окремих пластин, як сердечники дроселів або трансформаторів. Широкого поширення набули магнітні підсилювачі на тороїдальних осердях, які, незважаючи на технологічні труднощі їх виготовлення, мають цілу низку переваг і перша з них - відсутність

повітряних зазорів, що покращує характеристики магнітного підсилювача. Широко поширені такі схеми магнітних підсилювачів: однотактні та двотактні, реверсивні та неревверсивні, однофазні та багатофазні.

## **1.2 Тиристорні перетворювачі частоти на базі дискретної логіки**

Тиристорний перетворювач частоти (ТПЧ) — це пристрій, що використовує тиристор, призначений для перетворення трифазного струму промислової частоти в змінний багатофазний струм заданої частоти, який використовується для управління двигуном змінного струму, індукційного нагріву металів.

Електронний тиристорний перетворювач частоти складається зі схеми, що містить тиристор, котрий працює в режимі ключа. Блок управління заснований на мікропроцесорі або логічній схемі, яка не тільки забезпечує управління силовим електронними ключами, але і вирішує велику кількість допоміжних завдань (контроль, діагностика, захист). [3]

Схеми, створені відповідно до моделі джерела напруги, мають наступні характеристики:

- вихідний опір: малий (джерело напруги);
- рекуперація: потрібні додаткові кола;
- Згладжуючий елемент: конденсатор.

Схеми, створені відповідно до моделі джерела струму, мають наступні характеристики:

- вихідний опір: великий (джерело струму);
- рекуперація: потрібні додаткові кола;
- згладжуючий елемент: індуктор.

Залежно від конструкції і принципу роботи електроприводу існує два види перетворювачів частоти:

- з прямим підключенням;
- з проміжною ланкою постійного струму.

Перетворювачі частоти призначені для регульованого електроприводу, необхідні для перетворення мережевої напруги (однофазної або трифазної) промислової частоти в змінну багатофазну (зазвичай трифазну і лише в спеціальних випадках одно-, дво- або багатофазну) напругу (або струм), амплітуду та фазу якого можна змінювати у певному діапазоні.

Частота - це часовий параметр змінної напруги, що визначає по суті інтервали часу, через які змінюється знак цієї напруги. Саме це уявлення про частоту і лежить в основі найбільш загального принципу перетворення частоти в статичних пристроях, побудованих на повністю або частково керованих напівпровідникових ключових елементах - тиристорах (вентиліях). Сутність цього принципу полягає в організації такого з'єднання ключових елементів та їх включення та виключення за таким законом (алгоритмом) у функції часу, які забезпечують підключення джерела енергії до виходу перетворювача (до навантаження) із заданою частотою зміни знака середнього значення напруги (струму) на цьому виході. Тут середнє значення береться за половину періоду вихідної напруги (струму) чи менших інтервалах часу.

Процеси включення та вимкнення ключових елементів супроводжуються переходом струму від однієї гілки, що містить вентилі, до іншої (або інших). У перетворювальній техніці історично прийнято називати процес переходу струму від однієї гілки вентильної схеми до іншої комутацією. Однак останнім часом термін «комутація» у вказаному сенсі використовується при описі процесів у пристроях, пов'язаних з мережею змінного струму (випрямлячів, ведених мережею інверторах, тощо). Для автономних пристроїв поняття комутація ототожнюється з виключенням вентиля.

Тиристорні перетворювачі частоти (ТПЧ) за видом комутації (вимикання) тиристорів можна розділити на три класи:

- 1) із природною комутацією;
- 2) з примусовою (вимушеною, штучною) комутацією;
- 3) зі змішаною комутацією.

Під природною комутацією розуміється комутація тиристорів, що відбувається під впливом змінної напруги мережі, від якої живиться ТПЧ, або на яку він працює. Цей вид комутації має місце у випрямлячах, ведених мережею інверторах, ТПЧ із безпосереднім зв'язком тощо.

Якщо джерелом напруги, що комутує, є окреме (не відноситься безпосередньо ні до живильної, ні до приймальної мережі) джерело енергії, то комутацію називають примусовою. Саме цей вид комутації використовується в ТПЛ, що працюють незалежно від приймальної або живильної мережі (автономні інвертори, перетворювачі постійної напруги та ін.). Термін «примусова комутація» може бути поширений і на інвертори, що виконуються на повністю керованих ключових елементах, в яких функцію окремих джерел напруги, що комутує, виконують джерела керуючих сигналів.

Перетворювач із змішаною комутацією складається з вузлів, одна частина яких використовує природну комутацію, а інша – примусову.

За видом зв'язку навантаження з джерелом енергії або, точніше, за типом проміжного перетворення первинної (мережевої) напруги виділяють три типи (класу) ТПЛ:

- 1) із проміжною ланкою постійного струму;
- 2) з безпосереднім зв'язком мережі живлення та ланцюга навантаження (рис. 1.2);
- 3) із проміжною ланкою змінного струму підвищеної частоти.

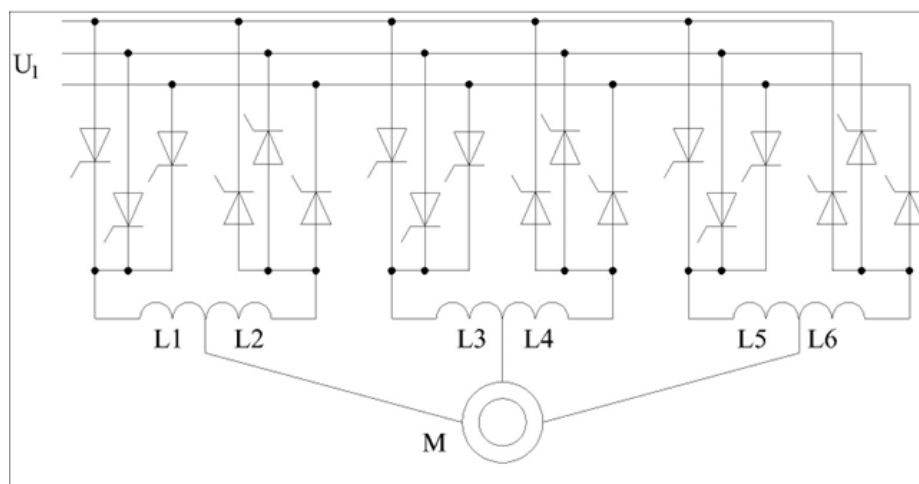


Рисунок 1.2 – Схема ТПЧ з безпосереднім зв'язком



Перетворювачі частоти використовуються для перетворення трифазного або однофазного мережевого струму змінного струму частотою від 1 Гц до 800 Гц. В трифазний або однофазний струм частотою 50 (60) Гц, а також виробляються електроіндуктивні перетворювачі частоти і електронні перетворювачі, які представляють собою асинхронні двигуни з фазними роторами, конструктивно працюють в режимі перетворювача-генератора. Перетворювач частоти забезпечує плавний запуск і зупинку двигуна, а також може змінювати напрямок обертання двигуна. [4]

### **1.3 Перетворювачі частоти на базі потужних БТІЗ з керуванням від дискретної логіки**

Перетворювачі частоти призначені для регулювання частоти обертання асинхронних двигунів шляхом зміни частоти мережі в широкому діапазоні. В цілому, є два основні завдання, які можуть бути вирішені за допомогою регульованого електроприводу. Він управляє крутним моментом і частотою обертання електродвигуна. Для вирішення завдання регулювання швидкості і крутного моменту в сучасному електроприводі використовуються 2 основні методи частотного регулювання [5]:

- Скалярне управління;
- Векторне управління.

Асинхронний електропривод зі скалярним управлінням є більш поширеним. Він використовується як частина приводу насосів, вентиляторів, компресорів та інших механізмів, і, що важливо, може підтримувати або частоту обертання вала двигуна (за допомогою датчиків частоти обертання), або технічні параметри (наприклад, тиск в трубопроводі за допомогою відповідних датчиків).

Основний принцип скалярного управління полягає в зміні частоти і амплітуди напруги живлення відповідно до Закону:

$$\frac{U}{f^n} = \text{const}, \text{ де } n \geq 1 \quad (1.3)$$

Конкретний тип залежності визначається вимогами, що пред'являються до електроприводу навантаженням. Зазвичай частота береться як незалежний фактор, а значення напруги на заданій частоті визначає тип механічних властивостей, величину пускового моменту і критичний момент.

Скалярне управління забезпечує постійну перевантажувальну здатність електроприводу незалежно від частоти напруги, але при цьому відбувається зниження крутного моменту, що розвивається двигуном на низьких частотах. Максимальний діапазон регулювання частоти обертання ротора в певний момент опору електроприводу зі скалярним управлінням досягає 1: 10.

В електропривод з векторним управлінням закладена математична модель двигуна, яка дозволяє розрахувати крутний момент на валу і швидкість обертання валу. В цьому випадку необхідні тільки датчики струму фаз статора двигуна. Завдяки системі управління забезпечується незалежне і практично неінерційне регулювання двох основних параметрів – крутного моменту на валу і частоти обертання.

На сьогоднішній день сформувалися два основних класи систем векторного управління – безсенсорні системи (без датчиків швидкості на валу двигуна) і системи зі зворотним зв'язком по швидкості. Застосування методу векторного управління визначається областю застосування електроприводу. Залежно від вимог до невеликого діапазону зміни швидкості (менше 1:100) і точності регулювання менше  $\pm 0,5\%$  використовується бессенсорное векторне управління.[6]

Якщо швидкість обертання вала сильно варіюється (до 1:10000 або більше), потрібна висока точність підтримки швидкості обертання (до  $\pm 1\%$  при частоті обертання менше 0,02 Гц) або якщо потрібно позиціонування вала, чітко встановлений крутний момент на валу двигуна з дуже високою точністю. низька швидкість обертання, тоді необхідно застосовувати метод векторного управління зі зворотним зв'язком по швидкості.

Випрямляч-перетворювач частоти з проміжною ланкою постійного струму, побудований за схемою автономного інвертора, є найбільш популярним.

Принцип роботи і застосування такого перетворювача частоти залежить від типу використовуваного випрямляча і автономного інвертора (інвертор напруги або інвертор струму).

Існує кілька різних схем випрямлячів. За принципом роботи їх можна розділити на 3 групи: керовані, напівкеровані і некеровані. Схематично всі випрямлячі побудовані по трифазній схемі схемою. Найбільш популярними є некеровані випрямлячі на основі напівпровідникових випрямних діодів, які характеризуються простотою і надійністю, високим ККД, а також достатньою якістю випрямляє напруги. Однак некерованість процесу перетворення енергії в багатьох випадках не дозволяє реалізувати необхідний режим рекуперації.

Керуючі випрямлячі, які зазвичай працюють на низькочастотних тиристорах, позбавлені як недоліків, так і більшості переваг діодних випрямлячів. Вони мають характеристики високої ефективності в напрямку перетворення енергії і зазвичай використовуються в поєднанні з автономними перетворювачами струму для регулювання вихідного струму перетворювача. Недоліками керованих випрямлячів є збільшення рівня пульсацій випрямленої напруги, зниження коефіцієнта потужності, який зменшується пропорційно вихідній напрузі, і односпрямований напрямок вихідного струму. При необхідності для забезпечення протікання випрямленого струму в обох напрямках використовується реверсивний тиристорний перетворювач, що складається з 2-х антипаралельних тиристорних випрямлячів, 1 з яких призначений для передачі струму навантаження в прямому напрямку, а інший 1 - в протилежному напрямку. Це ускладнює і здорожує перетворювач.

Напівкеровані Випрямлячі займають проміжне положення між керованими і некерованими випрямлячами, дозволяючи регулювати величину випрямленої напруги без можливості рекуперації енергії в мережу. У разі керуючих і напівкерованих випрямлячів можна буде відключити ланцюг живлення перетворювача частоти від основного джерела живлення без використання додаткового обладнання.

Перетворювач частоти складається з некерваного діодного випрямляча живлення В, автономного інвертора Аі, системи ШІМ-управління, системи автоматичного регулювання, дроселя і фільтруючого конденсатора. Вихідна частота і напруга регулюються на інверторі (рис. 1.3) за допомогою високочастотного широтно-імпульсного управління. Широтно-імпульсне управління характеризується періодом модуляції, протягом якого обмотки статора електродвигуна по черзі підключаються до позитивного і негативного електродів випрямляча. Тривалість цих станів в періоді ШІМ модулюється за синусоїдальним законом. При високих (зазвичай 2–15 кГц) тактових частотах ШІМ синусоїдальний струм надходить в обмотки електродвигуна завдяки його фільтруючим характеристикам. [7, 8]

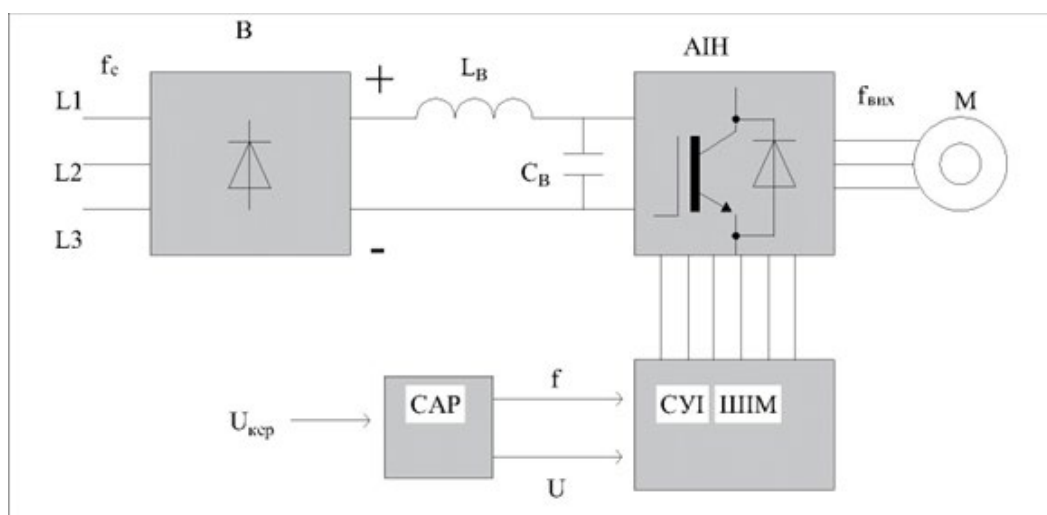


Рисунок 1.3 – Структурна схема ПЧ на базі силових транзисторів

Таким чином, форма кривої вихідної напруги являє собою високочастотну біполярну послідовність прямокутних імпульсів. Частота імпульсів визначається частотою ШІМ, тривалістю (шириною) імпульсу протягом періоду вихідної частоти, модульованої за синусоїдальним законом. Форма кривої вихідного струму (струму в обмотці асинхронного двигуна) майже синусоїдальна. Вихідну напругу інвертора можна регулювати двома способами: амплітудою (АР) шляхом зміни вхідної напруги.  $U_{вч}$  і широтно-імпульсним (ШІМ) за рахунок зміни програми перемикання вентилів  $V_1 - V_6$  при  $U_{вх} = \text{const}$ .

Другий метод широко популярний в сучасних перетворювачах частоти завдяки розвитку сучасної елементної бази (мікропроцесори, БТІЗ-транзистори). При широтно-імпульсній модуляції ми можемо бачити (рис. 1.4), що форма струму обмоток статора асинхронних двигунів близька до синусоїдальної завдяки індуктивності самих обмоток. [8]

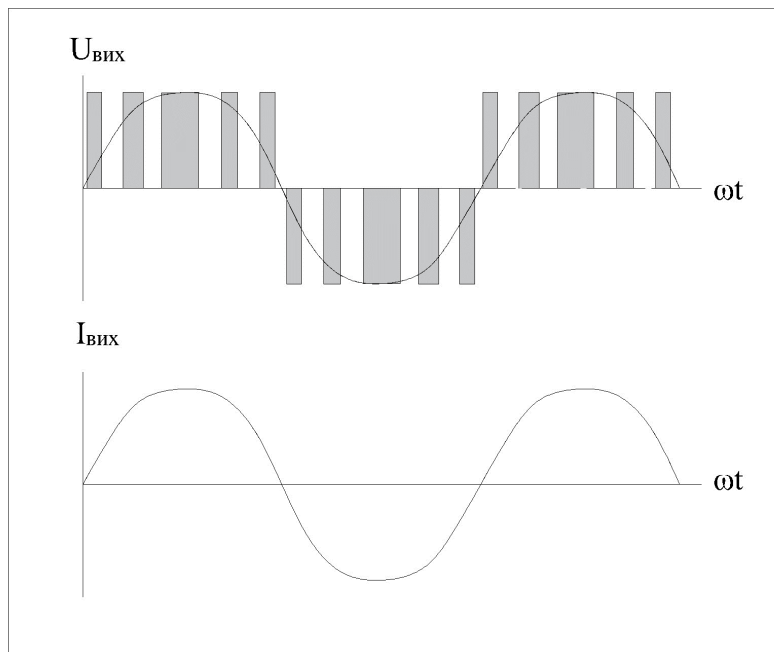


Рисунок 1.4 – Часові діаграми вихідної напруги та струму в обмотках статора електродвигуна

#### 1.4 Перетворювачі частоти на сучасних силових модулях з мікропроцесорним управлінням

Таке керування дозволяє отримати високий ККД перетворювача. Сучасні інвертори виконуються на основі повністю керованих силових напівпровідникових приладів – IGBT-транзисторів з ізольованим затвором або MOSFET. На рисунку 1.5 представлена трифазна схема автономного інвертора на IGBT-транзисторах. Вона складається з вхідного ємнісного фільтра  $C_{\phi}$  і IGBT-транзисторів  $V_1 - V_6$  та включеними зустрічно-паралельно діодами зворотного струму  $D_1 - D_6$ . За рахунок почергового перемикання вентилів  $V_1 - V_6$  за алгоритмом, заданим системою керування, постійна вхідна напруга  $U$  в перетвориться в змінну прямокутно-імпульсну вихідну напругу. Через керовані

ключі  $V_1 - V_6$  протікає активна складова струму асинхронного електродвигуна, через діоди  $D_1 - D_6$  – реактивна складова струму.

Характерним недоліком АІТ є те, що він не може працювати на холостому ході (при працюючому двигуні). Крім того, при використанні АІТ можливі великі втрати потужності і утворення додаткових антимоментів в двигуні, що призводить до обертових коливань. Якщо необхідно сформувати струм двигуна, близький до синусоїдального, то потрібно робити більш складну схему АІТ.

Особливістю автономного інвертора напруги є незалежність форми кривої напруги на виході інвертора від джерела живлення, замикання ланцюга струму навантаження через зворотний діод і характер навантаження. Недоліком АІТ є те, що для настройки рекуперативного режиму роботи електроприводу необхідно використовувати реверсивний випрямляч. Однак за допомогою інвертора напруги можна отримати високі енергетичні показники без ускладнення схеми і забезпечити вихідний струм, близький до синусоїдального. Загальну схему такого інвертора показано на рисунку 1.5

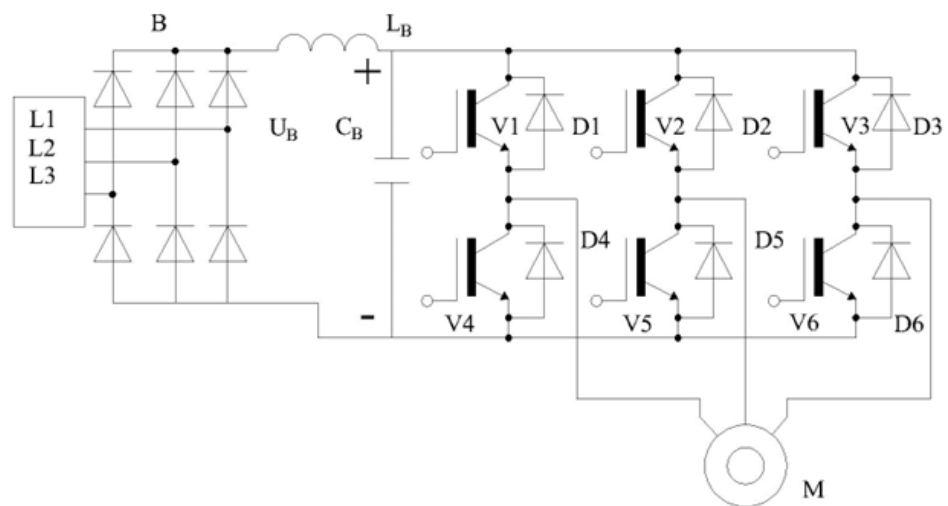


Рисунок 1.5 – Схема трифазного ПЧ на базі IGBT-транзисторів

АІТ широко використовується в сучасних електроприводах. Біполярні транзистори з ізолюваним затвором (IGBT) і польові транзистори з ізолюваним затвором (MOSFET) використовуються для створення силових перемикачів в області комутаційних струмів до 50А. Силові біполярні транзистори в діапазоні

до 50А в основному використовуються в недорогому промисловому обладнанні. В області комутаційних струмів, що перевищують 50А, основним пристроєм є силовий модуль на базі біполярного транзистора з ізольованим затвором.

Зокрема, необхідно підкреслити транзистори і діодно-транзисторні модулі, виготовлені за інтегрованою технологією на основі транзисторів типу IGBT. Низькі втрати потужності в ключовому режимі, високі значення робочої напруги і струму, короткий час включення і виключення для цих модулів дає можливість використання в паралельній роботі (GTO, GCT, IGCT).

Однак краще створювати потужні і компактні перетворювачі з високими частотами перемикавання на напівпровідникових вентилях.

Сучасні ПЧ оснащені мікропроцесорною системою управління, що використовує найсучасніші технології з модулями на IGBT-транзисторах. В результаті можна отримати надійний і компактний перетворювач. Особливий метод широтно-імпульсної модуляції з вибором частоти перемикавання забезпечує безшумну роботу електродвигуна. Функція overcurrent protection забезпечує ефективний захист перетворювачів і електродвигунів. Також пропонується гнучкий вибір законів регулювання частоти і напруги для електродвигунів. Вибір конкретного закону регулювання залежить від типу навантаження і необхідної точності.

Більшість сучасних ПЧ підтримують наступні функції:

– скалярні режими:

1. Лінійна характеристика  $U/f$  (за замовчуванням), котра застосовується для навантаження зі змінним та постійним моментом (насоси, конвеєри).

2. Лінійне  $U/f$ -регулювання з FCC (Flux Current Control) (контролюванням зчеплення магнітного потоку) – підтримує струм двигуна, що створює потік для збільшення ефективності, даний спосіб регулювання використовується для збільшення ККД і поліпшення динамічних характеристик електроприводу.

3. Квадратична характеристика  $U/f^2$ , застосовується для навантажень зі змінним моментом (компресори, насоси).

4. Багатоточкова  $U/f$  – для використання у особливих випадках.

5. U/f-регулювання з незалежною уставкою напруги – можна штучно задавати напругу незалежно від вихідної частоти перетворювача (RFG).

– векторні режими:

1. Безсенсорне векторне регулювання – забезпечує точне регулювання частоти обертання двигуна без застосування зовнішніх датчиків або енкодерів. Забезпечує високий момент і динамічні характеристики приводу.

2. Безсенсорне векторне керування моментом – забезпечує векторне регулювання заданого моменту на двигуні без датчика моменту, застосовується в технологіях, де вимагається підтримка заданого значення моменту на валу двигуна.

Більшість сучасних перетворювачів може працювати як з асинхронним електродвигуном, так і з синхронної машиною, при роботі з синхронним електродвигуном допускається робота тільки при завданні лінійної залежності U/f. [11]

## **1.5 Висновки**

Аналізуючи розвиток систем керування асинхронним електродвигуном, переваги, недоліки та особливості кожної з них можна зробити висновок, що система керування асинхронним електродвигуном за допомогою частотного перетворювача є гнучким у використанні та найбільш оптимальним рішенням.

Вибравши дану систему керування можна вирішити багато питань фактично одним пристроєм, тому даний аспект є вирішальним у виборі системи керування.



## 2 РЕЖИМИ РОБОТИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ЗІ ЗВОРОТНІМ ЗВ'ЯЗКОМ

Основою для аналізу режимів роботи електропривода є отримані диференціальні рівняння руху одно-, дво- та тримасової розрахункової схеми. В цілому рух механічної частини електропривода вірно описується одномасовою схемою за допомогою основного рівняння руху

$$j \frac{d\omega}{dt} = M - M_c \quad (2.1)$$

Права частина рівняння визначає характер керуючої та збурюючої дії. Керуючою дією для механічної частини ЕП є момент двигуна  $M$ , а збурюючою – статичний момент навантаження  $M_c$ , створюваний робочим органом механізму. Права частина називається також динамічним моментом

$$M_{\text{дин}} = M - M_c \quad (2.2)$$

Динамічний момент визначає прискорення двигуна та відповідно механізму

$$\frac{d\omega}{dt} = \varepsilon = \frac{M - M_c}{j} = \frac{M_{\text{дин}}}{j} \quad (2.3)$$

В залежності від значення динамічного моменту електропривод може знаходитися у статичному чи динамічному режимі роботи.

Статичний режим має місце, якщо динамічний момент дорівнює нулю  $M_{\text{дин}} = 0$ , тобто коли  $M = M_c$ . При цьому прискорення також дорівнює нулю і відбувається усталений рух із постійною швидкістю  $\omega = \text{const}$  або електропривод не рухається  $\omega = 0$ . Механічні частини з нелінійними кінематичними зв'язками (кривошипно-шатунний, кулісний механізми тощо) не мають статичного режиму.

Динамічний режим настає при  $M_{\text{дин}} \neq 0$ , тобто при  $M \neq M_c$ , і наявності прискорення

$$\frac{d\omega}{dt} = \varepsilon \neq 0 \quad (2.4)$$

В залежності від знаків динамічного моменту та швидкості механічна частина може розганятися, якщо:

$$M_{\text{дин}} > 0; \frac{d\omega}{dt} > 0; \omega > 0 \quad M_{\text{дин}} < 0; \frac{d\omega}{dt} < 0; \omega < 0 \quad (2.5)$$

або сповільнюватися якщо:

$$M_{\text{дин}} > 0; \frac{d\omega}{dt} > 0; \omega < 0 \quad M_{\text{дин}} < 0; \frac{d\omega}{dt} < 0; \omega > 0 \quad (2.6)$$

Динамічний режим викликає динамічний перехідний процес чи сталий динамічний процес. Перехідний процес можна подати як перехід в часі від одного статичного режиму до іншого, що фактично є переходом від однієї до іншої точки рівноваги. Сталий динамічний процес спостерігається, коли в процесі руху механічної частини момент двигуна  $M$  чи статичний момент  $M_c$  змінюються, наприклад, у кривошипно-шатунного механізму. [12]

На рисунку 2.1 показано процес руху механічної частини. На ділянці I електропривод знаходиться у динамічному режимі, здійснюючи розгін механізму, тобто перехід від нульової до кінцевої швидкості  $\omega_{\text{кін}}$ .

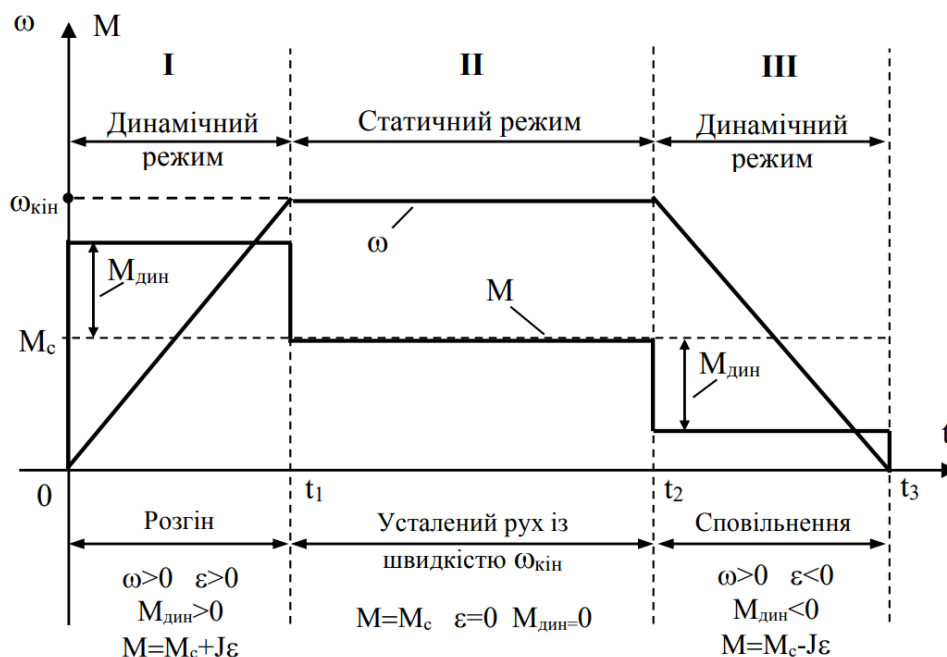


Рисунок 2.1 – Процес руху механічної частини

У електроприводах зі зворотнім зв'язком система ніколи не перебуває у статичних режимах. Система управління постійно підтримує оберти двигуна згідно уставки. Двигун постійно переходить з режиму розгону (система подає

більше енергії для розгону) в режим гальмування (оберти починають перевищувати уставку і система зменшує керуючий параметр).

## **2.1 Висновки**

Провівши огляд режимів роботи електропривода на базі асинхронного електродвигуна у системах зі зворотнім зв'язком можна зробити висновок, що у системах керування зі зворотнім зв'язком двигун фактично не працює у жорстких режимах.

Даний аспект позитивно відображається на ресурсі двигуна та його тепловому режимі. Це досягається саме за рахунок системи керування на базі частотного перетворювача зі зворотнім зв'язком.

## 3 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ТА ВИБІР АПАРАТНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

### 3.1 Параметри двигуна, та вибір математичної моделі двигуна

За, заданими, початковими даними, вибираємо двигун, типу 4А, а саме, 4АА56А2У3. Характеристики даного двигуна, наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – характеристики двигуна 4АА56А2У3

№	Величина	Числове значення
1	Потужність, $P_H$ , кВт	0,18
2	Ковзання, $s$ , %	8
3	Коефіцієнт корисної дії, $\eta$ , %	66
4	$\cos(\varphi)$ , в. о.	0,76
5	$\frac{M_{\max}}{M_H}$ , в. о.	2,2
6	$\frac{M_{II}}{M_H}$ , в. о.	2
7	$\frac{M_{\min}}{M_H}$ , в. о.	1,2
8	$\frac{I_{II}}{I_H}$ , в. о.	5
9	$R'_1$ , в. о.	0,17
10	$X'_1$ , в. о.	0,052
11	$R''_2$ , в. о.	0,094
12	$X''_2$ , в. о.	0,067
13	$X_\mu$ , в. о.	2,0
14	Момент інерції двигуна, $J$ , кг · м <sup>2</sup>	0,00042
15	Синхронна швидкість, $n_0$ , об/хв.	3000

Будь-яку електричну машину з круговим полем, можна, представити в вигляді стандартної електричної машини. Стандартна електрична машина – це ідеалізована двохполюсна машина з двома парами обмоток, на статорі, та на роторі. [13]

Математичні моделі для стандартної електричної машини, були розроблені, ще в 1930-х роках, Г. Кроном. Вони мають наступний вигляд:

$$\begin{cases} U_a^s = i_a^s \cdot r_a^s + \frac{d\psi_a^s}{dt}; \\ U_b^s = i_b^s \cdot r_b^s + \frac{d\psi_b^s}{dt}; \\ U_a^r = i_a^r \cdot r_a^r + \frac{d\psi_a^r}{dt}; \\ U_b^r = i_b^r \cdot r_b^r + \frac{d\psi_b^r}{dt}. \end{cases} \quad (3.1)$$

А потокощеплення в (3.1), визначаються, як:

$$\begin{cases} \psi_a^s = L_a^s \cdot i_a^s + M \cdot \cos(\theta) \cdot i_a^r + M \cdot \sin(\theta) \cdot i_b^r; \\ \psi_b^s = L_b^s \cdot i_b^s + M \cdot \cos(\theta) \cdot i_b^r + M \cdot \sin(\theta) \cdot i_a^r; \\ \psi_a^r = L_a^r \cdot i_a^r + M \cdot \cos(\theta) \cdot i_a^s - M \cdot \sin(\theta) \cdot i_b^s; \\ \psi_b^r = L_b^r \cdot i_b^r + M \cdot \cos(\theta) \cdot i_b^s + M \cdot \sin(\theta) \cdot i_a^s. \end{cases} \quad (3.2)$$

де  $U_a^s, U_b^s, U_a^r, U_b^r$  - напруга на обмотках статора і ротора відповідно;

$i_a^s, i_b^s, i_a^r, i_b^r$  - сила струму в обмотках статора і ротора відповідно;

$r_a^s, r_b^s, r_a^r, r_b^r$  - активний опір в обмотках статора і ротора відповідно;

$L_a^s, L_b^s, L_a^r, L_b^r$  - індуктивність обмоток статора і ротора відповідно;

$M$  – взаємна індукція між обмотками статора і ротора;

$\theta$  - кут між осями обмоток статора і ротора.

Відповідно, якщо підставити (3.2) в (3.1), то вийде дуже великі рівняння, які, звичайно, будуть описувати, весь процес електродвигуна. Для спрощення цих рівнянь, вводять поняття, наполовину рухому електромашину, в якій в обмотки ротора, як ніби вводяться вже електрорушійна сила обертання. При цьому в обох випадках, струми, та потужності, залишаються не змінними.

Якщо, ми візьмемо, не рухому систему координат.  $\alpha, \beta$ , рівняння стандартної електричної машини, буде мати наступний вигляд:

$$\begin{cases} U_{\alpha}^s = i_{\alpha}^s r_{\alpha}^s + \frac{d\psi_{\alpha}^s}{dt}; \\ U_{\beta}^s = i_{\beta}^s r_{\beta}^s + \frac{d\psi_{\beta}^s}{dt}; \\ U_{\alpha}^r = i_{\alpha}^r r_{\alpha}^r + \frac{d\psi_{\alpha}^r}{dt} + \omega_r \psi_{\beta}^r; \\ U_{\beta}^r = i_{\beta}^r r_{\beta}^r + \frac{d\psi_{\beta}^r}{dt} + \omega_r \psi_{\alpha}^r. \end{cases} \quad (3.3)$$

А потокощеплення в (3.3), визначаються, як:

$$\begin{cases} \psi_{\alpha}^s = L_{\alpha}^s i_{\alpha}^s + M \cdot i_{\alpha}^r; \\ \psi_{\beta}^s = L_{\beta}^s i_{\beta}^s + M \cdot i_{\beta}^r; \\ \psi_{\alpha}^r = L_{\alpha}^r i_{\alpha}^r + M \cdot i_{\alpha}^s; \\ \psi_{\beta}^r = L_{\beta}^r i_{\beta}^r + M \cdot i_{\beta}^s. \end{cases} \quad (3.4)$$

де  $U_{\alpha}^s, U_{\beta}^s, U_{\alpha}^r, U_{\beta}^r$  - напруга на обмотках статора і ротора відповідно в координатах  $\alpha, \beta$ ;

$i_{\alpha}^s, i_{\beta}^s, i_{\alpha}^r, i_{\beta}^r$  - сила струму в обмотках статора і ротора відповідно в координатах  $\alpha, \beta$ ;

$r_{\alpha}^s, r_{\beta}^s, r_{\alpha}^r, r_{\beta}^r$  - активний опір в обмотках статора і ротора відповідно в координатах  $\alpha, \beta$ ;

$L_{\alpha}^s, L_{\beta}^s, L_{\alpha}^r, L_{\beta}^r$  - індуктивність обмоток статора і ротора відповідно в координатах  $\alpha, \beta$ ;

$M$  – взаємна індукція між обмотками статора і ротора;

$\omega_r$  - кутова швидкість ротора.

Також, дану систему потрібно, доповнити, моментами двигуна, тка електромагнітний момент буде мати наступний вигляд:

$$M_{em} = \frac{1}{p} \cdot J \cdot \frac{d\omega_r}{dt} \pm M_c, \quad (3.5)$$

де  $M_{em}$  - електромагнітний момент, створюваний машиною;

$p$  – число пар полюсів;

$J$  – момент інерції.

Обертовий момент буде визначатись, як:

$$M = \frac{m}{2} \cdot M_{em} \cdot (i_{\beta}^s i_{\alpha}^r - i_{\alpha}^s i_{\beta}^r), \quad (3.6)$$

Звівши усі рівняння, отримаємо стандартну математичну модель для короткозамкненого асинхронного двигуна:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{di_{\alpha}^s(t)}{dt} = k \left[ L_r (U_{\alpha}^s(t) - R_s i_{\alpha}^s(t)) + L_m (R_r i_{\alpha}^r(t) + \omega_r(t) (L_r i_{\beta}^r(t) + L_m i_{\beta}^s(t))) \right] \\ \frac{di_{\beta}^s(t)}{dt} = k \left[ L_r (U_{\beta}^s(t) - R_s i_{\beta}^s(t)) + L_m (R_r i_{\beta}^r(t) - \omega_r(t) (L_r i_{\alpha}^r(t) + L_m i_{\alpha}^s(t))) \right] \\ \frac{di_{\alpha}^r(t)}{dt} = k \left[ -L_m (U_{\alpha}^s(t) - R_s i_{\alpha}^s(t)) - L_s (R_r i_{\alpha}^r(t) + \omega_r(t) (L_r i_{\beta}^r(t) + L_m i_{\beta}^s(t))) \right] \\ \frac{di_{\beta}^r(t)}{dt} = k \left[ -L_m (U_{\beta}^s(t) - R_s i_{\beta}^s(t)) - L_s (R_r i_{\beta}^r(t) - \omega_r(t) (L_r i_{\alpha}^r(t) + L_m i_{\alpha}^s(t))) \right] \\ \frac{d\omega_r(t)}{dt} = \frac{p}{J} \cdot (M_{em}(t) - M_0(\omega_r(t))); \quad k = \frac{1}{L_s L_r - L_m^2}; \\ M_{em}(t) = \frac{mp}{2} \cdot L_m (i_{s\beta}(t) i_{r\alpha}(t) - i_{r\beta}(t) i_{s\alpha}(t)), \end{array} \right. \quad (3.7)$$

де  $L_m$  - взаємна індукція в обмотках статора і ротора;

$$L_s = L_{\alpha}^s = L_{\beta}^s \quad L_r = L_{\alpha}^r = L_{\beta}^r;$$

$$R_s = r_{\alpha}^s = r_{\beta}^s \quad R_r = r_{\alpha}^r = r_{\beta}^r;$$

$$U_{s\alpha}(t) = \sqrt{2} U_m \cos(\omega t);$$

$$U_{s\beta}(t) = \sqrt{2} U_m \sin(\omega t);$$

$U_m$  - напруга мережі живлення;

$\omega$  - кругова частота мережі живлення.

Оскільки двигун короткозамкнений, то  $U_{\alpha}^r = U_{\beta}^r = 0$ .

Перед модуляцією, та підстановкою, перетворювача частоти, з регулятором швидкості, потрібно розрахувати параметри двигуна, такі як  $R_s, R_r, L_s, L_r, L_m$ .

### 3.2 Розрахунок параметрів двигуна

Взаємна індуктивність в обмотках статора і ротора, в трифазному асинхронному двигуні, визначається наступним чином: [14]

$$L_m = \frac{3}{2} \cdot L_0, \quad (3.8)$$

де  $L_0$  - індукція розсіювання:

$$L_0 = 2 \cdot \mu_0 \cdot w^2 \cdot \frac{l_0}{p \cdot q} \cdot k_0, \quad (3.9)$$

де  $\mu_0$  - магнітна проникність повітря ( $\mu_0 = 1,2566371 \cdot 10^{-6}$ );

$w$  - кількість витків фази:

$l_0$  - довжина статора ( $l_0 = 330$ );

$p$  - кількість пар полюсів ( $p = 1$ );

$q$  - кількість пазів на полюс і фази ( $q = 3$ );

$k_0$  - зв'язковий коефіцієнт проникності ( $k_0 = 0,174$ ).

Для визначення кількості витків фази, використаємо наступну формулу:

$$w = \frac{k_n \cdot U_\phi}{4,44 \cdot f \cdot k_{об} \cdot \Phi}, \quad (3.10)$$

де  $k_n$  - коефіцієнт навантаження ( $k_n = 0,977$ );

$U_\phi$  - фазна напруга ( $U_\phi = 220$ );

$f$  - частота напруги ( $f = 50$ );

$k_{об}$  - обмотковий коефіцієнт ( $k_{об} = 0,96$ );

$\Phi$  - магнітний потік:

$$\Phi = \frac{B_\delta \cdot D \cdot l_0 \cdot 10^{-6}}{p}, \quad (3.11)$$

де  $B_\delta$  - максимальна індукція в повітряному зазорі ( $B_\delta = 0,67$ );

$D$  - внутрішній діаметр сердечника статора:

$$D = 0,68 \cdot D_1 - 5, \quad (3.12)$$

де  $D_1$  - зовнішній діаметр статора ( $D_1 = 170$ ).



$$D = 0,68 \cdot 170 - 5 = 110,6.$$

$$\Phi = \frac{0,67 \cdot 110,6 \cdot 330 \cdot 10^{-6}}{1} = 0,024.$$

$$w = \frac{0,977 \cdot 220}{4,44 \cdot 50 \cdot 0,96 \cdot 0,024} = 41,252.$$

$$L_0 = 2 \cdot 1,2566371 \cdot 10^{-6} \cdot (41,252)^2 \cdot \frac{330}{1 \cdot 3} \cdot 0,174 = 0,082.$$

$$L_m = \frac{3}{2} \cdot 0,082 = 0,123 \text{ (мГн)}.$$

### 3.3 Розрахунок параметрів опорів та індукцій двигуна

Оскільки, задані дані з таблиці 3.1, приводяться для схеми заміщення Г-подібної, тому потрібно перевести ці значення опорів в оригінальну форму.

Визначимо коефіцієнт розсіювання статора:

$$\tau = \frac{X_1}{X_\mu}, \quad (3.13)$$

де  $X_1$  визначається наступним чином:

$$X_1 = \frac{2 \cdot X'_1 \cdot X_\mu}{X_\mu + \sqrt{X_\mu^2 + 4 \cdot X'_1 \cdot X_\mu}}, \quad (3.14)$$

$$X_1 = \frac{2 \cdot 0,052 \cdot 2}{2 + \sqrt{2^2 + 4 \cdot 0,052 \cdot 2}} = 0,051.$$

$$\tau = \frac{0,051}{2} = 0,025.$$

Коефіцієнт опору статора, визначається:

$$\rho = \frac{R'_1}{X_1 + X_\mu}, \quad (3.15)$$

$$\rho = \frac{0,17}{0,051 + 2} = 0,083.$$

Активний опір статора, визначається, як:

$$R_s = \frac{R'_1}{m_m}, \quad (3.15)$$

де  $m_m$  - поправочний коефіцієнт для Г-подібної схеми заміщення ( $m_m = 1,22$ ).

$$R_s = \frac{0,17}{m_m} = 0,139.$$

Реактивний опір статора, визначається:

$$X_s = \frac{X_1}{(1 + \tau) \cdot \left(1 + \frac{R_s \cdot \rho}{X_1}\right)}, \quad (3.16)$$

$$X_s = \frac{0,051}{(1 + 0,025) \cdot \left(1 + \frac{0,139 \cdot 0,083}{0,051}\right)} = 0,04.$$

Активний опір ротора, визначається:

$$R_r = \frac{R''_2}{m_m \cdot (1 + \tau^2) \cdot (1 + \rho^2)}, \quad (3.17)$$

$$R_r = \frac{0,094}{1,22 \cdot (1 + 0,025^2) \cdot (1 + 0,083^2)} = 0,076.$$

Реактивний опір ротора, визначається:

$$X_r = \frac{X''_2}{(1 + \tau^2) \cdot (1 + \rho^2)}, \quad (3.18)$$

Для визначення індукції розсіювання на статорі, скористаємось наступною формулою:

$$L_{s0} = \frac{X_s}{2 \cdot \pi \cdot f}, \quad (3.19)$$

$$L_{s0} = \frac{0,04}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 1,283 \cdot 10^{-4} \text{ (Гн)}.$$

Для визначення індукції розсіювання на роторі, можна використати наступну формулу:

$$L_{r0} = \frac{X_r}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \left(\frac{100 - s}{100}\right)}, \quad (3.20)$$

де  $s$  – ковзання, в процентах ( $s = 8$ ).

$$L_{r0} = \frac{0,066}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \left(\frac{100 - 8}{100}\right)} = 2,302 \cdot 10^{-4} \text{ (Гн)}.$$

Повна індукція статора, з приведенням її до одної величини (мГн) буде виражатись наступним чином:

$$L_s = L_{s0} \cdot 1000 + L_\mu, \quad (3.21)$$

$$L_s = 1,283 \cdot 10^{-4} \cdot 1000 + 0,123 = 0,251 \text{ (мГн)}.$$

Повна індукція ротора, з приведенням її до одної величини (мГн), можна виразити наступним чином:

$$L_r = L_{r0} \cdot 1000 + L_\mu, \quad (3.22)$$

$$L_s = 2,302 \cdot 10^{-4} \cdot 1000 + 0,123 = 0,353 \text{ (мГн)}.$$

Коефіцієнт  $k$ , в (3.7), тоді можна вирахувати чисельно:

$$k = \frac{1}{0,353 \cdot 0,251 - 0,123^2} = 13,582.$$

### 3.4 Результати моделювання асинхронного двигуна

Задля моделювання асинхронного двигуна, використаємо, програмне забезпечення: Matlab Simulink. Результат моделювання представлений на рисунку 3.1. [13, 14]

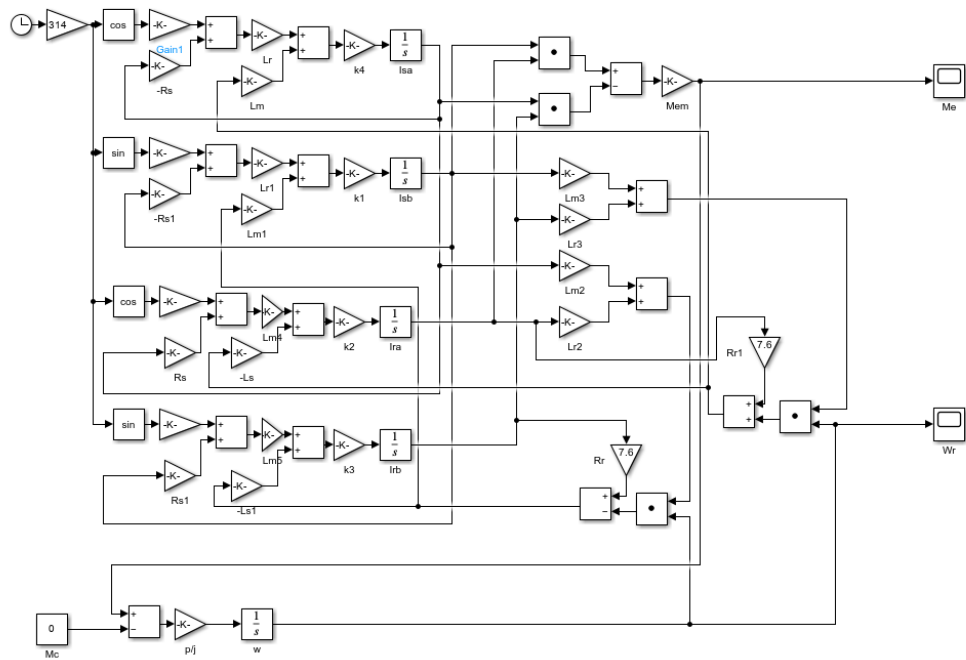


Рисунок 3.1 – Модель асинхронного двигуна в ППП Matlab Simulink

Промодельюємо ситуацію, коли двигун запускається з номінальним моментом навантаження, та після 2 с. момент навантаження падає у двічі.

Графіки швидкості обертання в рад/с, та моменту навантаження на валу, представлені на рисунку 3.2а та 3.2б.

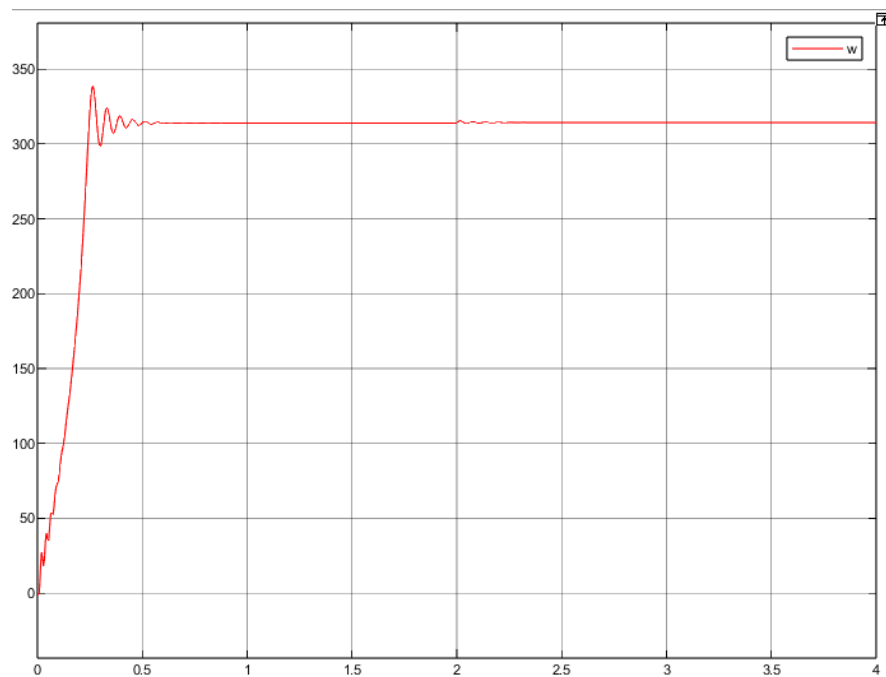


Рисунок 3.2а – Графік швидкості обертання

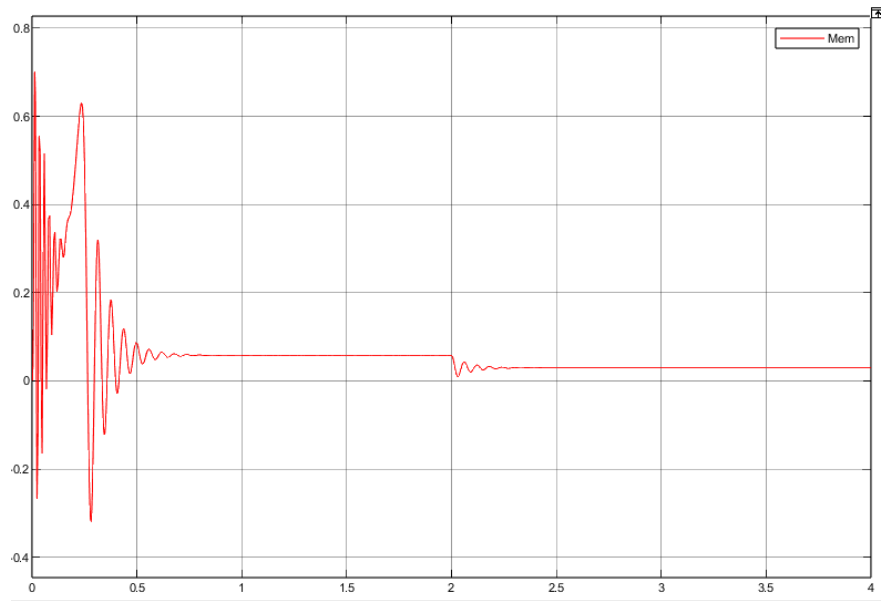


Рисунок 3.26 – Графік моменту навантаження

### 3.5 Додавання перетворювача частоти в модель

При додавання перетворювача частоти в модель, яка зображена на рисунку 3.1, потрібно ще додати регулювання по швидкості. Нова, удосконалена, модель, зображена на рисунку 3.3.

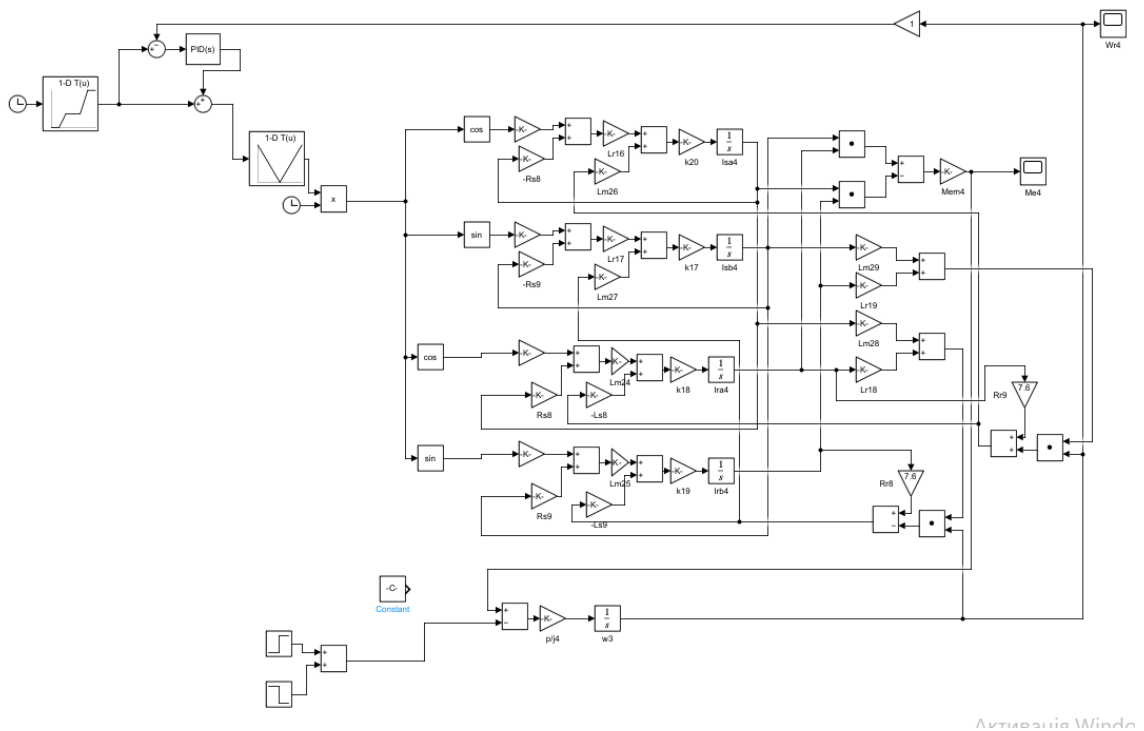


Рисунок 3.3 – Модель ПЧ-АД, в Matlab Simulink

Як видно з рисунку 3.3, модель працює, за певною заданою, бажаною синхронною швидкістю обертання, вираженою в рад/с. На рисунку 3.4, зображено, яка логіка закладена при керуванні асинхронного двигуна.

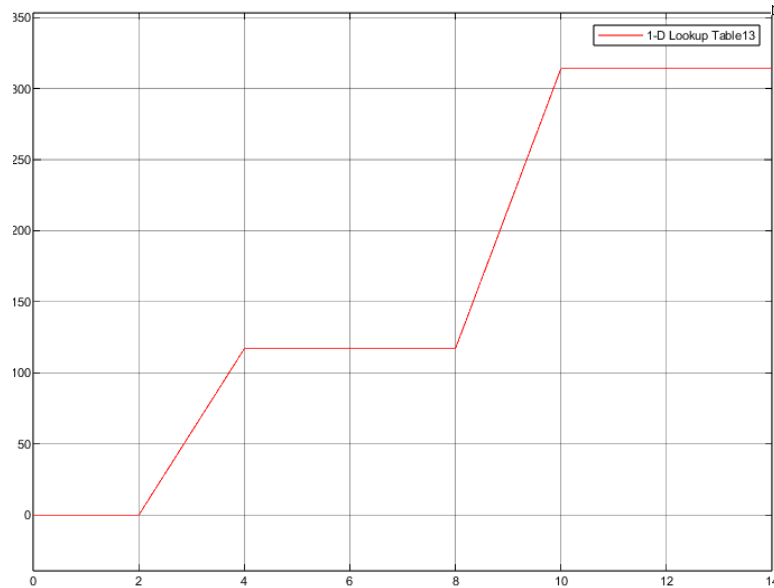


Рисунок 3.4 – Графік логіки роботи асинхронного двигуна

Також, на моменті відрізка в 5с., додається навантаження, а на моменті відрізка в 11с., навантаження забирається. Графік швидкості, та моменту навантаження, представлені на рисунку 3.5а та 3.5б.

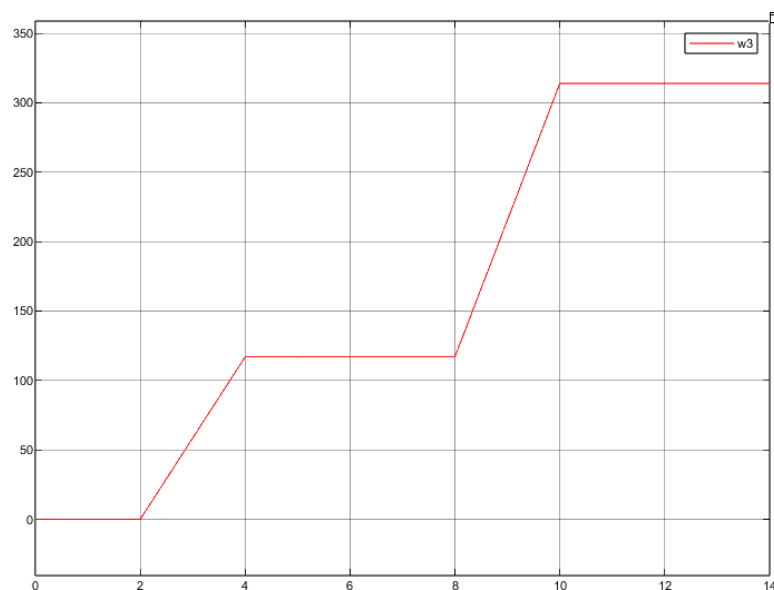


Рисунок 3.5а – Графік швидкості ПЧ-АД

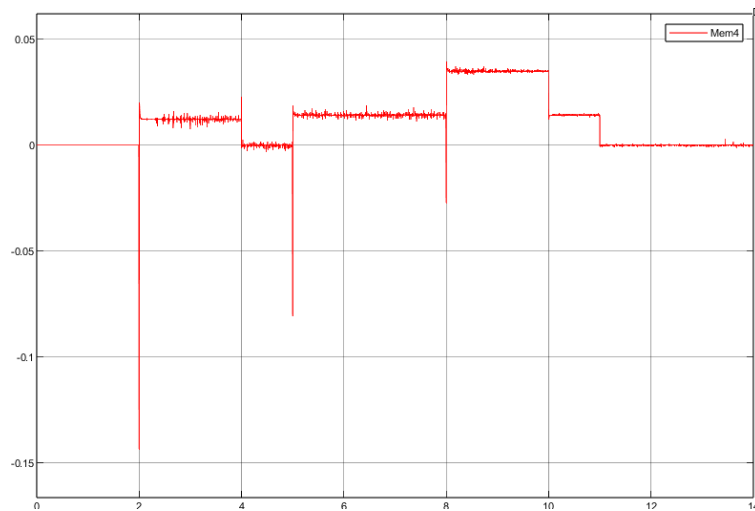


Рисунок 3.56 – Графік моменту навантаження ПЧ-АД

Як можна замітити, з порівняння графіків, при встановленні ПЧ-АД, в моделі зменшились перехідні процеси. По швидкості, перехідних процесів, майже, немає. А по моменту навантаження, перехідні процеси, зменшились суттєво.

### 3.6 Вибір та огляд алгоритму керування

Для керування даною системою на базі частотного перетворювача використовується алгоритм керування пропорційно-інтегрального регулятора, з використанням прямого і зворотнього перетворення Кларка-Парка. [10, 11]

У стандартному ПІ-регуляторі моніторяться усі три фазні струму, обробляються їх три синусоїдальні сигнали, також керуючий мікроконтролер має виробляти три синусоїдальних сигнали уставок для ПІ-регулятора.

ПІ-регулятор з використанням прямого і зворотнього перетворень Кларка-Парка має значно гнучкіший функціонал, дозволяє підтримувати крутний момент та оберти згідно уставки, економлячи при цьому понад 30% обчислювальних ресурсів мікроконтролера.

Даний алгоритм слідкує за струмами двох фаз (А і В), а саме за їх формою та амплітудою, та обертами, а точніше за періодом між тактами датчика обертів (датчики з лінійним виходом не використовуються з даним алгоритмом). За першим законом Кірхгофа обчислюється струм третьої фази (фази С). Напрямок

струму у реальному двигуні має протилежний знак, тому маємо наступну формулу:

$$I_A + I_B = -I_C \quad (3.23)$$

Оривавши дані про форму і амплітуду усіх трьох фаз, виконується перетворення трьохфазної машини у еквівалентну двофазну машину, тим самим спрощується цифрова обробка сигналів:

$$I_\alpha = I_A \quad (3.24)$$

$$I_\beta = \frac{(I_B - I_C)}{\sqrt{3}}$$

Знаючи за допомогою енкодера (для більш точних обрахунків – резольвера) кут, на який відстає ротор відносно заданого значення, адже вектор магнітного потоку в роторі завжди перпендикулярний найбільшому фазному струмові, ми можемо ще спростити дані сигнали за допомогою прямого перетворення Кларка-Парка, отримавши так звані d-компоненту та q-компоненту:

$$I_d = I_\alpha * \cos\theta_\lambda + I_\beta * \sin\theta_\lambda \quad (3.25)$$

$$I_q = -I_\alpha * \sin\theta_\lambda + I_\beta * \cos\theta_\lambda$$

Таким чином ми можемо не генерувати сигнали уставки і опрацьовувати сигнали помилки синусоїдальної форми, а просто «відгукуватись» на коливання сигналів, що мають лінійну залежність.

ПІ-регулятор, що використовується в даній системі має наступний вигляд (рис. 3.6):



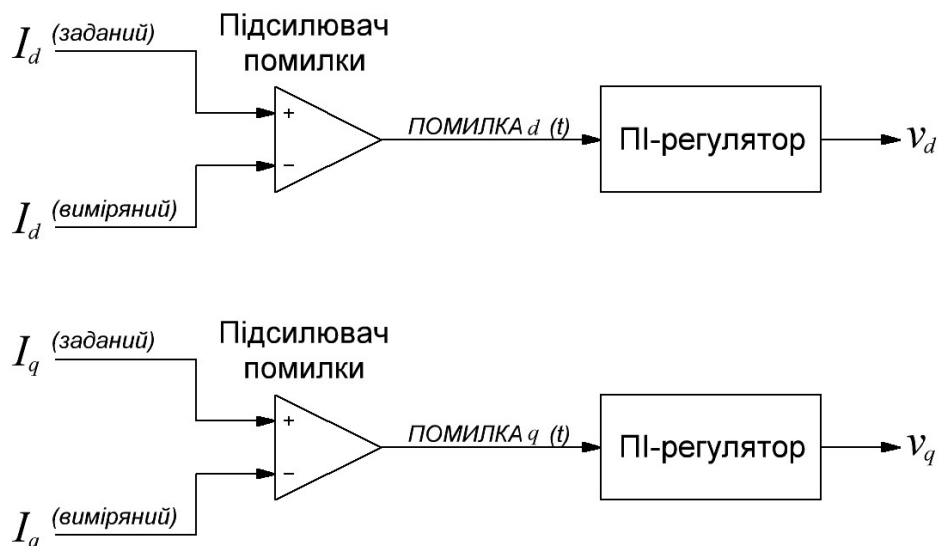


Рисунок 3.6 – ПІ-регулятор системи

Однак отримані сигнали керування  $v_d$  і  $v_q$  не можна одразу передати на виконавчий орган (силовий модуль), оскільки це все ще будуть лінійні сигнали. Для їх подальшого використання, слід виконати зворотнє перетворення Кларка-Парка, після чого буде отримано сигнали для керування еквівалентної двофазної машини.

$$v_\alpha = v_d * \cos\theta_\lambda - v_q * \sin\theta_\lambda \quad (3.26)$$

$$v_\beta = v_d * \sin\theta_\lambda + v_q * \cos\theta_\lambda$$

Далі необхідно виконати кінцеве перетворення, щоб з сигналів керування для еквівалентної двофазної машини отримати сигнали керування для повноцінної трьохфазної машини.

$$A = \alpha \quad (3.27)$$

$$B = -\frac{1}{2}\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2}\beta$$

$$C = -\frac{1}{2}\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2}\beta$$

Виконавши вище вказані математичні обчислення, можна скласти повний алгоритм роботи системи керування асинхронним електродвигуном зі зворотнім зв'язком, котра описується у даній роботі. Алгоритм показано на рисунку 3.7.

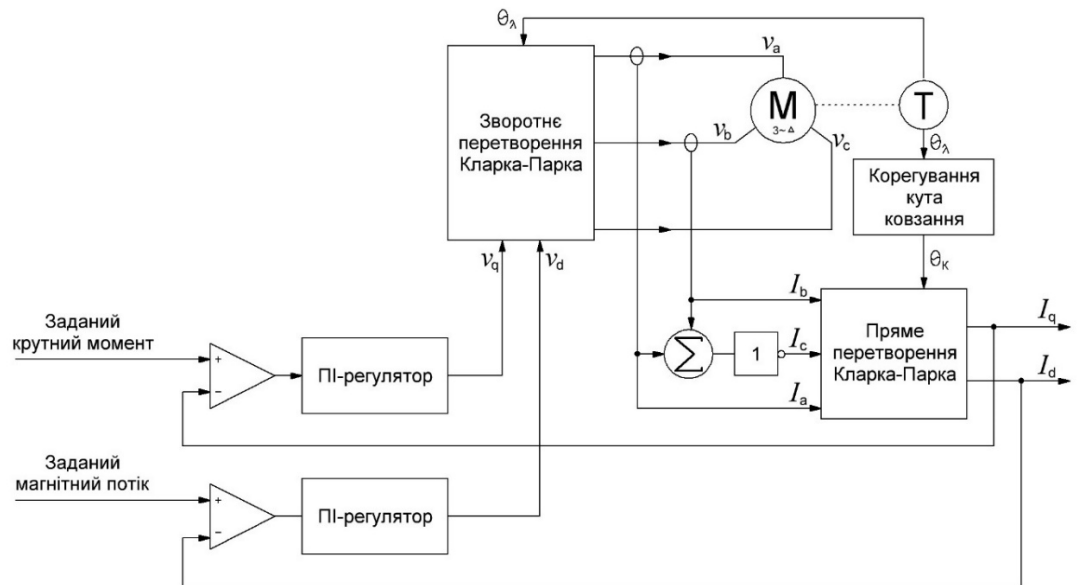


Рисунок 3.7 – Алгоритм роботи системи

Базуючись на даних про двигун та маючи робочий алгоритм, наступною ітерацією необхідно виконати вибір апаратного забезпечення.

### 3.7 Вибір апаратного забезпечення

Для розробки системи керування слід використовувати мікроконтролер, що дозволяє без проблем обробляти вище описані функції, при цьому даний МК має встигати обробляти зовнішні сигнали уставок та кнопки аварійної зупинки. Великою перевагою було б мати на борту МК апаратні модулі для проведення математичних операцій (математичний співпроцесор). [15]

З доступних для купівлі МК є широкий вибір у компанії ST Microelectronics, а саме слід звернути увагу на МК серій STM32F1xx, STM32F3xx, STM32F4xx STM32L4xx.

Для коректної комунікації людини з пристроєм планується використання популярного дисплею LCD1602 (дві стрічки по 16 символів) та 5 кнопок. Щоб не використовувати мікросхеми розширення портів для коректної роботи з

периферією так коректною генерацією 3 компліментарних ШІМ-сигналів для формування фазних напруг пропонується використати МК STM32F407VET6.

Оскільки перший прототип даної системи керування не планується масштабувати серійно, для простоти виготовлення та пусконаладки використаємо готовий силовий модуль з інтегрованими драйверами верхнього та нижнього плеча PS21965-4S від компанії Mitsubishi Electric. Даний силовий модуль також має в собі вхід підсилювача помилки по загальному струму, захист від одночасного відкриття верхнього та нижнього ключа однієї фази, не потребує використання зовнішніх драйверів та може працювати як з 3,3-вольтовою так і з 5-вольтовою логікою. [16]

Для безпечного користування системою керування слід ізолювати силові кола від сигнальних, для цього будуть використанні імпульсні блоки живлення, котрі розв'язані гальванічно, а для передачі дискретних сигналів будуть використані широко застосовувані оптопари PC817 та мікросхеми цифрових ізоляторів ISO7720.

У якості енкодера для зчитування обертів двигуна буде використано кастомний вентилятор з отворами, який у парі з інфрачервоними світлодіодами та фотомодулями (інфрачервоний фотодіод з блоком автоматичного підсилення сигналу та компаратором) утворюватиме оптичний енкодер (рис. 3.8). [3, 17]

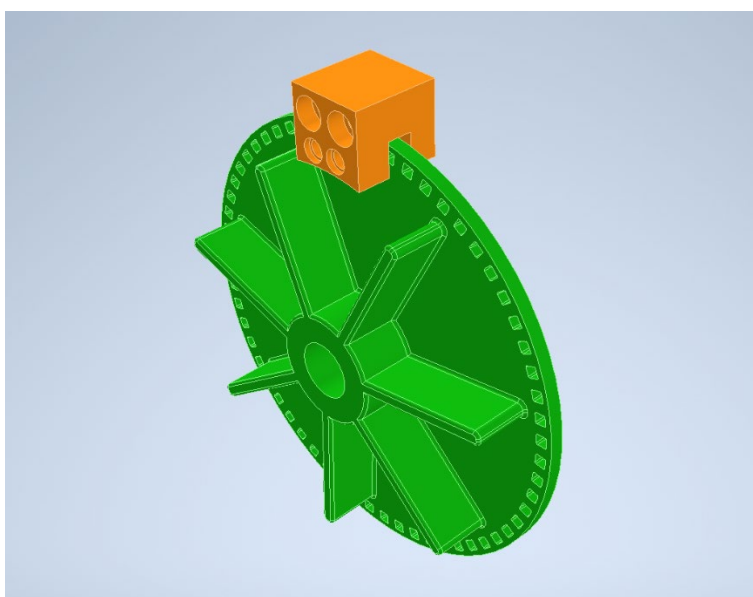


Рисунок 3.8 – Оптичний енкодер

Вибравши необхідне апаратне забезпечення можна приступати до проектування принципової електричної схеми.

### **3.8 Висновки**

У даному розділі було створено математичну модель системи ПЧ-АД зі зворотнім зв'язком. Проведено аналіз роботи системи зі зворотнім зв'язком та без нього.

Детально розглянуто алгоритм керування такою системою на базі прямого та зворотнього перетворень Кларка-Парка, що значно спрощує обрахунки у вузлі прийняття рішень (у даному випадку – МК).

Було вибрано оптимальне апаратне забезпечення, щоб забезпечити стійку та безвідмовну роботу системи.

## 4 РОЗРОБКА АПАРАТНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА ТЕСТУВАННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЗІ ЗВОРОТНІМ ЗВ'ЯЗКОМ

### 4.1 Розробка принципової електричної схеми

Будь-якій принциповій електричній схемі передують функціональна блок-схема, що дозволяє більш правильно спроектувати вузли так правильно організувати трасування друкованої плати. На рисунку 4.1 показано блок-схему системи, що описується у даній дипломній роботі.

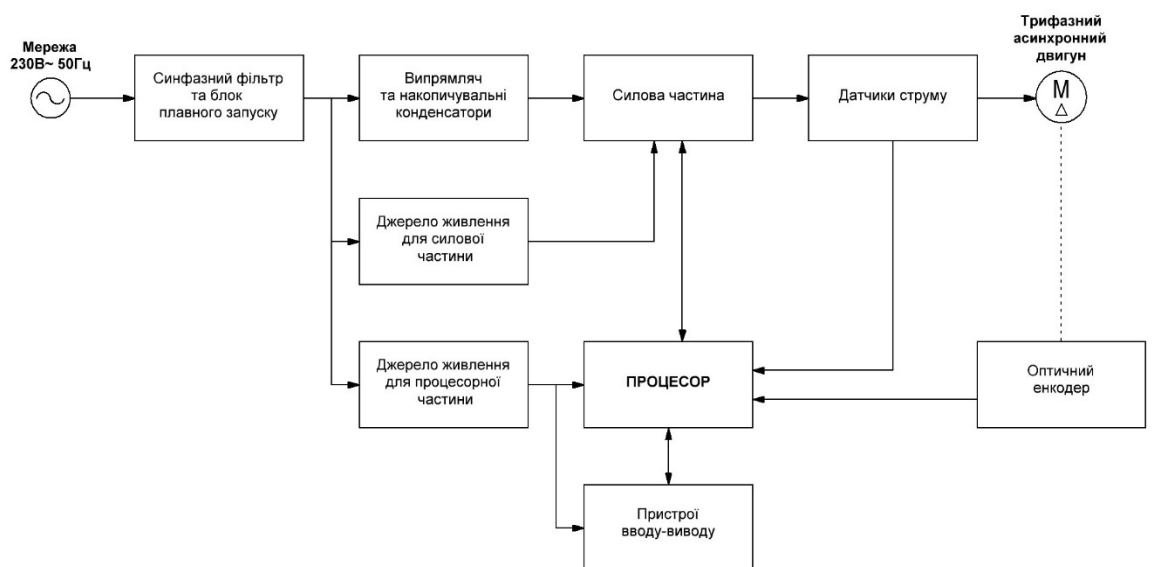


Рисунок 4.1 – Блок-схема системи керування асинхронним двигуном зі зворотнім зв'язком

З даного рисунку можна побачити, що система складається з:

1. Синфазного фільтру та блоку плавного запуску.
2. Випрямляча та накопичувальних конденсаторів.
3. Джерела живлення для силовій частини.
4. Джерела живлення для процесорної частини.
5. Силовій частини.
6. Процесора.
7. Пристроїв вводу-виводу (дисплей та кнопки).
8. Датчиків струму фаз електродвигуна.

## 9. Оптичного енкодера, що виконує роль таходатчика.

Для зручності проектування схеми, а надалі плати, будемо використовувати спеціальні САПР. Однією з таких є KiCad EDA. Це досить потужний інструмент проектування електроніки (має власний 3D-переглядач і редактор 3D-моделей).

Зробимо більш детальний огляд вузлів і рішень, котрі застосовуються в вище зазначених вузлах.

Будь-який який електронний пристрій, котрий живиться від силової мережі змінного струму напругою 230В з частотою 50Гц, та має у своєму складі імпульсні джерела живлення або інші імпульсні вузли, повинен містити у своєму складі мережевий фільтр та конденсатори (C1, C2, FL1 на рис. 4.2), котрі блокують проходження ВЧ-імпульсів від джерела завади у мережу.

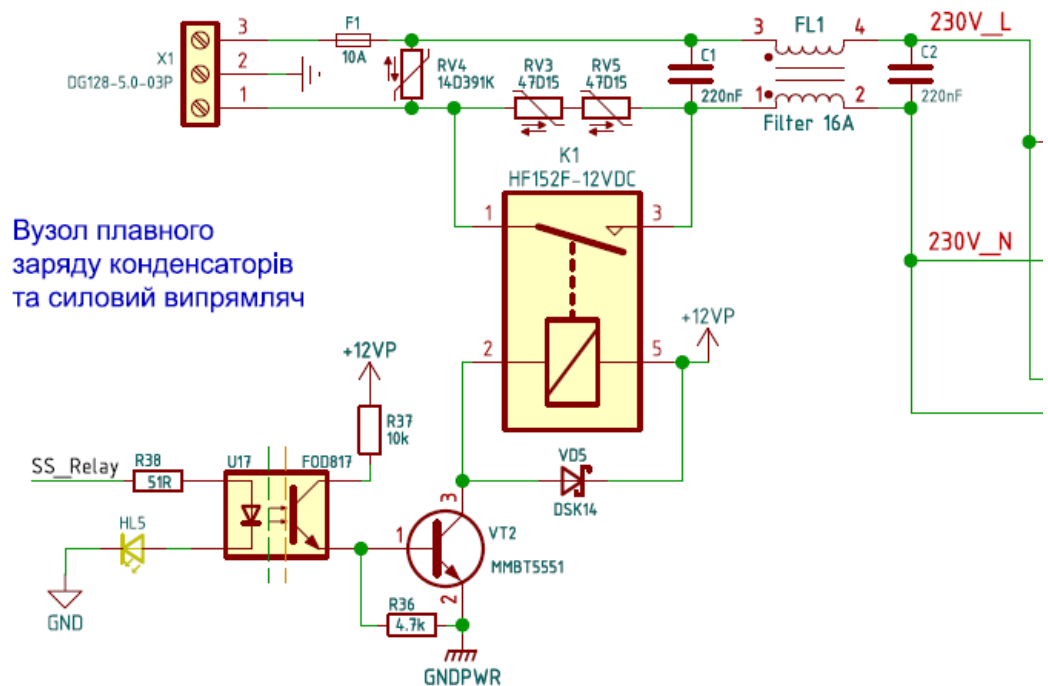


Рисунок 4.2 – Вузол вхідного фільтра та плавного запуску

Мережева напруга після клемника проходить через запобіжник F1 та варистор RV4, котрий слугує для захисту схеми від перенапруги. Далі через термистори RV3 та RV5 відбувається плавний заряд основних накопичувальних (згладжувальних) конденсаторів. Реле K1 використовується для шунтування термисторів після повного заряду накопичувальних конденсаторів. Це

унеможливає їх перегрів при роботі з двигуном номінальної потужності. Комутацією реле керує мікроконтролер (процесор) через оптопару U17.

Для згладжування напруги після діодного мосту використовується батарея накопичувальних конденсаторів C3 – C5. Резистори R14, R15 – R23 слугують для розрядки батареї накопичувальних конденсаторів (рис. 4.3)

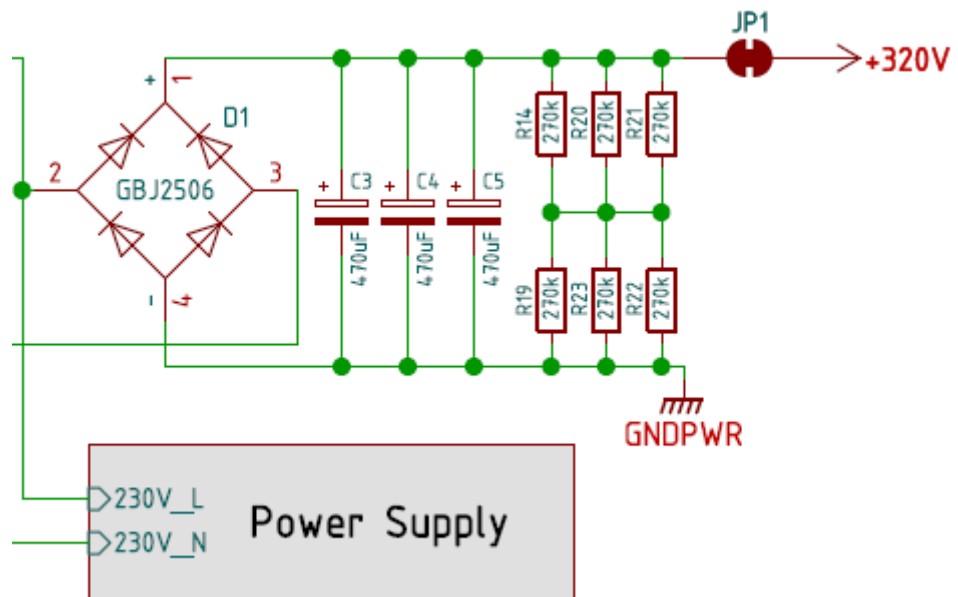


Рисунок 4.3 – Вузол діодного моста та накопичувальних конденсаторів

На рисунку видно блок (аркуш) з назвою «Power supply». Це вузол, де формуються напруги живлення для всіх кіл, за винятком силової шини +320В. Основою даного вузла є готові гальванічно ізольовані модулі-перетворювачі напруги (рис. 4.4), котрим перетворюють мережеві 230В~ 50Гц у постійні 12В (живлення силової частини) та 5В (живлення частини процесора)

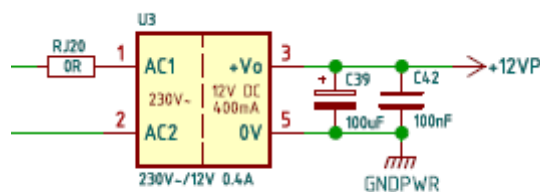


Рисунок 4.4 – Ізольований модуль-перетворювач

Оскільки мінімальна напруга живлення силового модуля трьохфазного перетворювача становить 14,5В, 12В котрі дає перетворювач U3 (рис. 4.4) є явно замало. Для усунення даної проблеми застосовується підвищуючий DC-DC перетворювач, котрий піднімає напругу до 15В. Схему даного перетворювача показано на рисунку 4.5. [18]

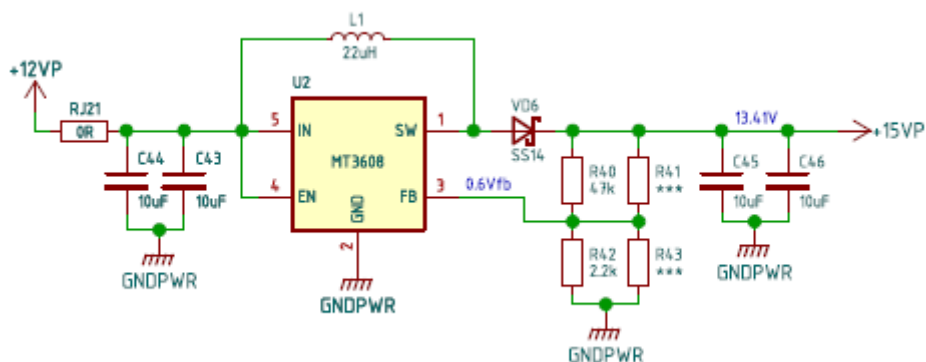


Рисунок 4.5 – Підвищуючий DC-DC перетворювач

Для живлення МК, аналогових кіл та периферії застосовуються лінійні стабілізатори 78L05 та AZ1117-3.3 на 5В та 3,3В відповідно. Їх використання дозволяє згладити пульсації напруги після імпульсного перетворювача, що додатково підвищує надійність схеми та точність вимірювань (рис. 4.6).

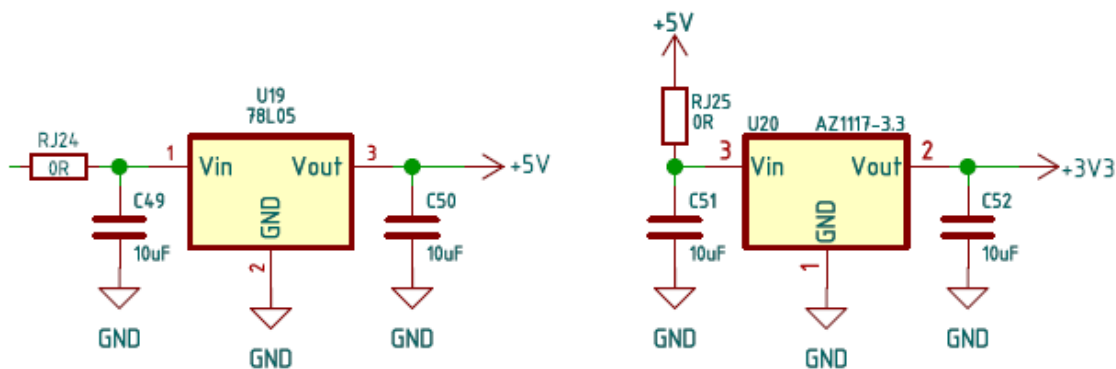


Рисунок 4.6 – Лінійні стабілізатори напруги

У якості джерела опорної напруги для процесора використовується мікросхема-керований стабілітрон TL431, що стабілізувати опорну напругу у вельми широкому діапазоні, у випадку даної схеми опорна напруга становить 3,00В. Схема включення даної мікросхеми показана на рисунку 4.7.



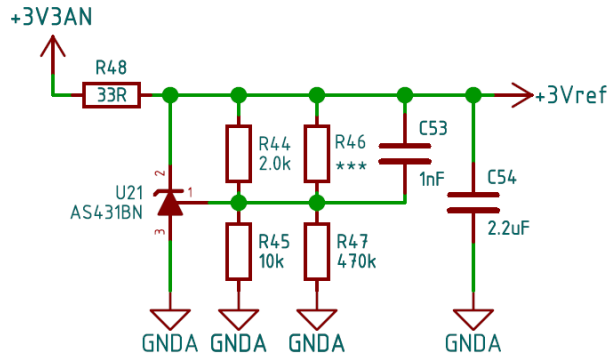


Рисунок 4.7 – Вузол формування опорної напруги

Далі слід розглянути включення силового трьохфазного модуля (рис. 4.8). Його схематехніка виконана стандартно, за винятком встановлених на входи ШІМ підтягуючих резисторів R39, R90 – R94; котрі слугують для запобігання хибного відкриття ключів при ініціалізації процесора (МК). Захисні діоди (сапресори) D2–D5 слугують для захисту від перевищення напруги bootstrap'них кіл.

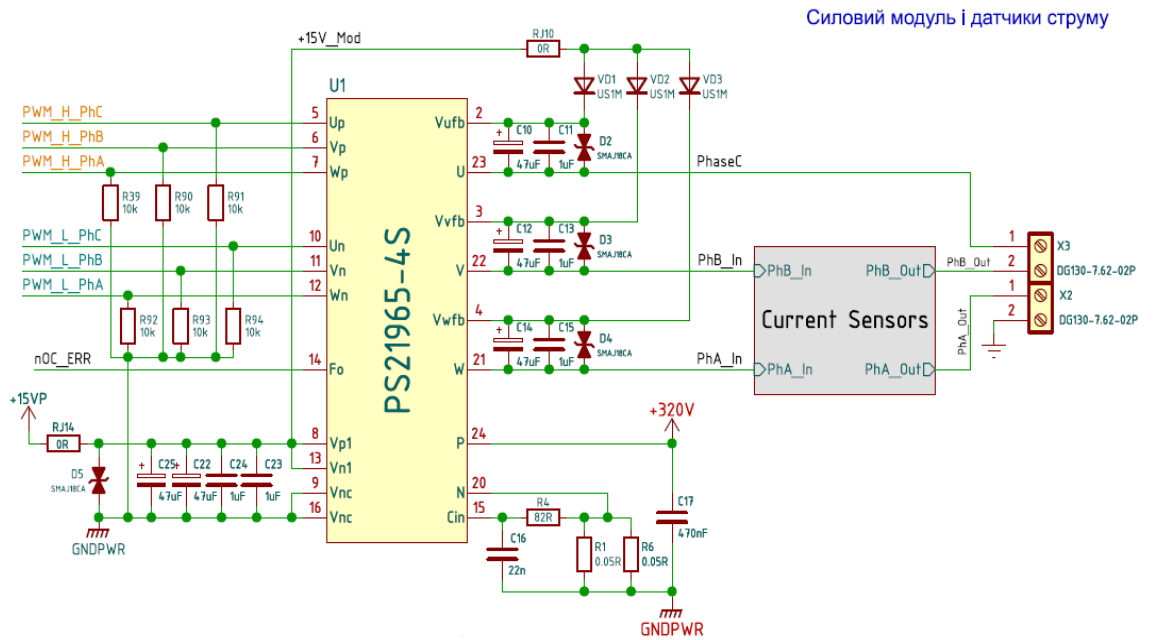


Рисунок 4.8 – Схема включення силового трьохфазного модуля

Для повноцінного векторного керування зі зворотнім зв'язком по обертах достатньо лише моніторити струми двох сусідніх фаз (AB, BC або CA). Тому для

зняття показників струму і щоб не порушувати барщоб не порушувати бар'єр ізоляції використовуються ізольовані датчики струму на ефекті хола ACS780xLR. Дані датчики (рис. 4.9) є двонаправленими: при відсутності струму напруга на їх виході рівна половині напруги живлення і зсувається відносно цієї точки до плюса живлення або до землі в залежності від напрямку струму, що протікає через даний датчик. Для коректної обробки сигналу з датчика за допомогою аналогово-цифрового перетворювача (АЦП) мікроконтролера використовується буфер на операційному підсилювачі TP6001-TR. Даний ОП має клас Rail-to-rail, що дозволяє повністю задіяти діапазон АЦП МК.

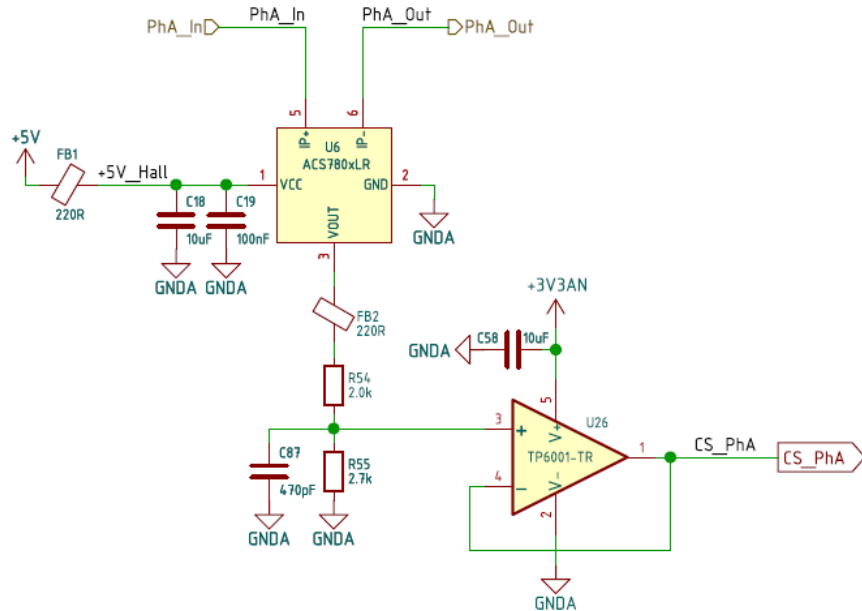


Рисунок 4.9 – Схема включення датчика струму

У разі «зависання» мікроконтролера схема повинна бути оснащена апаратним захистом, котрий запобігає виходу з ладу силових елементів. Для цього на стороні силової частини розміщено компаратор по напрузі силової шини U8. Вузол гальванічно ізольованого вимірювання напруги силової шини виконаний на операційному підсилювачі U9 та оптопарах U10, U11 (див. рис. 4.10). [19, 20]

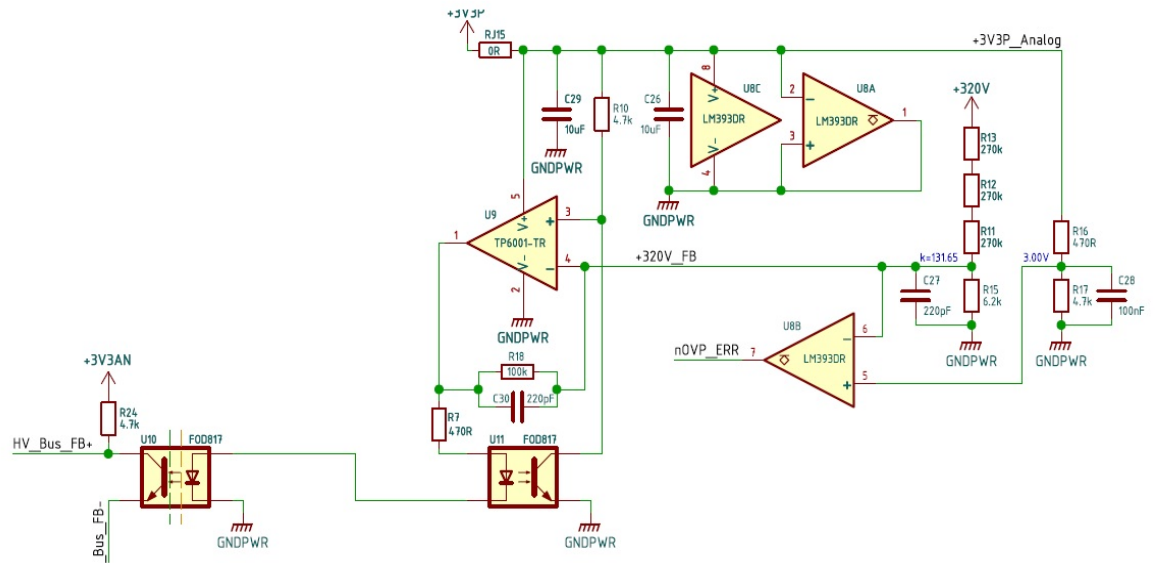


Рисунок 4.10 – Схема захисту від перенапруги та її вимірювання

Захист від завищеного струму через силові ключі реалізовано у самому силовому модулі, оскільки він має вбудований підсилювач та компаратор. Однак щоб захист спрацював однократно, а не періодично змінював свій статус, слід виходити захистів завести на тригер, котрий при спрацюванні зберігає свій стан, що спрощує подальшу обробку по чому відбулося спрацювання захисту. Найкраще для таких цілей підходить RS-тригер (рис. 4.11), оскільки при використанні деяких апаратних рішень (в конкретному випадку – конденсаторів C7 та C8) його можна встановити у вже «спрацьоване» положення, що блокувати генерацію ШІМ при ініціалізації МК та потребує примусового програмного скидання.

Для передачі сигналів від тригерів до МК через бар'єр ізоляції використовуються оптопари: дві стандартних PC817 (general purpose optocoupler) і одна високошвидкісна PS9117 (high speed optocoupler).

Через стандартні оптопари передеться сигнал-сповіщення про те, котрий саме тригер спрацював: відбулося перевантаження по струму або ж напруга на силовій шині зростає вище допустимої внаслідок різкого зниження обертів двигуна або скачка напруги в мережі.

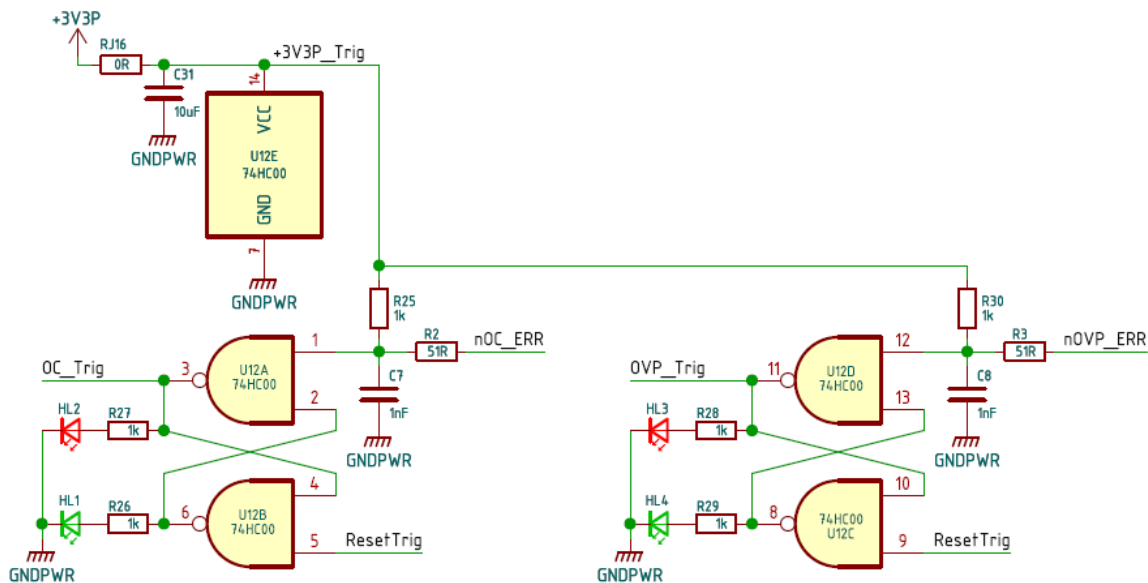


Рисунок 4.11 – RS-тригери

Вискошвидкісна оптопара (фактично цифровий ізолятор) слугує для передачі сигналу від будь-якого з тригерів на вхід апаратної зупинки таймера МК, що блокує генерацію сигналу уже на апаратному рівні, оскільки таймер є окремою апаратною одиницею на борту МК. Об'єднання виходів тригерів виконано через світлодіоди оптопар U24 – U25 (рис. 4.12). Оптопара U13 слугує для скидання тригера мікроконтролером. [19, 20]

Для передачі фазних ШІМ-сигналів, несуча частота котрих становить від 5 до 20 кГц, використовуються мікросхеми цифрових ізоляторів з ємінним зв'язком ISO7720. Схема їх включення показана на рисунку 4.13.

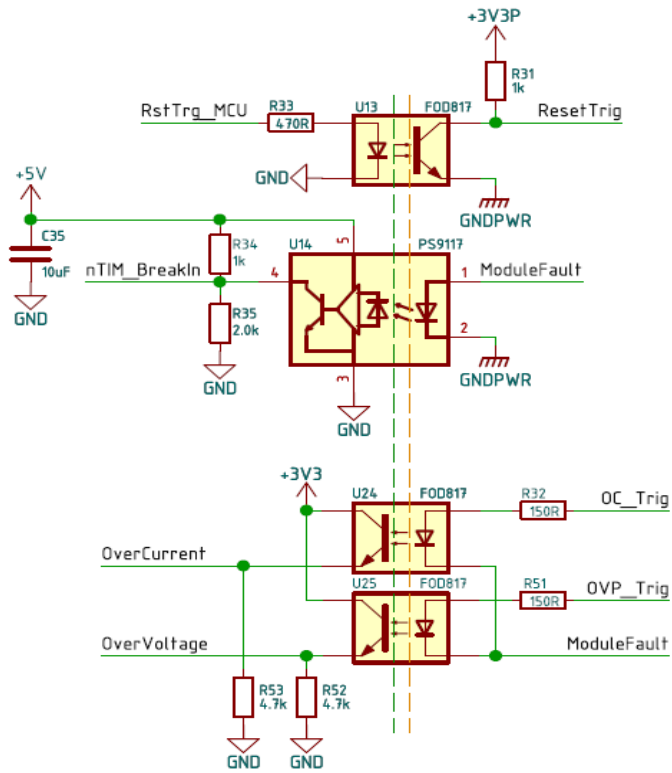


Рисунок 4.12 – Оптопари

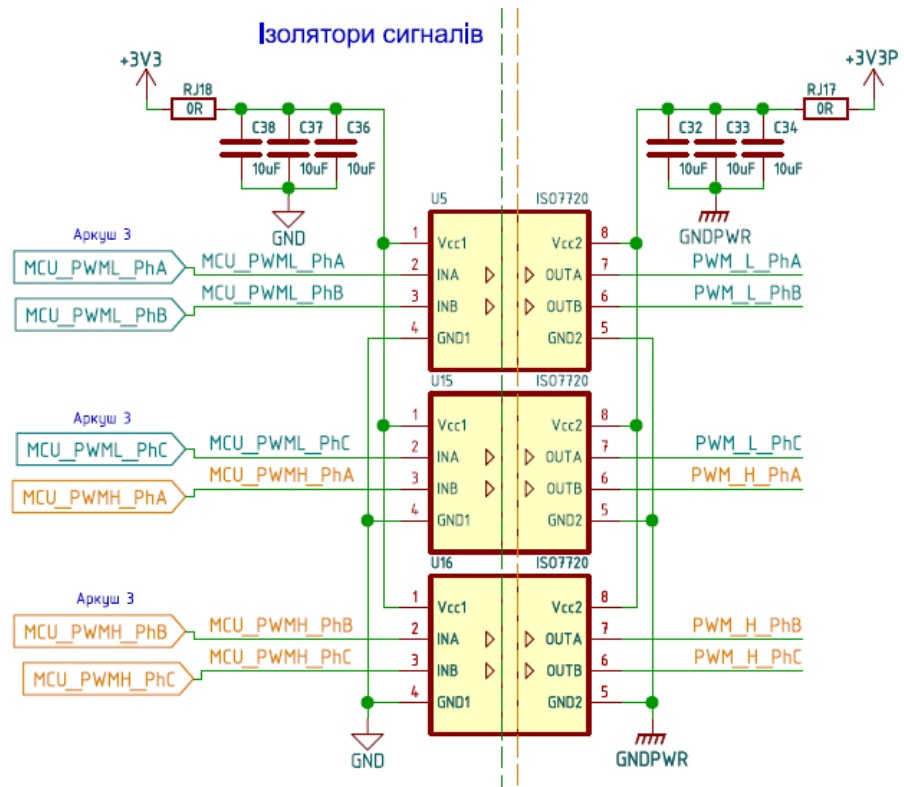


Рисунок 4.13 – Цифрові ізолятори

Схемотехніка вузла процесора (аркуш «MCU») не містить жодних нестандартних рішень, тому більш детально з нею можна ознайомитись у розділі «Графічна частина».

Для зовнішнього управління використовуються два аналогових входа з стандартом 0...10В. Змогу використувати зовнішній підстроювальний резистор номіналом 10кОм забезпечує внутрішнє джерело напруги у поєднанні з джерелом стабільного струму (рис. 4.14), таким чином роблячи вихід +10В стійким до довготривалих коротких замикань.

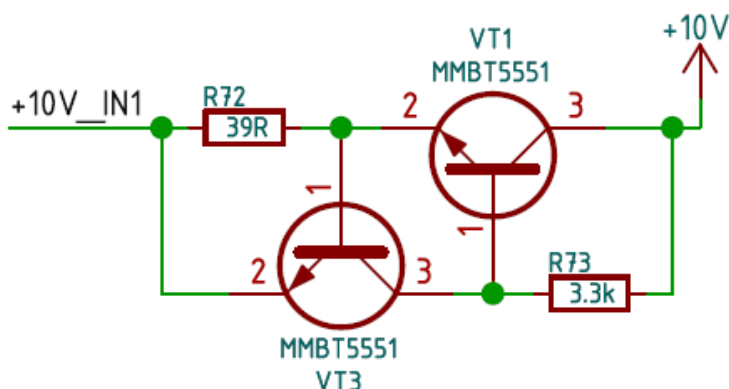


Рисунок 4.14 – Джерело стабільного струму

Для коректного вимірювання напруги на аналогах входах (0...10В) використовуються операційні rail-to-rail підсилювачі у вклученні диференційного підсилювача з коефіцієнтом підсилення 0,3. Це дозволяє масштабувати діапазон вхідної напруги (0...10В) до діапазону АЦП МК (0...3В). Схемотехніку даного вузла показано на рисунку 4.15.

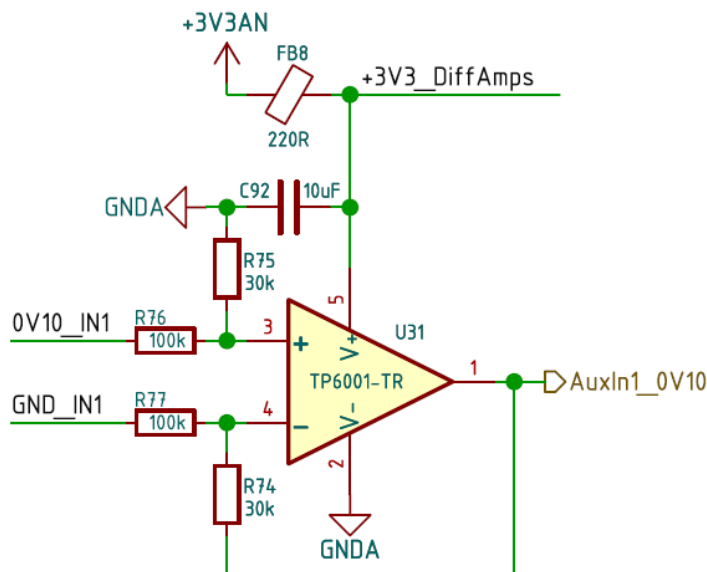


Рисунок 4.15 – Диференційний підсилювач сигналу аналогового входу

Для зупинки, запуску або реверсу застосовується дискретний гальванічно ізолюваний вхід. Реалізований за допомогою аналогічного до показаного на рис. 4.14 джерела стабільного струму та оптопар (рис. 4.16).

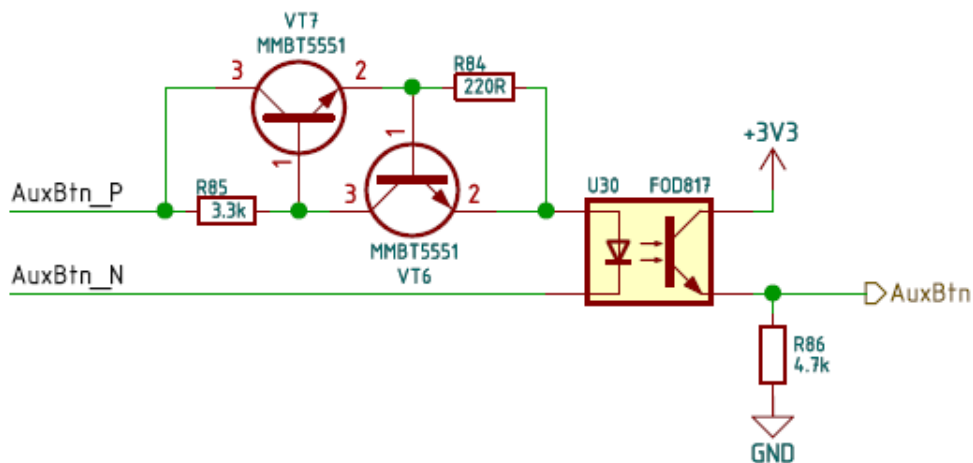


Рисунок 4.16 – Диференційний підсилювач сигналу аналогового входу

На цьому огляд схематичних рішень основної плати можна вважати завершеним. Схематика плати з екраном LCD1602 та кнопками не має у собі інноваційних рішень, тому більш детально з нею можна ознайомитись у розділі «Графічна частина», аркуш «НМІ» (Human-machine interface). Після завершення розробки принципової електричної схеми необхідно виконати розробку та трасування друкованої плати.

## 4.2 Розробка та трасування друкованої плати

Трасування будь-якої друкованої плати розпочинається у першу чергу з створення контурів плати, щоб її можна без проблем помістити у відповідний корпус, лише потім з розсташування критичних компонентів та трасування самих струмопровідних доріжок та полігонів.

Оскільки дана система керування асинхронним двигуном розробляється як лабораторний та стендовий зразок, то жорстких вимог для корпусування немає. Розсташування критичних компонентів слід виконувати від компонентів, що слугують «серцем» того чи іншого пристрою. В даному випадку ним є силовий трьохфазний модуль. Оскільки силові клемні колодки для підведення мережі та підключення електродвигуна мають бути з одного боку, розсташування силових компонентів виконувалось таким чином, щоб шлях струму проходив через накопичувальні ємності, блокуючий конденсатор і лише потім підводився до силового модуля, що можна бачити на рисунку 4.17.

Діодний міст та силовий модуль розташовані знизу плати для їх зручного кріплення до радіатора та звільнення місця зверху плати для інших компонентів. У даному випадку це дозволило розсташувати накопичувальні конденсатори та сап्रेसори boot-strap'них кіл, тим самим дозволивши більш компактно розсташувати решту компонентів силової частини. [21]

Решта елементів силової частини (аналогові кола та тригери) досить компактно розмістились у лівому верхньому куту. Трасування силової частини можна вважати завершеним.



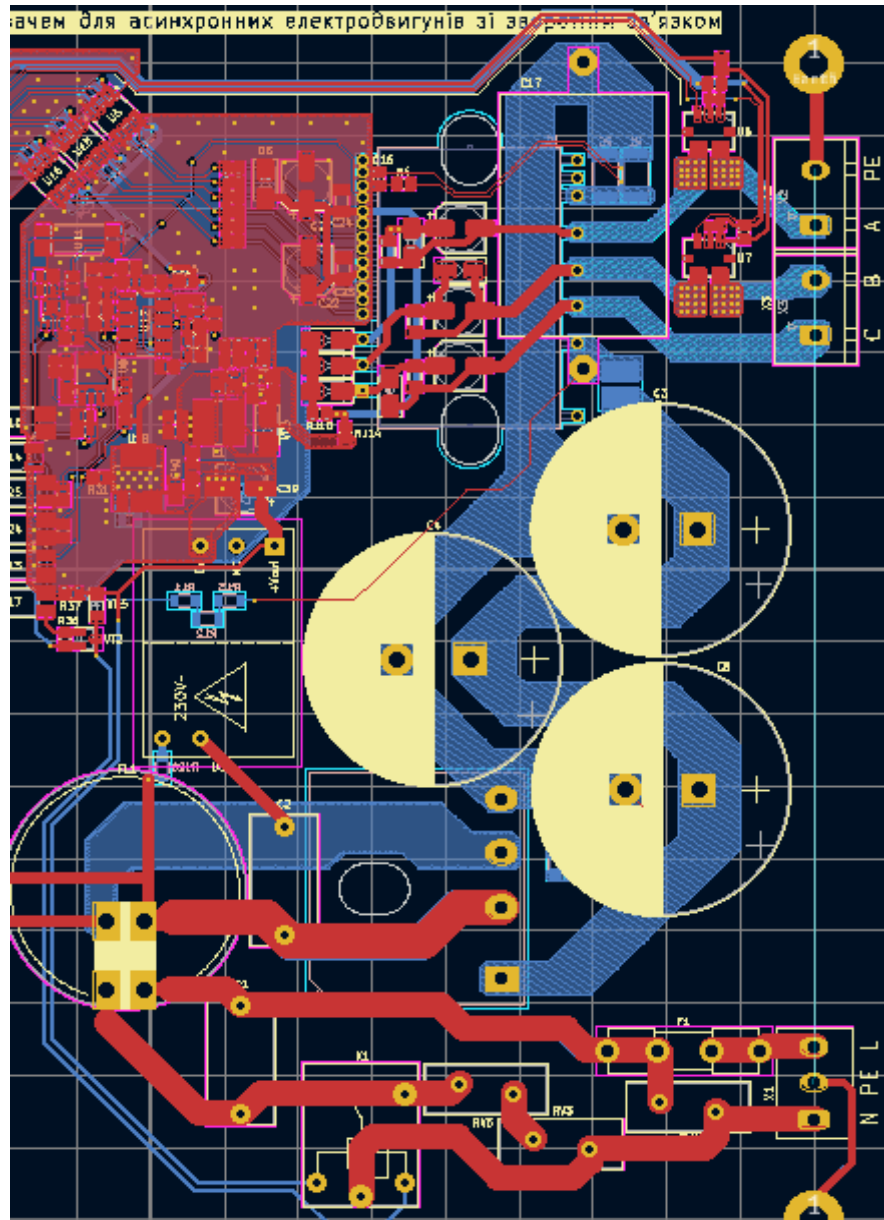


Рисунок 4.17 – Вигляд силової частини на друкованій платі

Процесор, усі аналогові кола та решту периферії слід розташувати максимально компактно, щоб мінімізувати паразитні індуктивності провідників. Також максимально близько до процесора слід розташувати роз'єм, котрий з'єднує основну плату з платою дисплея, та роз'єм для підключення оптичного енкодера (рис. 4.18).

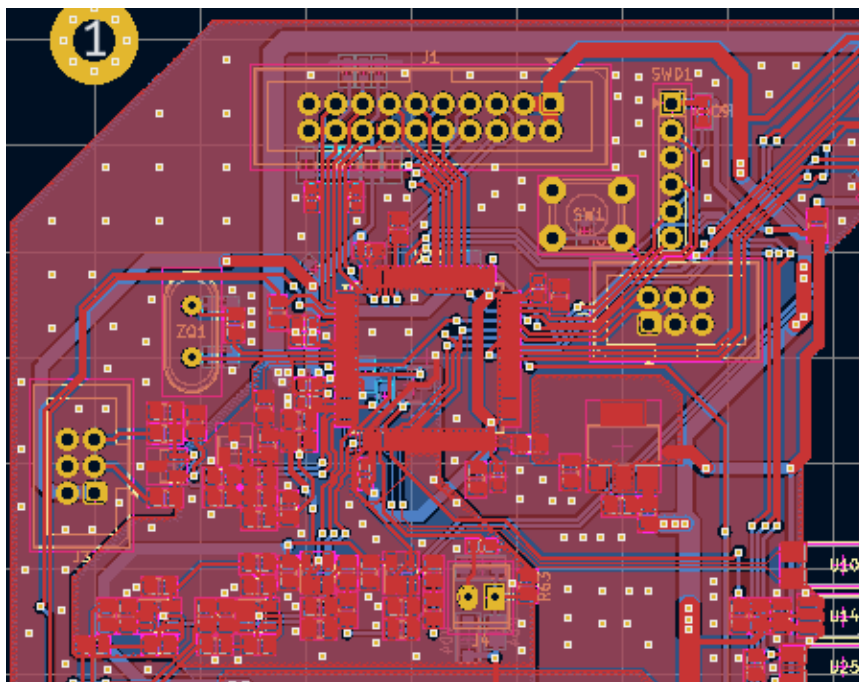


Рисунок 4.18 – Вид на низковольтну частину друкованої плати

Після завершення трасування друкована плата буде мати наступний вигляд у вбудованому 3D-редакторі середовища розробки (рис. 4.19а, рис. 4.19б):

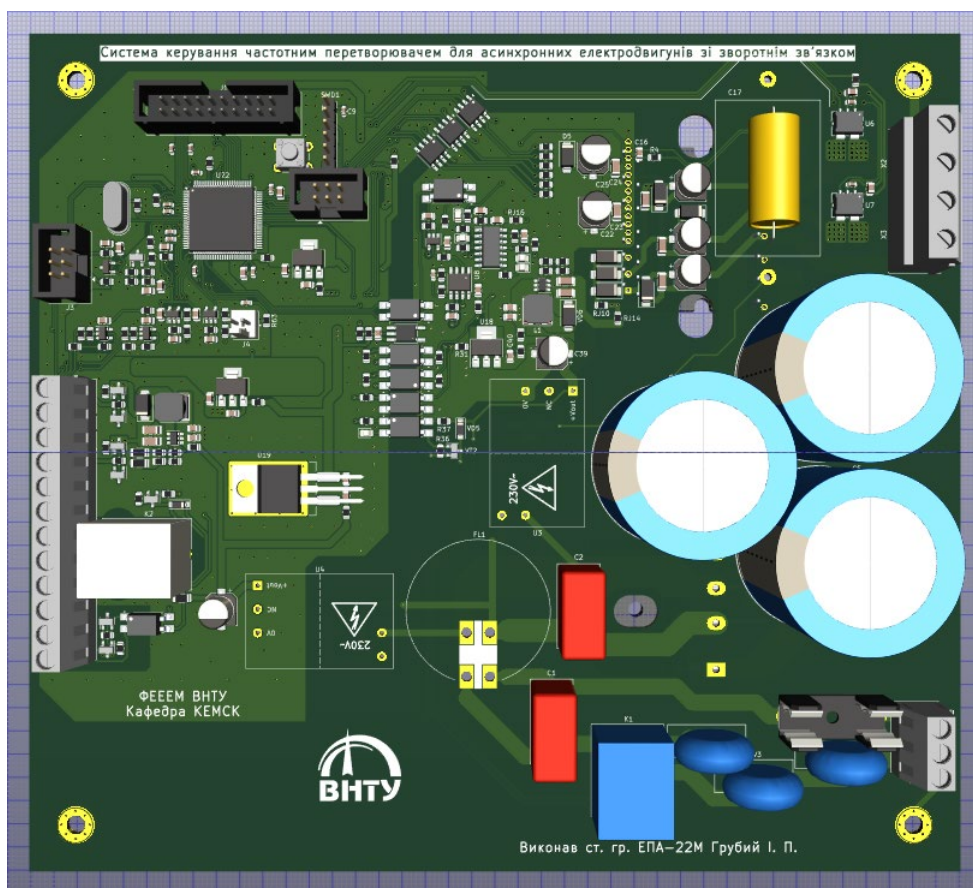


Рисунок 4.19а – Вид друкованої плати зверху

На нижній частині плати знаходяться елементи, котрі у фінальній версії буду кріпитися до суцільного радіатора, котрий слугуватиме основою конструкції. Для більш надійного кріплення у платі передбачено 4 отвори по кутам, що у сумі дає 7 точок кріплення (2 точки кріплення у силового модуля та 1 у діодного мосту).

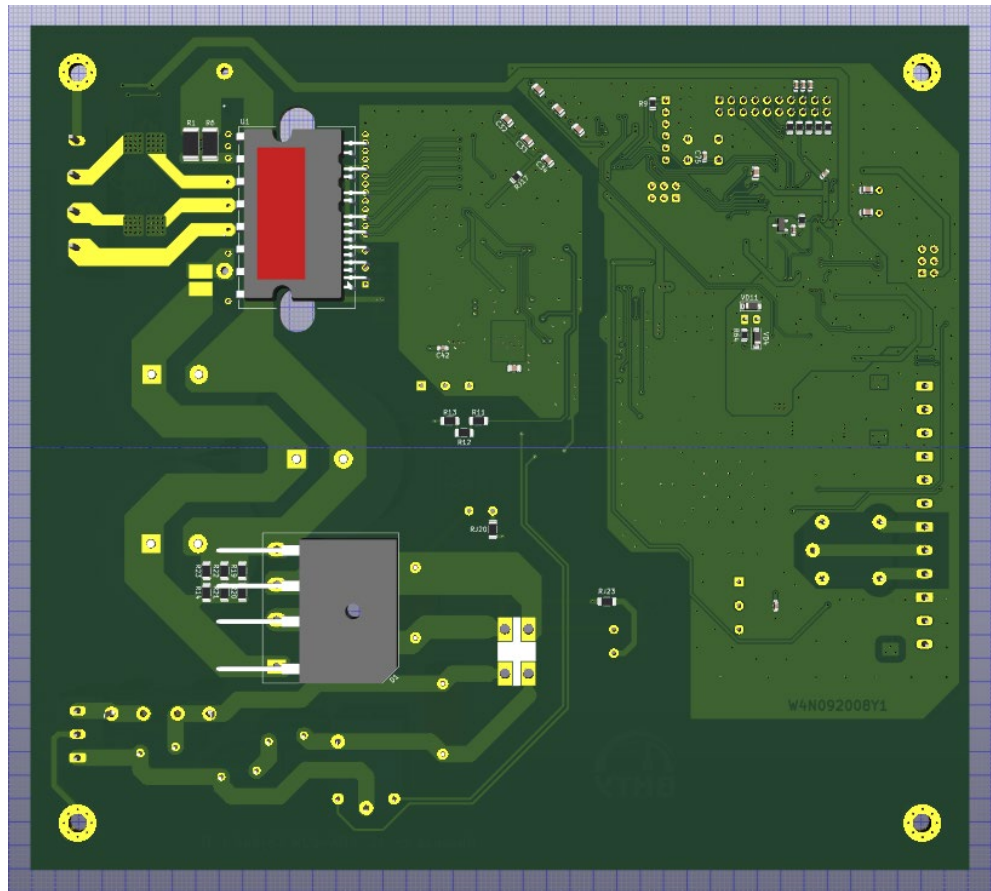


Рисунок 4.196 – Вигляд друкованої плати знизу

Після завершення етапу трасування друкованої плати та монтажу усіх компонентів на неї, а також повузлової перевірки функціональних блоків слід провести повноцінне тестування системи.

### 4.3 Тестування системи керування частотним перетворювачем для асинхронних електродвигунів зі зворотнім зв'язком

Готова до тестування силова плата показана на рисунку 4.20. Тестування будь-якого електронного пристрою (системи) розпочинається з перевірки функціональних вузлів на відсутність коротких замикань по шинах живлення та критичних доріжках. Критичними є, як правило, компоненти обв'язки МК та відносно коштовні або рідкісні компоненти.



Рисунок 4.20 – Силовa плата після збірки

Виконавши вище описану перевірку слід заживити вузли пристрою відповідними напругами від лабораторного блоку живлення у режимі обмеження струму, аби у разі виникнення непередбачуваних неполадок знизити до мінімуму вихід з ладу компонентів схеми. Якщо схема «завелась» і надмірне споживання

струму не спостерігається, слід витримати пристрій у такому стані щонайменше 10 – 15 хвилин, після чого за допомогою тепловізора, пірометра або пальця перевірити температурний режим компонентів.

Якщо температурний контроль пройдено, можна переходити до завантаження прошивки у мікроконтролер.

Перевірку плати пристроїв вводу-виводу (рис. 4.21) слід виконати вище описаним методом

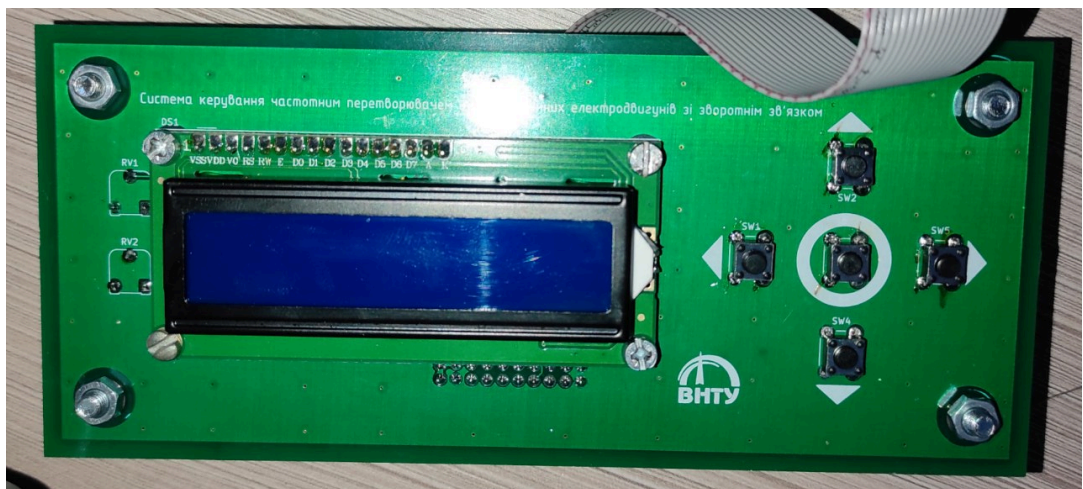


Рисунок 4.21 –Плата пристроїв вводу-виводу після збірки

Після фігнальної збірки готовий пристрій (рис. 4.22) можна підключати до системи асинхронний електродвигун та випробовувати систему у штатному режимі. При роботі двигуна він повинен підтримувати оберти аж до повної зупинки, різкі переривисті звуки, механічні удари на валу повинні бути відсутні. Це свідчить про правильність роботи контуру зворотнього зв'язку.

При подачі живлення 220В на основну (силову) плату при завершенні заряду основних накопичувальних ємностей спрацьовує шунтуюче реле. При активації зовнішнього дискретного входу активується режим аварійної зупинки і спрацьовує сигнальне реле. Продовжити роботу можна натиснувши центральну клавішу «ОК», при умові, що під час аварійної зупинки усі елементи залишились справними.



Рисунок 4.22 – Силова (внизу) та НМІ (вгорі) плати СКАД на базі ПЧ

Після завершення етапу тестування дана система може використовуватись як дослідний стенд для вивчення процесів у системах ПЧ-АД. Наявність декількох захистів, у тому числі від перенапруги шини постійного струму забезпечує стійку роботу та здатність переносити короточасні перевантажені, що дозволяє використовувати дану систему для керування сервоприводами.

#### **4.4 Висновки**

У даному розділі було виконано розробку принципової електричної схеми, зроблено детальний огляд функціональних вузлів з описом їх роботи.

Виконано розробку та трасування друкованої плати з урахуваннями усіх особливостей конструкції та розміщення компонентів вузлів, критичних до трасування.

Після монтажу усіх елементів на друковані плати було виконано тестування роботи системи з електродвигунами потужністю 60Вт з обертами 1750об/хв та 180Вт 2750об/хв.

## 5 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗРАХУНОК

Двигун постійного струму (ДПС) не підходить, для виконання поставлених завдань. Пов'язано це з низькою здатністю до регулювання, та високим ціновим показником.

Якщо говорити про асинхронні двигуни змінного струму (АД), то ним можна керувати за допомогою релейно-контакторної схеми (РКС), за допомогою встановлення фазного ротора (АД-ФР), за допомогою тиристорних перетворювачів (ТРН-АД) та за допомогою перетворювача частоти (ПЧ-АД). Розглянемо усі ці методи керування.

Система керування РКС-АД є дешевою та надійною в плані стабільності роботи. Основною проблемою такої системи є складні комутаційні процеси під час регулювання, котрі є технічно недоцільними для поставленої задачі.

Встановлення АД-ФР потребує додаткових затрат на двигун тому, що, як правило, двигуни з фазним ротором коштують більше ніж звичайні асинхронні двигуни. Також, керування за допомогою ФР, передбачає тільки кілька ступенів швидкості двигуна, що є теж недоцільним з точки зору технічних вимог.

Тиристорні перетворювачі є досить актуальними, через низьку вартість керування ніж перетворювачі частоти. Але вони мають гірші технічні показники ніж ПЧ-АД, що не робить конкурентом в цьому плані, але не відмінняє того факту, що перетворювач частоти є кращим варіантом.

ПЧ-АД — це система керування, котра показала та довела свої можливості в плані технічних вимог. Здатність до контролю швидкості в усьому діапазоні швидкості, високий коефіцієнт корисної дії (ККД) та малі затрати по енергетичним показникам робить її найкращою в технічному плані. За ціновим показником перетворювач частоти є дорожчим ніж інші системи керування. Однак за рахунок низьких витрат на обслуговування та, як було вже сказано, високого ККД і низьких затрат енергетичних показників, він є кращим за інші системи керування.

Для прикладу розрахуємо техніко-економічні показники, саме для системи ПЧ-АД.



Загальні витрати визначаються за формулою:

$$З = E_n \cdot K + C, \quad (5.1)$$

де  $E_n$  - нормативний коефіцієнт економічної ефективності (приймається  $E_n = 0,17$  1/рік для усіх галузей промисловості);

$K$  – капітальні затрати, грн;

$C$  – загальні відрахування, грн/рік.

В свою чергу, капітальні затрати визначаються як сума двигуна та системи керування:

$$K = Д + СК, \quad (5.2)$$

$$K = 1800 + 8000 = 9800 \text{ (грн)}.$$

Загальні відрахування — це сума усіх відрахувань, які складаються з наступних частин:

$$C = C_A + C_p + C_D + C_o, \quad (5.3)$$

де  $C_A$  - відрахування на амортизацію, грн/рік;

$C_p$  - відрахування на ремонт, грн/рік;

$C_D$  - додаткові відрахування, грн/рік;

$C_o$  - відрахування на обслуговування, грн/рік.

Відрахування на амортизацію визначаються як частка від капітальних затрат. За часту береться в середньому 10% від капітальних витрат:

$$C_A = 0,1 \cdot K, \quad (5.4)$$

$$C_A = 0,1 \cdot 9800 = 980 \text{ (грн/рік)}.$$

Ремонт та відрахування на цю справу приймають також, як частку від капітальних затрат. Зазвичай, беруть 2% від капітальних затрат для відрахувань на ремонт:

$$C_p = 0,02 \cdot K, \quad (5.5)$$

$$C_p = 0,02 \cdot 9800 = 196 \text{ (грн/рік)}.$$

Додаткові відрахування включають в себе витрати на електроенергію та перехідні режими роботи двигуна:

$$C_D = C_{D1} + C_{D2}, \quad (5.6)$$

де  $C_{D1}$  - витрати електроенергії на двигун за рік:

$$C_{D1} = \Delta W_D \cdot c, \quad (5.7)$$

$\Delta W_D$  - кількість втраченої електроенергії в двигуні за рік;

$c$  – вартість електроенергії для промисловості, одного кіловату потужності за годину ( $c = 2,64$  грн/кВт · год).

$$\Delta W_D = (\Delta P_{\text{ном}} + \Delta P_{\text{пер}}) \cdot k_z \cdot \Phi, \quad (5.8)$$

де  $\Delta P_{\text{ном}}$  - втрати потужності двигуна при номінальному режимі роботи двигуна, кВт;

$\Delta P_{\text{пер}}$  - втрати потужності двигуна при перехідних режимах роботи двигуна, кВт;

$k_z$  - коефіцієнт завантаження по потужності (приймається рівним 0.8);

$\Phi$  – дійсний фонд часу роботи системи електропривода за рік.

$$\Delta P_{\text{ном}} = P_{\text{ном}} \cdot \frac{1 - \eta_{\text{ном}}}{\eta_{\text{ном}}}, \quad (5.9)$$

де  $P_{\text{ном}}$  - номінальна потужність вибраного двигуна ( $P_{\text{ном}} = 0,18$  кВт);

$\eta_{\text{ном}}$  - номінальний коефіцієнт корисної дії, при  $P_2 = P_{\text{ном}} = 0,18$  кВт ( $\eta_{\text{ном}} = 0,66$ )

$$\Delta P_{\text{ном}} = 0,18 \cdot \frac{1 - 0,66}{0,66} = 0,0927 \text{ (кВт)}.$$

Витрати двигуна на перехідні процеси приймають за стандартами, як 10% від витрат при номінальному режимі роботи двигуна:

$$\Delta P_{\text{пер}} = 0,1 \cdot \Delta P_{\text{ном}}, \quad (5.10)$$

$$\Delta P_{\text{пер}} = 0,1 \cdot 0,0927 = 0,00927 \text{ (кВт)}.$$

Дійсний фонд часу роботи системи електропривода, визначається за наступною формулою:

$$\Phi = \frac{ТВ\%}{100\%} \cdot Z_{рд} \cdot Z_{рз} \cdot t_{рз}, \quad (5.11)$$

де ТВ% - тривалість ввімкнення електродвигуна (береться за стандартом 40%);

$Z_{рд}$  - кількість робочих днів за рік ( $Z_{рд} = 250$ );

$Z_{рз}$  - кількість робочих змін ( $Z_{рз} = 2$ );

$t_{рз}$  - тривалість робочої зміни ( $t_{рз} = 8$  год).

$$\Phi = \frac{40}{100\%} \cdot 250 \cdot 2 \cdot 8 = 1600 (\text{год}).$$

$$\Delta W_{д} = (0,0927 + 0,00927) \cdot 0,8 \cdot 1600 = 130,56 \text{ (кВт)}.$$

$$C_{д1} = 130,56 \cdot 2,64 = 344,67 \text{ (грн/рік)}.$$

$C_{д2}$  - втрати в системі керування:

$$C_{д2} = \Delta W_{СК} \cdot c, \quad (5.12)$$

де  $\Delta W_{СК}$  - кількість втраченої електроенергії в системі керування за рік:

$$\Delta W_{СК} = \Delta P_{СК} \cdot k_3 \cdot \Phi, \quad (5.13)$$

де  $\Delta P_{СК}$  - втрати потужності в перетворювачі, кВт:

$$\Delta P_{СК} = P_{СК} \cdot \frac{1 - \eta_{СК}}{\eta_{СК}}, \quad (5.14)$$

де  $P_{СК}$  - потужність перетворювача (згідно з розрахунками максимальна потужність перетворювача частоти  $P_{СК} = 2,2$  кВт);

$\eta_{СК}$  - номінальний ККД, перетворювача ( $\eta_{СК} = 0,95$ ).

$$\Delta P_{СК} = 2,2 \cdot \frac{1 - 0,95}{0,95} = 0,115 \text{ (кВт)}.$$

$$\Delta W_{СК} = 0,115 \cdot 0,8 \cdot 1600 = 148,21 \text{ (кВт)}.$$

$$C_{д2} = 148,21 \cdot 2,64 = 391,27 \text{ (грн/рік)}.$$

$$C_D = 344,67 + 391,27 = 735,95 \text{ (грн/рік)}.$$

Обслуговування є важливою частиною в циклі роботи кожного електричного апарату. Відрахування на обслуговування зазвичай виділяють з суми відрахувань на амортизацію, ремонт та додаткових відрахувань в вигляді 5% від суми:

$$C_o = 0,05 \cdot (C_A + C_D + C_p), \quad (5.15)$$

$$C_o = 0,05 \cdot (980 + 735,95 + 196) = 95,59 \text{ (грн/рік)}.$$

З вище вказаного можна підрахувати загальні відрахування за формулою (5.3):

$$C = 980 + 735,95 + 196 + 95,59 = 2007,5 \text{ (грн/рік)}.$$

Тоді, відповідно до формули (5.1), загальні витрати будуть становити:

$$Z = 0,17 \cdot 9800 + 2007,5 = 3673,5 \text{ (грн/рік)}.$$

Результати усіх розрахунків для усіх систем електроприводів наведені в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – результати техніко-економічного розрахунку, усіх двигунів та систем керування для них

Показник	Система електричного приводу				
	РКС-ДПС	АД-ФР	ТП-Д	ТРН-АД	ПЧ-АД
Вартість двигуна, Д, грн.	4500	3600	4500	1800	1800
Вартість системи керування, СК, грн.	4000	4800	7200	7200	8000
Капітальні затрати, К, грн.	8500	8400	11700	9000	9800
Річні капітальні затрати, $K_{річн}$ , грн/рік	1445	1428	1989	1530	1666
Амортизаційні відрахування, $C_A$ , грн/рік	850	840	1170	900	980
Відрахування на ремонт, $C_p$ , грн/рік	170	168	234	180	196
Додаткові відрахування, $C_D$ , грн/рік	1079,9	1079,9	1656,6	5300,8	735,9
Відрахування на обслуговування, $C_o$ , грн/рік	104,99	104,39	153,03	319,04	95,59

Продовження таблиці 5.1

Загальні відрахування, С, грн/рік	2204,9	2192,3	3213,6	6699,8	2007,5
Загальні витрати, З, грн/рік	3649,93	3620,33	5202,6	8229,8	3673,5

### 5.1 Висновок

В ході теоретичного обґрунтування та техніко-економічного розрахунку можна з впевненістю сказати, що система ПЧ-АД є найкращим варіантом серед усіх запропонованих та наявних систем керування асинхронним електродвигуном.

## **6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ**

У цьому розділі розглянуто питання охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях, що стосуються робіт з розробки системи керування частотним перетворювачем для асинхронних електродвигунів зі зворотним зв'язком. На оперативно-ремонтний електротехнічний персонал, що здійснює модернізацію та експлуатацію асинхронних електродвигунів, впливають такі небезпечні та шкідливі виробничі фактори [22, 23].

Фізичні фактори: мікроклімат (температура, вологість, швидкість руху повітря, інфрачервоне випромінювання); виробничий шум, ультразвук, інфразвук; вібрація (локальна, загальна); освітлення: природне (недостатність), штучне (недостатня освітленість, прямий і відбитий сліпучий відблиск тощо); іонізація повітря.

Хімічні фактори: речовини хімічного походження, аерозолі фіброгенної дії (пил).

Фактори трудового процесу: важкість (тяжкість) праці; напруженість праці. Важкість праці характеризується рівнем загальних енергозатрат організму або фізичним динамічним навантаженням, масою вантажу, що піднімається і переміщується, загальною кількістю стереотипних робочих рухів, величиною статичного навантаження, робочою позою, переміщенням у просторі. Напруженість праці характеризують: інтелектуальні, сенсорні, емоційні навантаження, ступінь монотонності навантажень, режим роботи.

### **6.1 Технічні рішення з безпечної експлуатації об'єкта**

#### **6.1.1 Технічні рішення з безпечної організації робочих місць**

Під час модернізації та обслуговування обладнання електромонтажники повинні дотримуватися правил охорони праці [24], за якими перед початком монтажу електрообладнання потрібно змонтувати постійні настили з огорожами відповідно до ГОСТ 12.4.059, ГОСТ 23407, ГОСТ 24258. За правилами з охорони праці під час виконання робіт на висоті потрібно перебувати на раніше встановлених і надійно закріплених конструкціях чи засобах підмоцнування.

Забороняється перебування людей на елементах конструкцій і обладнання під час їх піднімання та переміщення.

Навісні монтажні площадки, сходи та інші пристосування, що необхідні для виконання робіт на висоті, потрібно встановлювати на конструкціях, які монтуються до їх піднімання. Для переходу монтажників з однієї конструкції на іншу необхідно застосовувати драбини, перехідні містки і трапи, що мають огорожі. Забороняється перехід монтажників по встановлених конструкціях та їх елементах (фермах, ригелях тощо), на яких неможливо забезпечити необхідну ширину проходу при встановлених огорожах, без застосування спеціальних запобіжних пристроїв (натягнутого уздовж ферми чи ригеля каната для закріплення карабіна запобіжного поясу). Місця і способи кріплення каната повинні бути зазначені в ПВР. Спосіб стропування елементів конструкцій та обладнання повинен забезпечувати їх подавання до місця розміщення в положенні, близькому до проектного.

До робіт на висоті і верхолазних робіт допускаються навчені особи, стан здоров'я яких має відповідати медичним вимогам, встановленим для даних видів робіт («Положення про медичний огляд працівників певних категорій»). Працівники, які виконують верхолазні роботи, повинні мати відповідний запис в посвідченні про перевірку знань. До самостійних верхолазних робіт допускаються особи віком не молодші 18 років, які мають стаж верхолазних робіт не менше одного року і кваліфікаційний розряд не нижче четвертого. Робітники, які вперше допускаються до верхолазних робіт, протягом одного року повинні працювати під безпосереднім наглядом досвідчених спеціалістів, призначених наказом керівника підприємства. Працівники мають бути навчені безпеці праці до початку виконання верхолазних робіт.

Драбини, риштування, помости, кігті, лази та інші пристосування, що застосовуються для виконання робіт на висоті і верхолазних робіт, повинні бути сертифіковані, а також відповідати вимогам «Правил безпеки під час роботи з інструментом і пристроями».



Під час виконання робіт, коли немає можливості закріпити строп запобіжного поясу за конструкцію або опору, слід користуватися страхувальним канатом, що є відповідним до вимог ГОСТ 12.4.107. В цьому разі строп запобіжного паска заводиться за конструкцію, деталь опори тощо. Виконувати цю роботу повинні дві особи, друга особа в міру необхідності попускає чи натягує канат.

Під час роботи на конструкціях, під якими розташовані струмопровідні частини, що перебувають під напругою, ремонтні пристосування і інструмент прив'язуються для запобігання їх падінню. Застосовувати в цих випадках монтерські запобіжні паски зі стропами з металевого ланцюга забороняється.

Подавати деталі на конструкції чи устаткування слід за допомогою «нескінченного» канату. Працівник, який стоїть внизу, повинен утримувати канат для запобігання його розгойдуванню і наближенню до струмопровідних частин. Працівники, які виконують роботи на висоті або верхолазні роботи, повинні бути в спецодязі, що не заважає рухам. Особистий інструмент слід зберігати в сумці. Працівники, що здійснюють нагляд за членами бригади, які виконують верхолазні роботи або роботи на висоті, можуть розташовуватися на землі. Обслуговування освітлювальних пристроїв, розташованих на стелі машинних залів і цехів підприємств, з візків мостового крану слід провадити не менш ніж двома працівниками, один з яких з групою III. Під час виконання робіт з використанням крану ремонтникам має бути виданий наряд-допуск.

Ручний електрифікований інструмент повинен відповідати вимогам ДСТУ ІЕС 60745-1:2010 «Інструмент ручний електромеханічний. Безпека. Частина 1. Загальні вимоги».

Номінальна напруга електроінструменту класів I та II не повинна перевищувати: 220 В – для електроінструменту постійного струму; 380 В – для електроінструменту змінного струму.

Електроінструмент, що живиться від електричної мережі, повинен бути оснащений незнімним гнучким кабелем (шнуром) із штепсельною вилкою.

Незнімний гнучкий кабель електроінструменту класу I повинен мати жилу, що з'єднує заземлювальний затискач електроінструменту із заземлювальним контактом штепсельної вилки.

Кабель у місці введення в електроінструмент класу I необхідно захищати від стирань та перегинань еластичною трубкою з ізоляційного матеріалу. Трубку необхідно закріплювати в корпусних деталях електроінструменту таким чином, щоб вона виступала за їх межі на довжину не менше п'яти діаметрів кабелю. Трубка на кабелі не повинна закріплюватись поза електроінструментом.

Для приєднання однофазного електроінструменту шланговий кабель повинен мати три жили: дві – для живлення, одна – для заземлювання. Для приєднання трифазного електроінструменту необхідно застосовувати чотирижильний кабель, одна з жил якого призначена для заземлювання. Це стосується тільки електроінструменту із заземленим корпусом. Доступні для доторкання металеві деталі електроінструменту класу I, які можуть потрапити під напругу в разі пошкодження ізоляції, повинні бути з'єднані із заземлювальним затискачем. Електроінструменти класів II і III не підлягають заземленню. Заземлення корпусу електроінструменту необхідно виконувати за допомогою спеціальної жили кабелю живлення, яка не повинна одночасно бути провідником робочого струму. Не дозволяється використовувати для заземлення корпусу електроінструменту нульовий робочий провід.

Штепсельна вилка електроінструменту повинна мати відповідну кількість робочих і один заземлювальний контакт. Конструкція вилки повинна забезпечувати випереджувальне замикання заземлювального контакту при ввімкненні та більш запізніле розмикання при вимкненні. Конструкція штепсельних вилок електроінструменту класу III повинна передбачати унеможливлення зчленування їх з розетками на напругу вище 42 В.

Переносні понижувальні трансформатори, роздільні трансформатори та перетворювачі повинні бути оснащені на стороні вищої напруги кабелем зі штепсельною вилкою для приєднання до електричної мережі. Довжина кабелю не повинна перевищувати 2 м, а його кінці необхідно закріплювати до затискачів

трансформатора за допомогою паяння (зварювання) або болтового з'єднання. На стороні нижчої напруги трансформатора повинні бути передбачені гнізда під штепсельну вилку.

### **6.1.2 Електробезпека**

Живлення силового обладнання для монтажу та системи освітлення здійснюється від п/ст 10/0,4 кВ кабельними лініями, що прокладені в траншеях. Для живлення використовується трифазна чотирьохпровідна мережа із заземленою нейтраллю напругою 380/220 В. Відповідно з ГОСТ ПБЕ [25, 26] умови праці за ступенем небезпеки ураження працівників електричним струмом є умовами з підвищеною небезпекою, тому що підлога у приміщеннях, що будуються, є струмопровідною.

Загальні вимоги безпеки до виробничого обладнання встановлені згідно з ГОСТ 12.2.003, в якому визначені вимоги до основних елементів конструкції, органів управління і засобів захисту, які входять в конструкцію виробничого обладнання любого виду і призначення. Електропривід насосів, вентиляторів, іншого обладнання повинний бути виконаний відповідно до Правил устрою електричних установок.

Обов'язкова установка захисного заземлення та захисного відключення. При роботі з електроустановками використовуються основні і додаткові електрозахисні засоби. До основних відносяться: ізолюючі штанги; ізолюючі і струмовимірювальні кліщі; слюсарно-монтажні інструменти з ізолюючим руків'ям. До додаткових відносяться: діелектричні рукавички; переносне заземлення; огорожуючі пристосування; плакати та знаки безпеки.

## **6.2 Технічні рішення з гігієни праці і виробничої санітарії**

### **6.2.1 Мікроклімат**

Основними нормативними документами, що регламентують параметри мікроклімату виробничих приміщень, є ДСН 3.3.6.042-99 [27]. Допустимі норми температури, відносної вологості та швидкості руху повітря в робочій зоні

виробничих приміщень наведені в таблиці 6.1. Робота з монтажу системи керування та її обладнання відноситься до категорії Пб по важкості праці.

Таблиця 6.1 – Допустимі норми параметрів повітря на непостійних робочих місцях

Період року	Категорія робіт	Температура, °С	Відносна вологість	Швидкість руху, X
Холод	Пб	13-23	75	не
Тепл		15-29	70 при	0,2-0,5

### 6.2.2 Склад повітря робочої зони

Забруднення повітря робочої зони регламентується гранично допустимими концентраціями (ГДК) в мг/м<sup>3</sup> [27].

Під час монтажу системи керування виділяється пил нетоксичний. При роботі системи вентиляції, провітрюванні у приміщенні може попадати пил та інші шкідливі речовини, які виділяються при технологічних процесах в цеху і знаходяться повітрі навколишнього середовища. Їх ГДК відповідно до [27] наведено в таблиці 6.2.

Для забезпечення допустимих показників мікроклімату та складу повітря робочої зони відповідно до ДБН проектом передбачені наступні рішення [28]: застосування пиловідсмоктуючих агрегатів з рукавними фільтрами, які встановлені безпосередньо на ділянках біля обладнання із яких очищене повітря поступає у виробниче приміщення; необхідно здійснювати контроль за ГДК шкідливих речовин у приміщенні; застосовувати природну вентиляцію: організовану та неорганізовану.

Таблиця 6.2 – Гранично допустимі концентрації шкідливих речовин для повітря атмосфери в робочій зоні монтажника

Назва	ГДК, мг/м <sup>3</sup>		Клас
	Максимально разова	Середньо добова	
Пил нетоксичний	0,5	0,15	4

### 6.2.3 Виробниче освітлення

Характеристика зорових робіт – малої точності. Відповідно до ДБН В.2.5-28-2018 [29] розряд зорової роботи V, підрозряд «а». Нормовані значення освітленості наведені в таблиці 6. 3.

Для забезпечення достатнього освітлення здійснюють систематичне очищення скла та світильників від пилу (не рідше двох разів на рік), використовують жалюзі. В разі нестачі природного освітлення, використовують загальне штучне освітленням, що створюється за допомогою світлодіодних ламп E27 LED 15W NW A60 "SG". Висота підвісу світильників над робочою поверхнею 4,5 метра.

Таблиця 6.3 – Вимоги до освітлення приміщень виробничих підприємств

Характер зорової роботи	Найменший або еквівалентний розмір об'єкта розрізнення, мм	Розряд зорової роботи	Ідентифікаційний розряд зорової роботи	Контраст об'єкта з фоном	Характеристика фону	Штучне при системі комбінованого освітлення		Природне освітлення	Сумарне освітлення
						Сього	у т. ч. від загального		
Малої точності	Від 1,0 до 5 включно			Малий	Темний	100	200	300	1,8

При експлуатації здійснюється контроль за рівнем напруги освітлювальної мережі, своєчасна заміна перегорілих ламп, забезпечується чистота повітря у приміщенні.

#### 6.2.4 Виробничий шум

Під час монтажу системи опалення на будівництві джерелом шуму є будівельне обладнання, машини, механізми та переносний електроінструмент – механічний шум. При санітарно-гігієнічному нормуванні шуму використовують два методи:

- нормування за гранично допустимим спектром шуму;
- нормування рівня звуку за шкалою А шумоміра.

За характером спектру шум – широкопasmовий з безперервний спектром шириною більше октави; за тональною характеристикою – постійний; за походженням – пневматичний. Допустимі рівні звукового тиску на робочих місцях приймаються за вимогами ДСН 32.23-85 [30] і наведені в таблиці 6.4.

Таблиця 6.4 – Допустимі рівні звукового тиску

Робоче місце	Рівні звукового тиску в октавних смугах з середньгеометричними частотами, Гц								
	3 1,5	6 3	1 25	2 50	5 100	1 1000	2 2000	4 4000	8 8000
На постійних робочих місцях у виробничих приміщеннях та на території підприємства	71	69	68	68	67	67	67	67	66

Для зменшення рівня шуму до допустимого в цеху двигуни виконуються в металевому кожусі, а також виконують змащення, застосовують пластмасові деталі, використовують протишумні навушники, які закривають вушну раковину.

### 6.2.5 Виробничі вібрації

Загальна вібрація передається на тіло через опорні поверхні людини, що стоїть чи сидить (підшви ніг або сідниці). Допустимі рівні загальної вібрації на робочих місцях приймаються за вимогами ДСН 32.23-85 [31] і наведені в таблиці 6.5.

Таблиця 6.5 – Допустимі рівні вібрації на постійних місцях

Вид вібрації	Октавні смуги з середньгеометричними частотами,									
				6	1,5	3	25	50	00	000
Загальна вібрація на постійних робочих місцях в виробничих приміщеннях	<u>3</u> 08	<u>45</u> 9	<u>22</u> 3	<u>2</u> 2	<u>2</u> 2	<u>2</u> 2				

В чисельнику середньоквадратичне значення вібрації, м/с  $10^{-2}$ , знаменнику - логарифмічні рівні вібрації, дБ.

Основними методами колективного віброзахисту є зниження вібрації шляхом дії на джерело виникнення: відстрочка від режиму резонанс; динамічне гасіння коливань, заміна конструктивних елементів уставок і будівельних конструкцій. Засоби індивідуального захисту діляться на засоби для ніг, рук та тіла працюючого.

### 6.2.6 Психофізіологічні фактори

Психофізіологічні фактори вибираються відповідно з Гігієнічною класифікацією праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу, затвердженої Наказом Міністерства охорони здоров'я № 528 від 27 грудня 2001 року.

Фізичні навантаження. Робоча поза: Періодичне перебування в незручній та/або фіксованій позі до 50% часу зміни; перебування у вимушеній позі (навпочіпки, на колінах і т. ін.) від 10% до 25% часу зміни; знаходження в позі стоячи від 60% до 80% часу зміни.

Сумарна маса вантажів, що переміщуються протягом кожної години зміни: з робочої поверхні (чоловіки): до 1500

Нахили корпуса (вимушені, більше 30), кількість за зміну: 101 –300

Переміщення у просторі (переходи, обумовлені технологічним процесом протягом зміни), км/ По горизонталі: до 12. По вертикалі: до 8

Інтелектуальні навантаження: Рішення складних завдань з вибором за відомим алгоритмом (робота за серією інструкцій)

Зміст роботи: Сприймання сигналів з наступним порівнянням фактичних значень параметрів з їх номінальним значеннями. Заключна оцінка фактичних значень параметрів, Обробка, перевірка і контроль за виконанням завдання, Робота в умовах дефіциту часу

Сенсорні навантаження: Тривалість зосередженого спостереження (в % від часу зміни) 51-75. Щільність сигналів (світлових, звукових) та повідомлень в середньому за годину роботи 176–300. Кількість виробничих об'єктів одночасного спостереження 11-25

Навантаження на зоровий аналізатор (Спостереження за екранами відеотерміналів (годин на зміну) 3-4

Навантаження на слуховий аналізатор (при виробничій необхідності сприйняття мови чи диференційованих сигналів) Розбірливість слів та сигналів від 70% до 50%



Навантаження на голосовий апарат (сумарна кількість годин, що наговорюються протягом тижня) 20-25

Емоційне навантаження: Ступінь відповідальності за результат своєї діяльності. Значущість помилки – Несе відповідальність за функціональну якість основної роботи (завдань). Вимагає виправлень за рахунок додаткових зусиль всього колективу (групи, бригади та ін.)

Ступінь ризику для власного життя: Ступінь відповідальності за безпеку інших осіб

Монотонність навантажень: Кількість елементів (приймів), необхідних для реалізації простого завдання або в операціях, які повторюються багаторазово 5-2

Тривалість виконання простих виробничих завдань чи операцій, що повторюються (сек.) 24-2

Монотонність виробничої обстановки (час пасивного спостереження за технологічним процесом в % від часу зміни) 91-95

Режим праці: Фактична тривалість робочого дня (год.) 10– 12

Змінність роботи Тризмінна робота (робота у нічну зміну)

Наявність регламентованих перерв та їх тривалість Перерви нерегламентовані або недостатньої тривалості до 3% часу зміни.

## ВИСНОВКИ

В ході даної магістерської кваліфікаційної роботи було виконано наступне:

1. Проаналізовано розвиток систем керування асинхронним електродвигуном, переваги, недоліки та особливості кожної з них можна зробити висновок, що система керування асинхронним електродвигуном за допомогою частотного перетворювача є гнучким у використанні та найбільш оптимальним рішенням. Вибором даної системи керування можна вирішити багато питань фактично одним пристроєм.

2. Проведено огляд режимів роботи електропривода на базі асинхронного електродвигуна у системах зі зворотнім зв'язком. Зробено висновок, що у системах керування зі зворотнім зв'язком двигун фактично не працює у жорстких режимах. Це сприяє збільшенню ресурсу двигуна та його помірному тепловому режиму. Досягається даний за рахунок системи керування на базі частотного перетворювача зі зворотнім зв'язком.

3. Було створено математичну модель системи ПЧ-АД зі зворотнім зв'язком. Проведено аналіз роботи системи зі зворотнім зв'язком та без нього. Детально розглянуто алгоритм керування такою системою на базі прямого та зворотнього перетворень Кларка-Парка, що значно спрощує обрахунки у вузлі прийняття рішень (у даному випадку – МК). Було вибрано оптимальне апаратне забезпечення, щоб забезпечити стійку та безвідмовну роботу системи.

4. Було виконано розробку принципової електричної схеми, зроблено детальний огляд функціональних вузлів з описом їх роботи. Виконано розробку та трасування друкованої плати з урахуваннями усіх особливостей конструкції та розіщення компонентів вузлів, критичних до трасування. Після монтажу усіх елементів на друковані плати було виконано тестування роботи системи з електродвигунами потужністю 60Вт з обертами 1750об/хв та 180Вт 2750об/хв.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Електропривод. Пижов В. М. Красношапка Н. Д. Островерхов М. Я. Київ, КПІ 2019 р.
2. Основи електроприводу. Лишук В. В. Літковець С. П. Луцьк, Технічний коледж Луцького НТУ, 2020 р.
3. Що таке перетворювач частоти. [Електронний ресурс] – Режим доступу - [https://elprivod.nmu.org.ua/ua/entrant/frequency\\_converter.php](https://elprivod.nmu.org.ua/ua/entrant/frequency_converter.php)
4. Кацев С. Ш., Ведміцький Ю. Г., Кухарчук В. В. Теоретичні основи електротехніки. Комп'ютерні розрахунки та моделювання нелінійних електричних кіл та кіл з розподіленими параметрами. Гельветика, 2019. 148 с.
5. Василега П. О., Муріков Д. В. Електропривод робочих машин : навч. посіб. Унів. кн., 2019. 228 с.
6. Корчемний М., Клендій П., Потапенко М. Теоретичні основи автоматики. Навч. кн. - Богдан, 2012. 304 с.
7. Матвієнко М. П. Промислова електроніка. Ліра-К, 2021. 424 с.
8. Сенько В. І., Трубіцин К. В., Чибеліс В. І. Інвертори і перетворювачі частоти. Ліра-К, 2020. 300 с.
9. Матвієнко М. П. Основи електротехніки та електроніки. Ліра-К, 2021. 504 с.
10. Електропривод: Механіка електроприводу. Електромеханічне перетворення енергії та електромеханічні властивості двигунів постійного струму: [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: В.М. Пижов, Н.Д. Красношапка, М.Я. Островерхов. – К.: КПІ ім. Ігоря – Електронні текстові дані (1 файл: 2,48 Мбайт). – Київ :КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 198 с.
11. Wilson D. Teaching Old Motors New Tricks. ti.com. URL: [https://e2e.ti.com/blogs\\_/b/industrial\\_strength/posts/teaching-old-motors-new-tricks](https://e2e.ti.com/blogs_/b/industrial_strength/posts/teaching-old-motors-new-tricks) (date of access: 11.12.2023).

12. Розрахунок і конструювання трифазних асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором. Курсове проектування : навчальний посібник / М. П. Розводюк, С. М. Левицький, В. С. Бомбик. –Вінниця : ВНТУ, 2018. – 135 с.
13. Математичні моделі та особливості чисельних розрахунків динаміки електроприводів з асинхронними двигунами: монографія / О. П. Чорний, О. І. Толочко, В. К. Титюк, Д. Й. Родькін, Г.С. Чекавський. – Кременчук: ПП Щербатих О. В, 2016. – 302 с. Іл
14. Кухарчук В. В., Ведміцький Ю.Г., Граняк В. Ф. Вимірювання параметрів обертального руху електромеханічних перетворювачів енергії в перехідних режимах роботи. Монографія. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2018. – 155 с.
15. Bening J. Embedded Software Design: A Practical Approach to Architecture, Processes, and Coding Techniques. Apress, 2022. 491 p.
16. Мілик В. І., Шавьолкін О. О. Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка. Каравела, 2018. 688 с.
17. Кухарчук В. В., Голодюк В. С., Бойко С. М. Апаратно-програмна реалізація широкодіапазонного мікроконтролерного частотоміра. Вінниця, 2023. С. 3.
18. Островерхов М. Я., Сенько В. І., Чибеліс В. І. Імпульсні перетворювачі стабілізованої напруги. Ліра-К, 2020. 248 с.
19. Horowitz P., Hill W. The Art of Electronics. Cambridge University Press, 2015. 1220 p.
20. Войцицький А. П., Войцицький М. А. Електроніка і мікросхемотехніка. 2-ге вид. Гельветика, 2018. 300 с.
21. Hu R. PCB Design and Layout Fundamentals for EMC. Independently published, 2019. 163 p.
22. ДСНіП «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу». Наказ МОЗ № 248 від 08.04.2014. [Чинний від 2014-05-30]. URL: [http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=58073](http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=58073).

23. ДСТУ-Н Б А 3.2-1: 2007. Настанова щодо визначення небезпечних і шкідливих факторів та захисту від їх впливу при виробництві будівельних матеріалів і виробів та їх використання в процесі зведення та експлуатації об'єктів будівництва. [Чинний від 2007-12-01]. URL: <https://profidom.com.ua/a-3/a-3-2/824-dstu-n-b-a-3-2-12007-nastanova-shhodo-viznachenna-nebezpechnih-i-shkidlivih-faktoriv->.

24. ДСТУ Б В.2.5-82:2016. Електробезпека в будівлях і спорудах. Вимоги до захисних заходів від ураження електричним струмом. [Чинний від 2017-04-01]. Вид. офіц. К. : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 109 с.

25. НПАОП 40.1-1.32-01. (ДНАОП 0.00-1.32-01). Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок. [Чинний від 2002-01-01]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0272203-01#Text>.

26. ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. Постанова МОЗ № 42 від 01.12.1999. [Чинний від 1999-12-01]. URL: <http://mozdocs.kiev.ua/view.php?id=1972>.

27. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. [Чинний від 2014-01-01]. Вид. офіц. К. : Мінрегіонбуд України, 2013. 149 с.

28. ДБН В.2.5-28:2018 Природне і штучне освітлення. [Чинний від 2019-03-01]. Вид. офіц. К. : Мінрегіонбуд України, 2018. 133 с.

29. ДСН 3.3.6.037-99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. Постанова МОЗ № 37 від 01.12.1999. [Чинний від 1999-12-01]. URL: <http://document.ua/sanitarni-normi-virobnichogo-shumu-ultrazvuku-ta-infrazvuku-nor4878.html>.

30. ДСН 3.3.6.039-99. Державні санітарні норми виробничої загальної та локальної вібрації. Постанова МОЗ № 39 від 01.12.1999. [Чинний від 1999-12-01]. URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/rada/show/va039282-99>.

31. Кодекс цивільного захисту України. К.: ВР України, 2012. URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/5403-17>.

32. Сакевич В. Ф. Основи розробки питань цивільної оборони в дипломних проектах: навчальний посібник. Вінниця: ВНТУ. 2006. 109 с.

## Додаток А

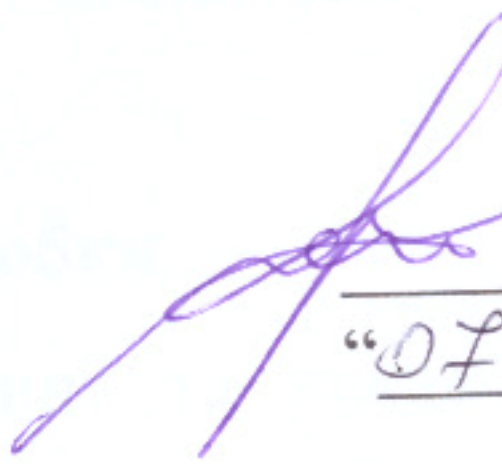
### Технічне завдання

Міністерство освіти і науки України  
Вінницький національний технічний університет  
Факультет електроенергетики та електромеханіки

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри КЕМСК

к.т.н., доц. Микола МОШНОРИЗ

 "07" 11 2023 р.

### ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

на магістерську кваліфікаційну роботу

СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ЧАСТОТНИМ ПЕРЕТВОРЮВАЧЕМ ДЛЯ  
АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ ЗІ ЗВОРОТНІМ ЗВ'ЯЗКОМ

08-24.МКР.006.00.000 ТЗ

Керівник МКР

к.т.н., доц.

Дмитро ПРОЦЕНКО

 "07" 11 2023 р.

Розробив студ. гр. ЕПА-22М.

Іван ГРУБИЙ

 "07" 11 2023 р.

## **1 Загальні відомості**

Повне найменування розробки «Система керування частотним перетворювачем для асинхронних електродвигунів зі зворотнім зв'язком».

Скорочене найменування розробки – «Перетворювач частоти для АД зі зворотнім зв'язком». Замовник – кафедра комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів.

## **2 Підстави для розробки**

Індивідуальне завдання та наказ ректора Вінницького національного технічного університету про затвердження тем магістерських кваліфікаційних робіт.

## **3 Призначення розробки і галузь використання**

Система керування частотним перетворювачем для асинхронних електродвигунів зі зворотнім зв'язком призначена для поліпшення усіх характеристик та збільшення надійності електроприводів на базі асинхронних електродвигунів. Галузь використання – системи автоматизації виробництва.

## **4 Вимоги до розробки**

Система керування частотним перетворювачем для асинхронних електродвигунів зі зворотнім зв'язком повинна забезпечувати стійку роботу електроприводу з чіткою реакцією на зміни у колі зворотнього зв'язку. Експлуатація здійснюється в умовах, які визначаються місцем встановлення системи автоматизації.

## **5 Комплектація розробки**

Модуль силової плати, модуль плати пристроїв вводу-виводу (НМІ), шлейф-з'єднувач, оптичний енкодер, зовнішній потенціометр номіналом 10 кОм.

## **6 Технічні характеристики**

Тип двигунів – асинхронні ,

Потужність двигунів – 0,05...2,2 кВт,

регулюючий елементи – зовнішній потенціометр номіналом 10 кОм.

## **7 Джерела розробки**

1. Кухарчук В. В., Ведміцький Ю.Г., Граняк В. Ф. Вимірювання параметрів обертового руху електромеханічних перетворювачів енергії в перехідних режимах роботи. Монографія. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2018. – 155 с.

2. Сенько В. І., Трубіцин К. В., Чибеліс В. І. Інвертори і перетворювачі частоти. Ліра-К, 2020. 300 с.

3. Wilson D. Teaching Old Motors New Tricks. ti.com. URL: [https://e2e.ti.com/blogs\\_/b/industrial\\_strength/posts/teaching-old-motors-new-tricks](https://e2e.ti.com/blogs_/b/industrial_strength/posts/teaching-old-motors-new-tricks) (date of access: 11.12.2023).

## **8 Конструктивне виконання**

Система керування частотним перетворювачем для асинхронних електродвигунів зі зворотнім зв'язком виготовляється двома платами-модулями та блоком оптичного енкодера, котрі реалізуються у відповідності до вимог електробезпеки та норм виготовлення електронних пристроїв.

## **9 Показники технологічності**

Система керування частотним перетворювачем для асинхронних електродвигунів зі зворотнім зв'язком виконується на сучасній елементній базі, є можливість виготовлення даних модулів на лінії автоматизованої збірки електроніки.



## 10 Стадії і етапи розробки

Стадії і етапи розробки	Термін виконання
Основна частина пояснювальної записки	
Графічна частина	
Охорона праці	

## 11 Технічне обслуговування і ремонт

Збирання системи та пусконаладжувальні роботи повинні проводитись кваліфікованими фахівцями. У разі поломки будь-якого з модулів його необхідно замінити повністю, ремонт виключено.

## 12 Живлення пристрою

Живлення системи керування частотним перетворювачем для асинхронних електродвигунів зі зворотнім зв'язком виконується напругою 220В. Для додаткового захисту слід використовувати автоматичний вимикач категорії С на струм 16А (С16).

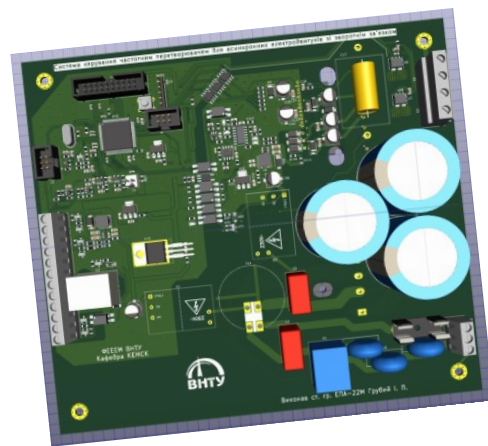
**Додаток Б**

**ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА**

**СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ЧАСТОТНИМ ПЕРЕТВОРЮВАЧЕМ  
ДЛЯ АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ ЗІ ЗВОРОТНІМ  
ЗВ'ЯЗКОМ**

ФЕЕМ ВНТУ

## Система керування частотним перетворювачем для асинхронних електродвигунів зі зворотнім зв'язком



Розробив: ст. гр. ЕПА-22М Грубий І. П.  
Керівник МКР: к.т.н, доц. Проценко Д. П.

Рисунок 1 – Вступний слайд презентації

## Мета, об'єкт і предмет роботи

Метою даної роботи є підвищення ефективності та розширення діапазону швидкості обертання з підтримкою моменту за рахунок використання нестандартного алгоритму керування частотним перетворювачем.

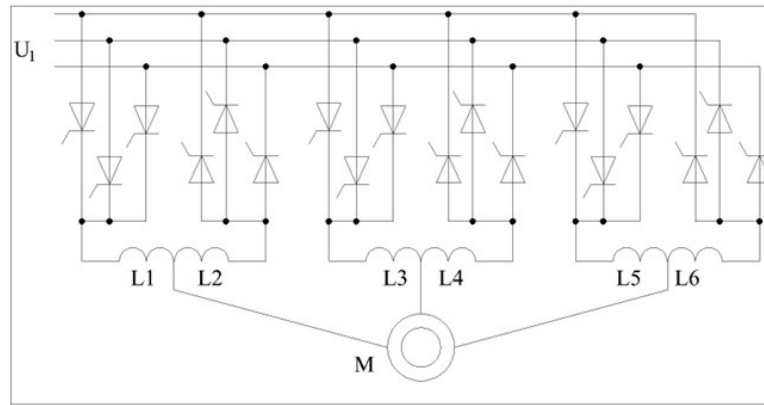
Об'єктом роботи є система керування асинхронним електродвигуном на базі частотного перетворювача.

Предмет роботи:

- апаратне забезпечення системи керування асинхронним електродвигуном (принципова електрична схема та друкована плата, оптичний енкодер);
- математична модель системи керування на базі частотного перетворювача;
- нестандартний алгоритм керування асинхронним двигуном на базі прямого та зворотнього перетворень Кларка-Парка.

Рисунок 2 – Мета, об'єкт і предмет роботи (презентація)

## Огляд існуючих систем керування АД



Тиристорний  
перетворювач  
частоти

Перетворювач  
частоти на базі  
IGBT-транзисторів

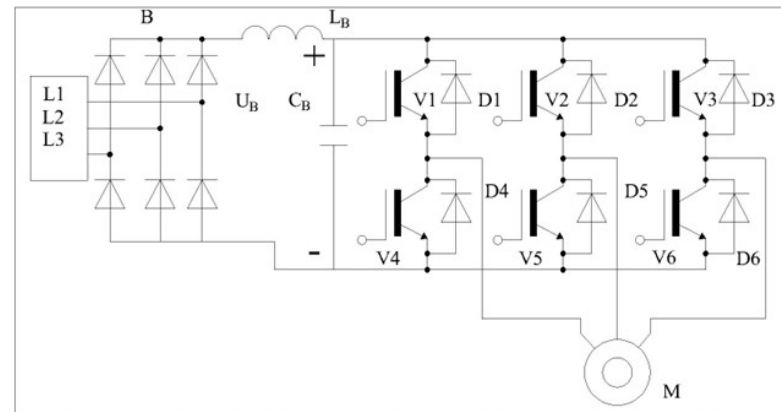
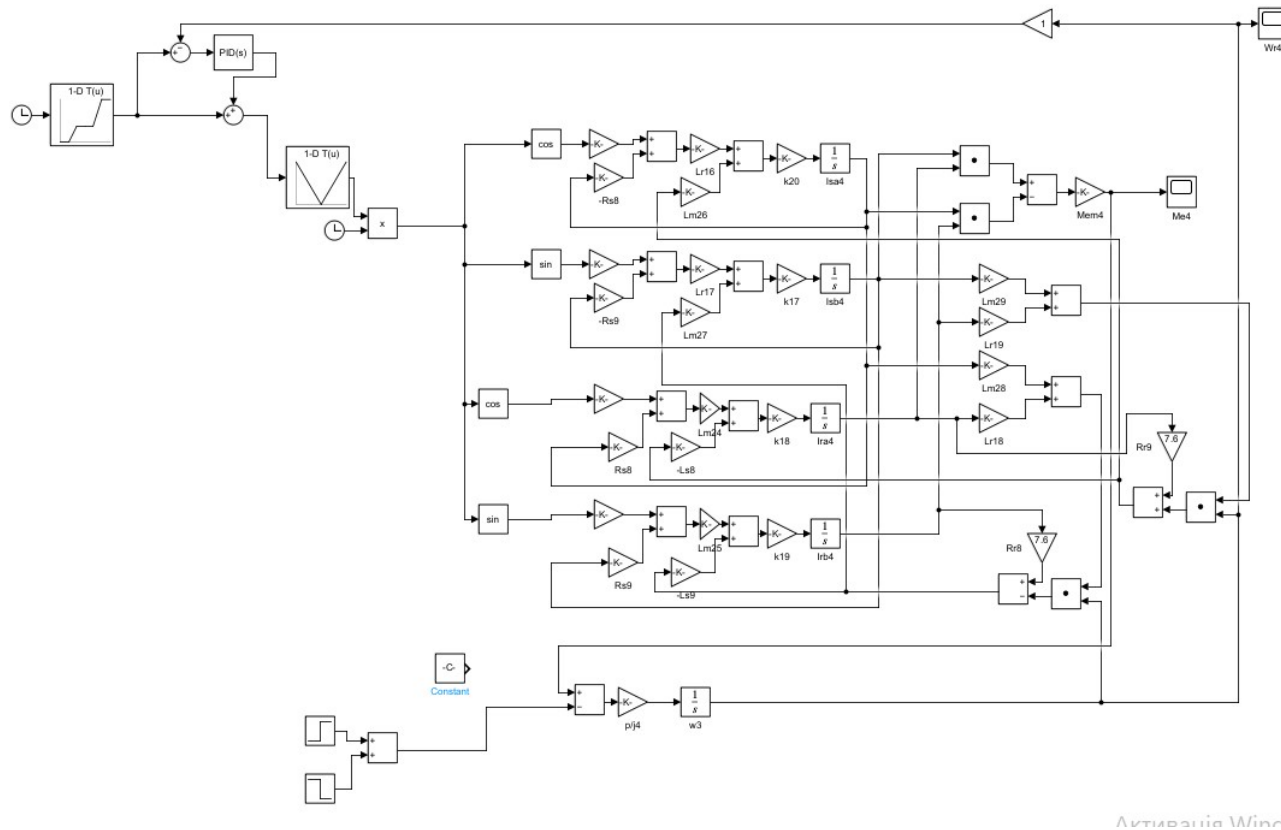


Рисунок 3 – Огляд типів перетворювачів частоти

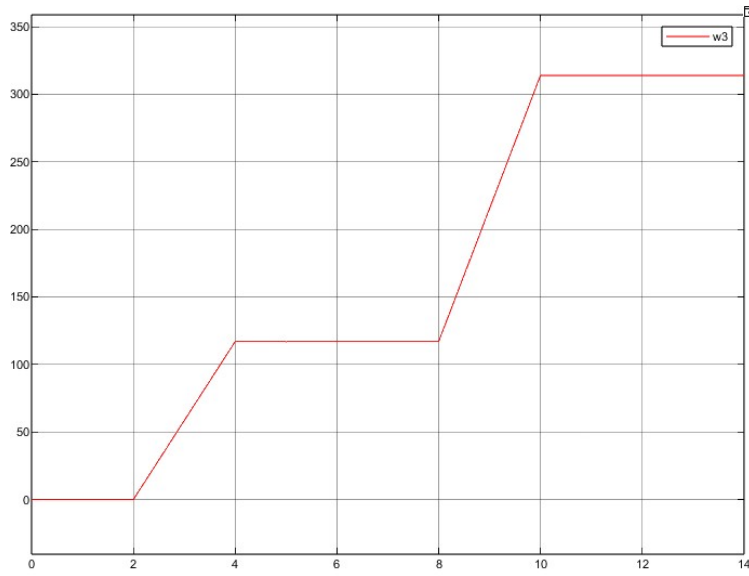
## Математична модель



Система керування АД зі зворотнім зв'язком на базі частотного перетворювача ППП Matlab Simulink

Рисунок 4 – Математична модель системи

## Результати моделювання



Графік зміни швидкості

Графік зміни крутного моменту при різкому навантаженні

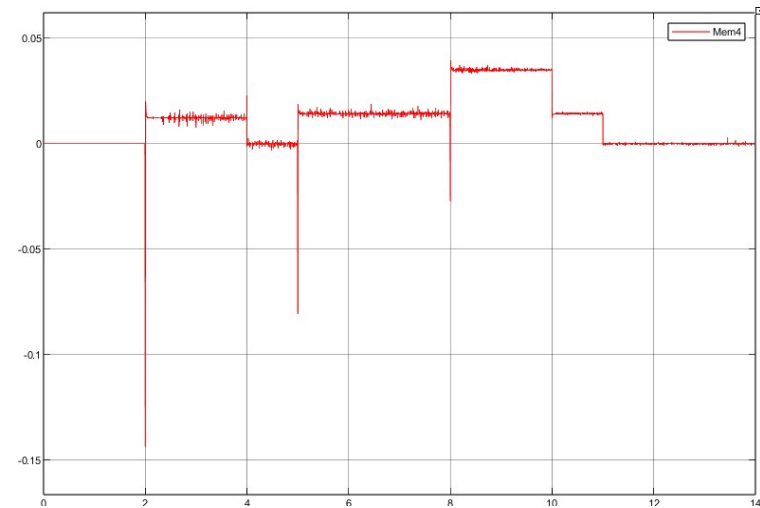


Рисунок 5 – Результати симуляції в середовищі Matlab Simulink

## Алгоритм роботи

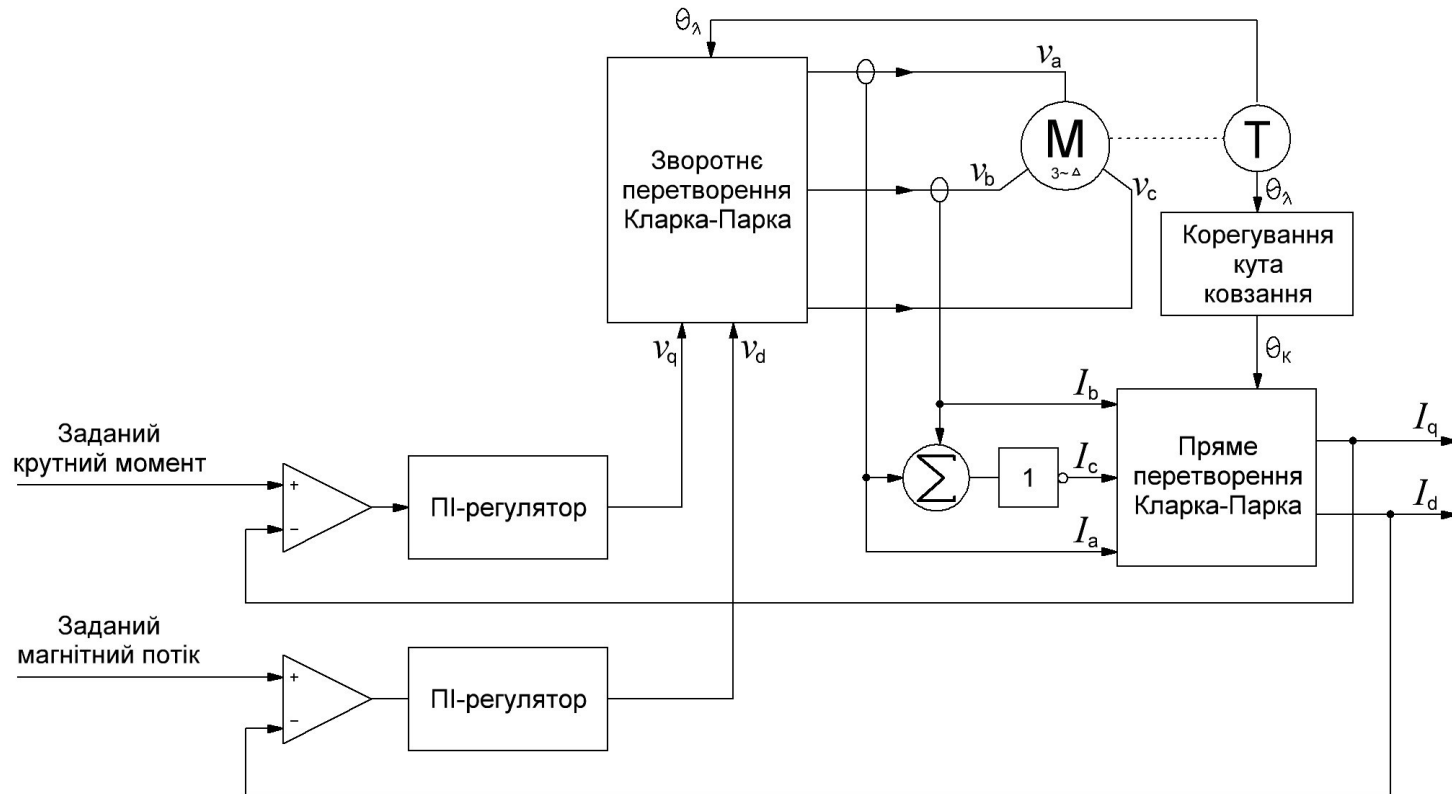


Рисунок 6 – Алгоритм роботи



## Вимірювання швидкості обертання та положення ротора

Для вимірювання частоти обертання ротора та знаходження його положення використовується оптичний енкадер.

Конструкцію такого пристрою показано на рисунку нижче:

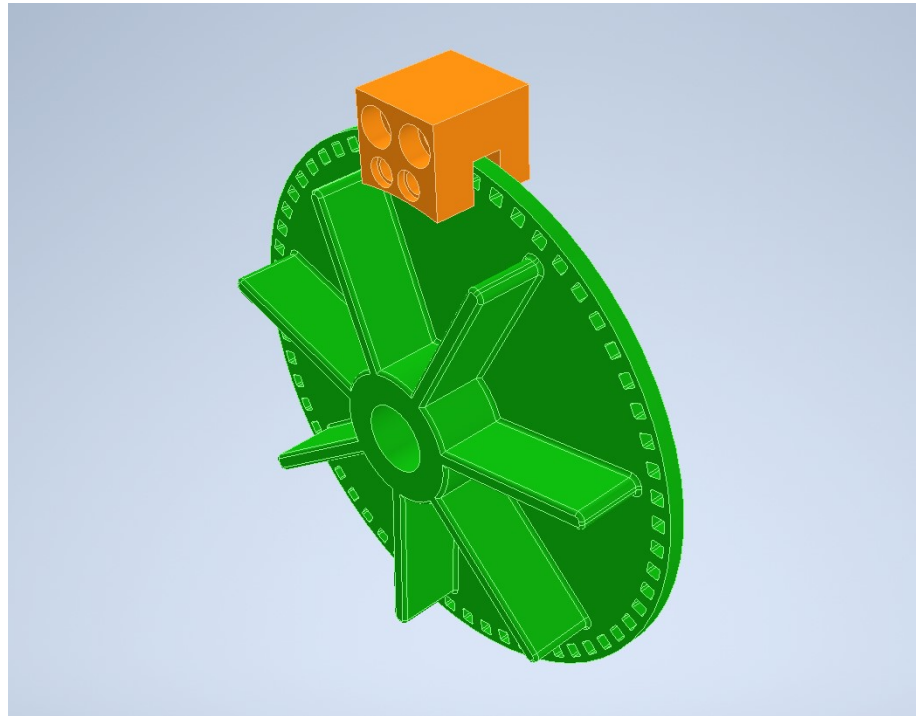


Рисунок 7 – Оптичний енкадер

## Блок-схема системи керування асинхронним двигуном зі зворотнім зв'язком (СКАД із 33)

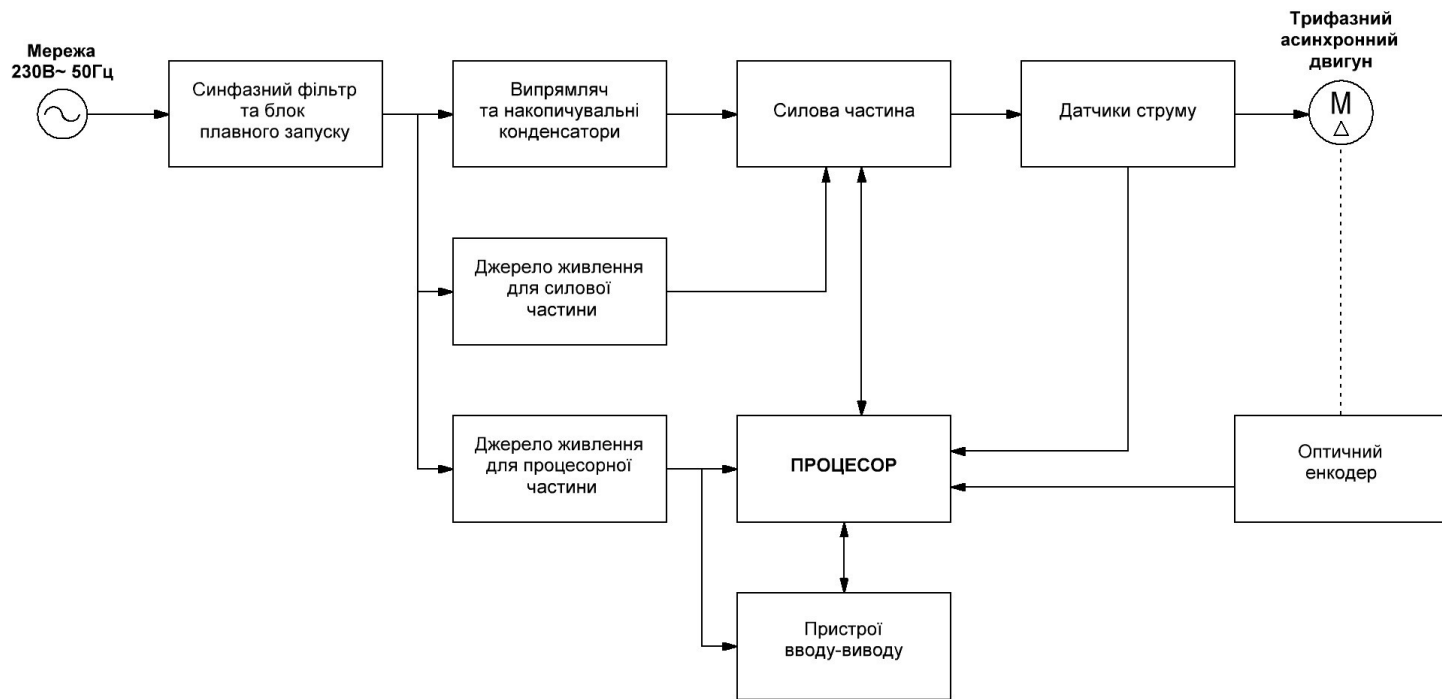


Рисунок 8 – Блок-схема системи керування

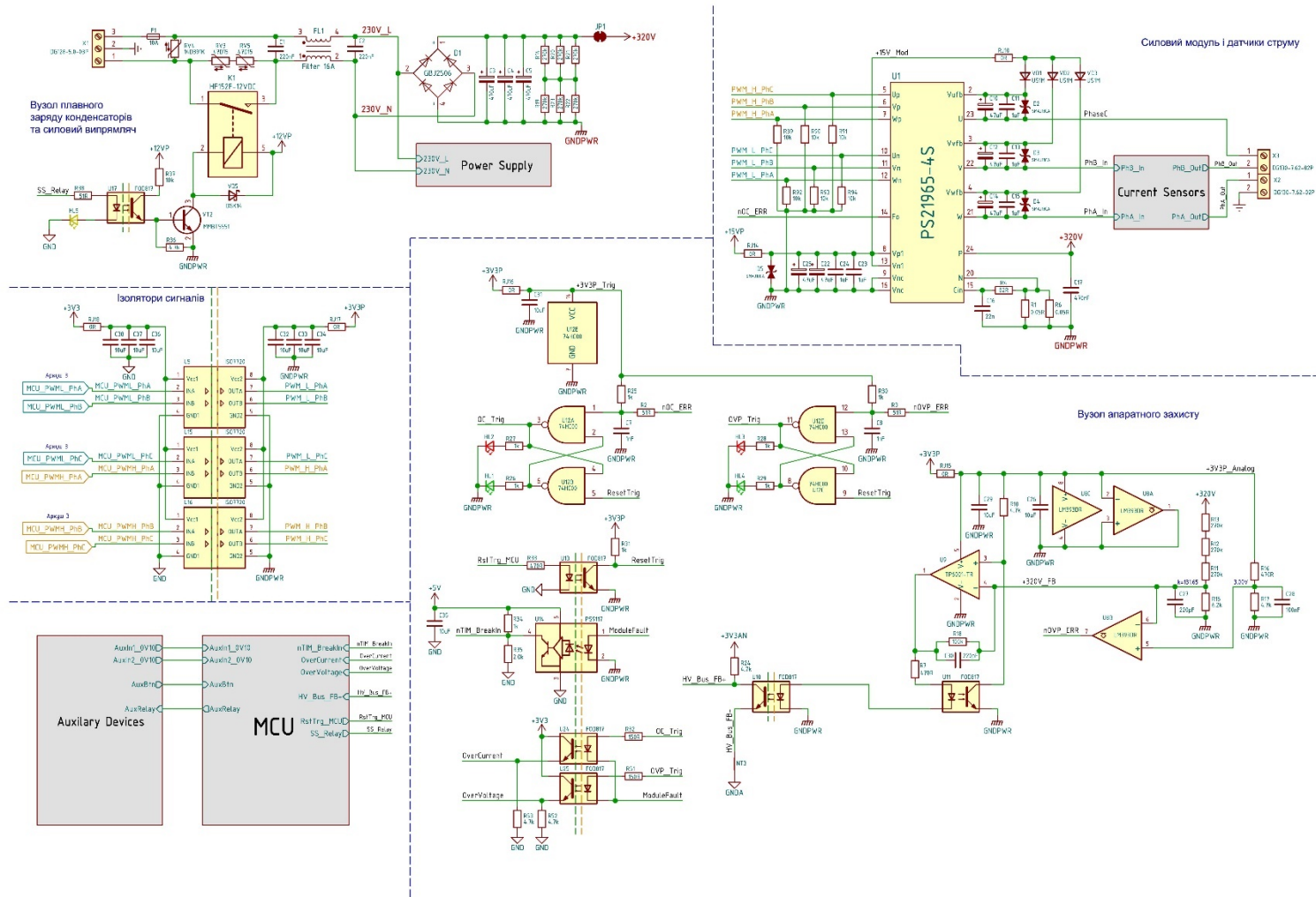


Рисунок 9 – Приципова електрична схема вузлів силової плати

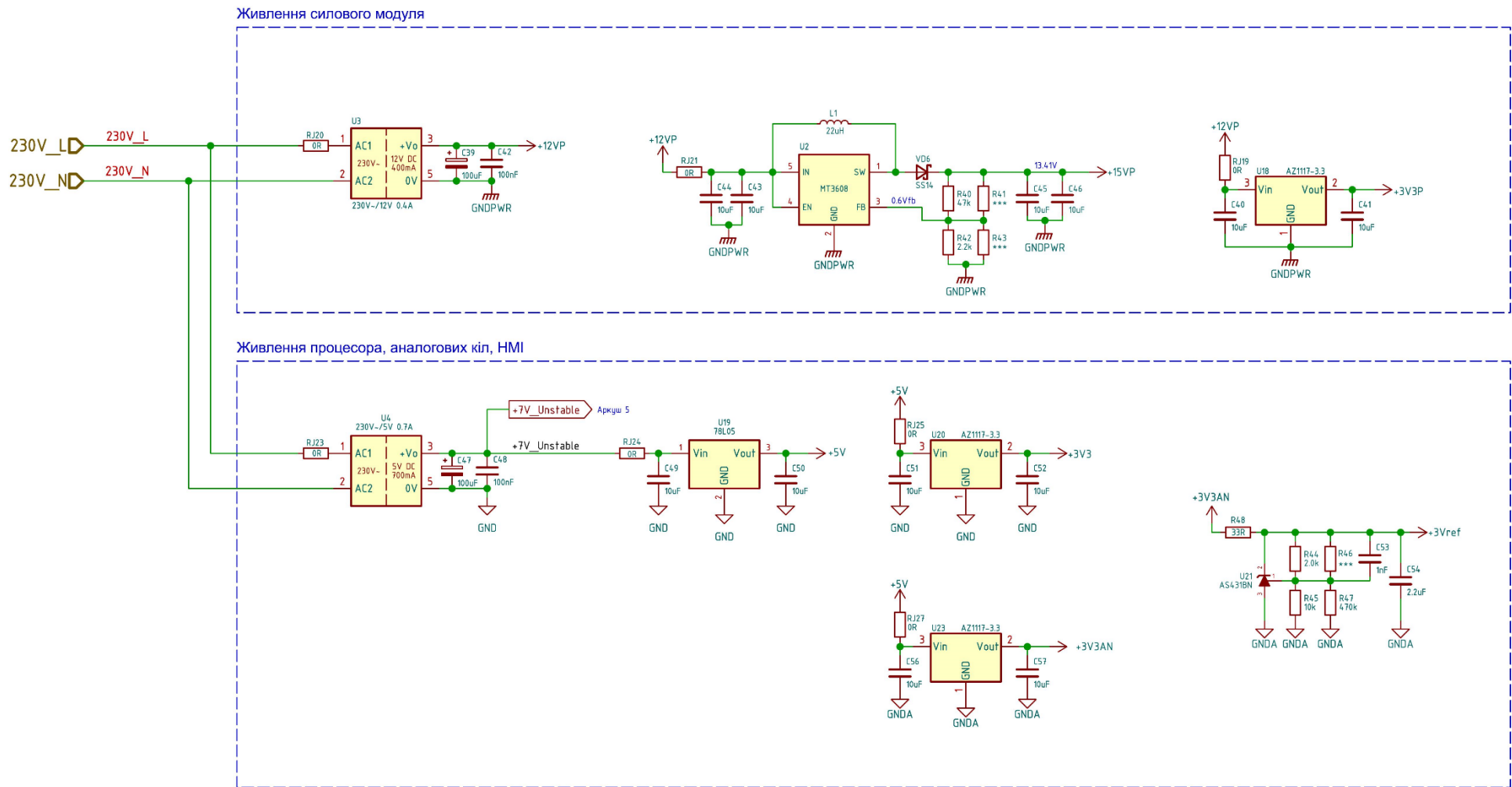


Рисунок 10 – Приципова електрична схема вузлів формування живлення

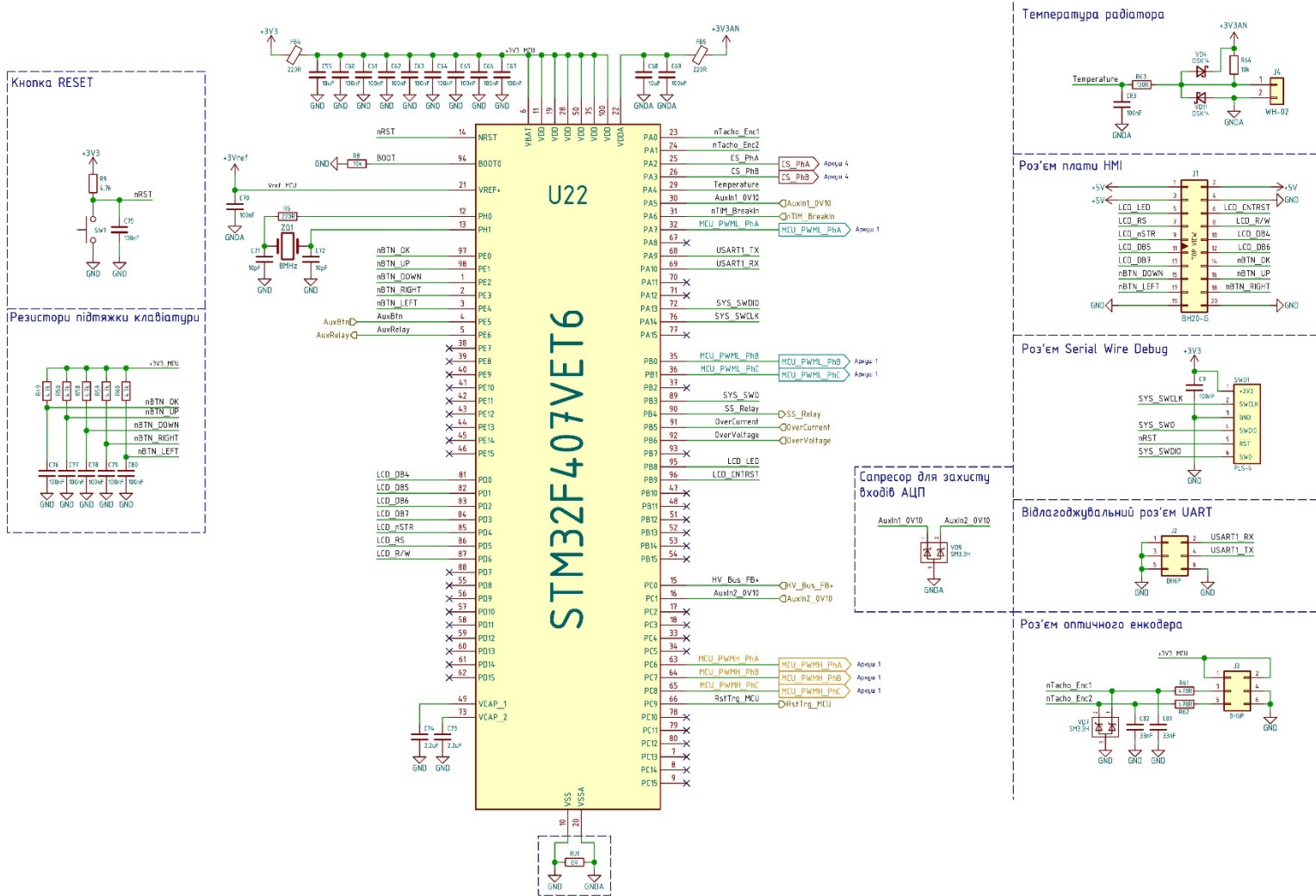


Рисунок 11 – Приципова електрична схема периферії процесора

## Фазні датчики струму

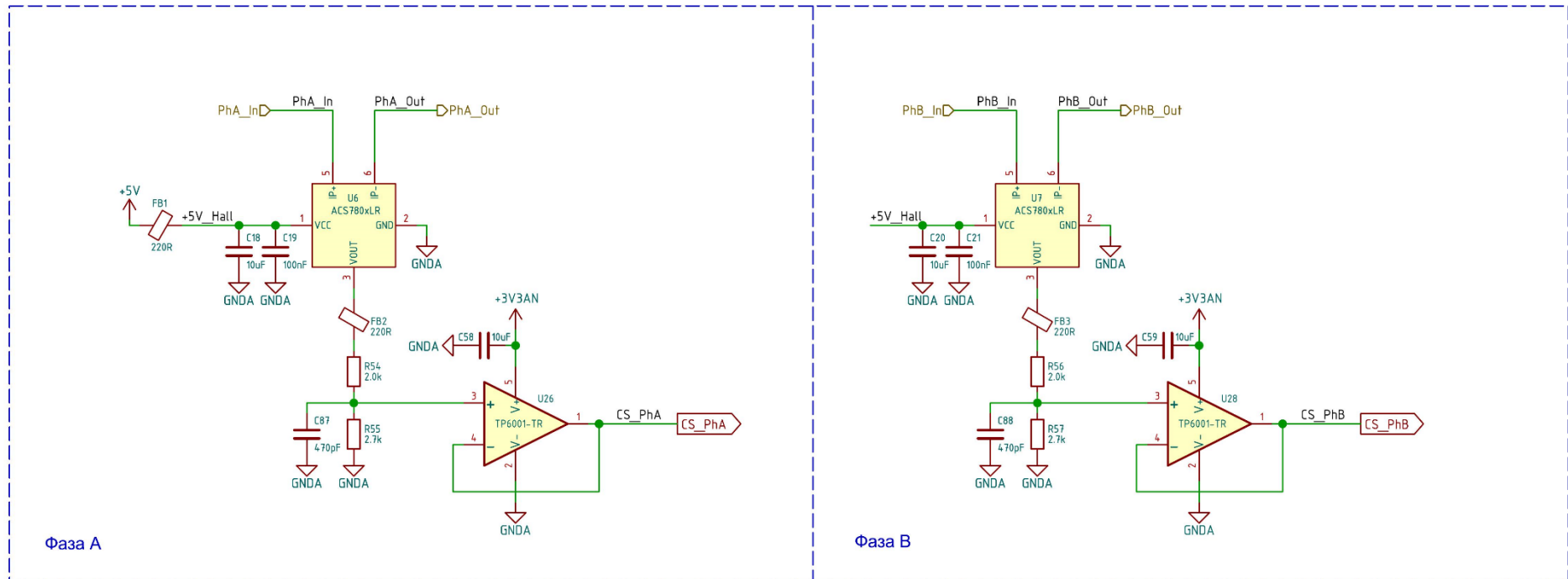
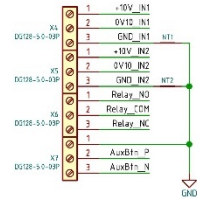
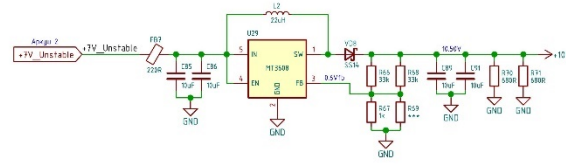


Рисунок 12 – Приципова електрична схема датчиків струму

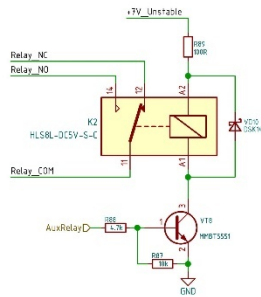
Роз'єм для аналогових входів, зовнішньої кнопки та сигнального реле



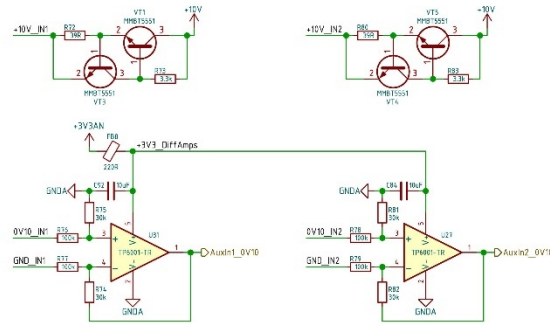
Підвищуючий перетворювач для аналогових входів



Сигнальне реле



Джерело струму та диференційні підсилювачі для обробки аналогових входів



Вхід зовнішньої кнопки

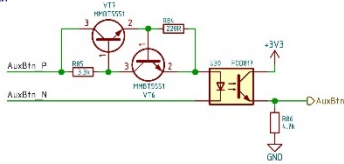


Рисунок 13 – Приципова електрична схема дискретних та аналогових

Плата з дисплеєм (HMI)

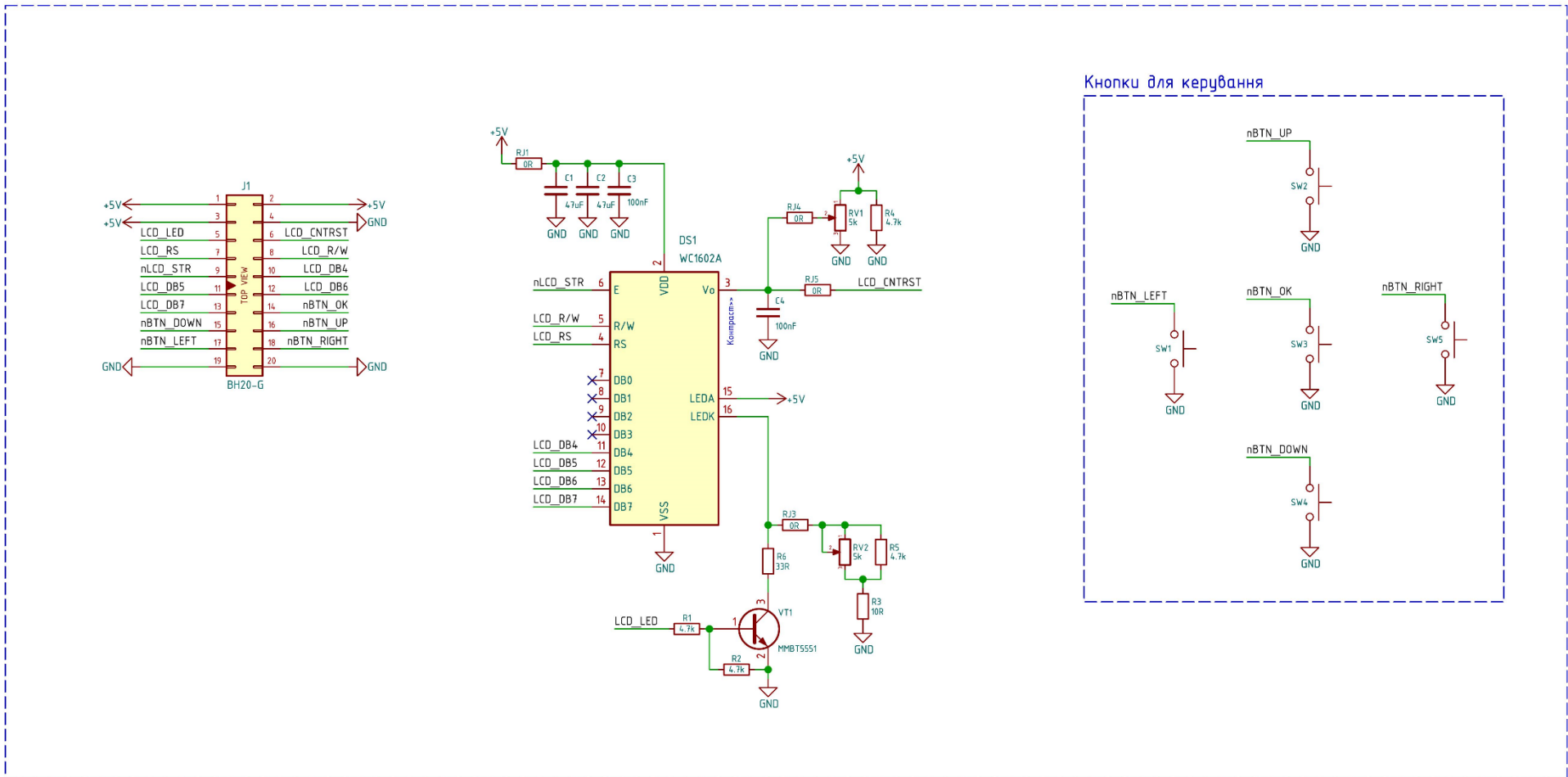
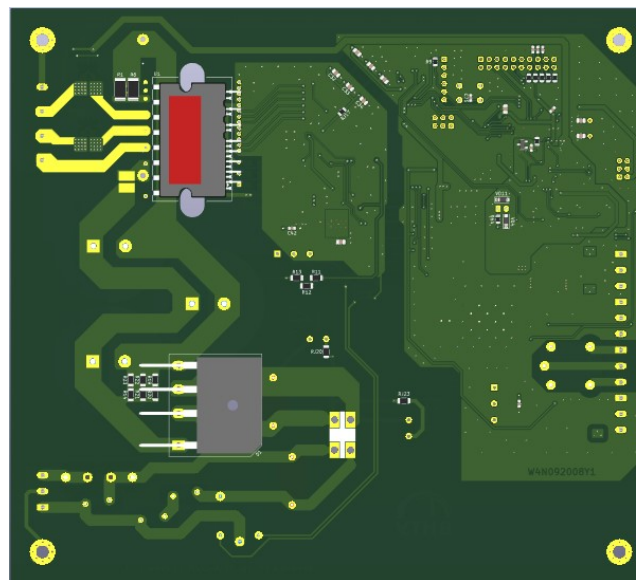
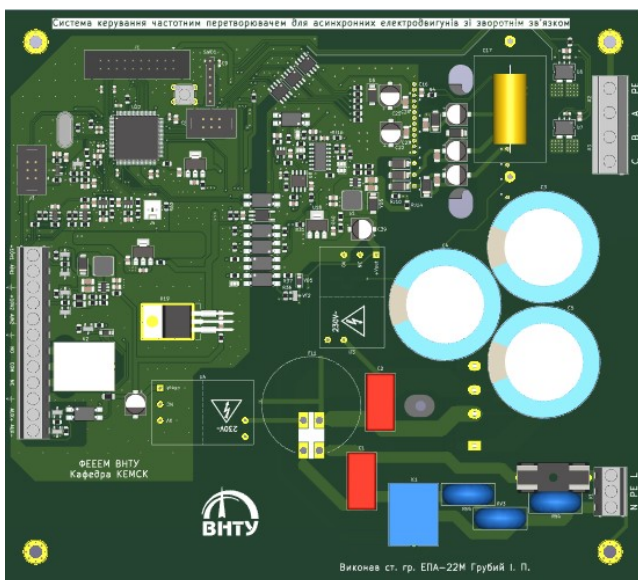


Рисунок 14 – Приципова електрична схема плати пристроїв вводу-виводу (HMI)



## Огляд друкованих плат системи

Основна (силова) плата



Плата пристроїв вводу-виводу

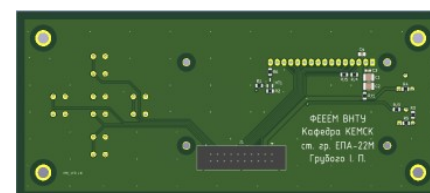
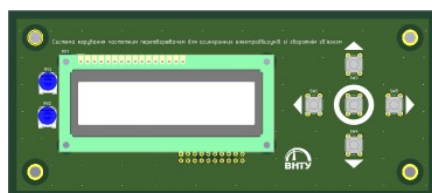


Рисунок 15 – Друковані плати системи

## Фрагмент коду основної процедури

```
// Головна процедура оновлення статорних напруг на основі вимірних фазних струмів.
IM_Ctrl::ThreePhasePwmVector IM_Ctrl::Update(Real iPhA, Real iPhB, Real iPhC, Real vBus)
{
    IphA = iPhA * AdcToCurrentRatio ; IphB = iPhB * AdcToCurrentRatio ; IphC = iPhC * AdcToCurrentRatio ;
    ActualBusVoltage = vBus; // * AdcToBusVoltageRatio ;

    StatorCurrentVector = ThreePhaseToTwoPhase (IphA, IphB);
    RotorCurrentVector = StatorToRotorTransform(StatorCurrentVector, RotorPhasor);

    RotorVoltageVector.D = Dreg.DoStep(FieldNeeded , RotorCurrentVector.D);
    RotorVoltageVector.Q = Qreg.DoStep(TorqueNeeded , RotorCurrentVector.Q);

    StatorVoltageVectorScaled.Alpha = StatorVoltageVector.Alpha*ActualBusVoltage;
    StatorVoltageVectorScaled.Betta = StatorVoltageVector.Betta*ActualBusVoltage;

    RotorPhasor = EstimateFluxAngle (StatorCurrentVector, StatorVoltageVectorScaled);

    NormalizeVoltageVector (RotorVoltageVector);
    StatorVoltageVector = RotorToStatorTransform(RotorVoltageVector, RotorPhasor);

    ThreePhasePwmVector statorVec = SVM(StatorVoltageVector);

    return statorVec;
}
```

Рисунок 16 – Основний код, що відповідає за алгоритм (презентація)

## Висновки

1. Розглянуто способи керування асинхронним електродвигуном, у тому числі при використанні контуру зворотнього зв'язку.
2. Визначено режими роботи системи електроприводу зі зворотнім зв'язком.
3. Розроблену математичну модуль системи.
4. Розроблено алгоритм керування
5. Виконано розробку апаратного забезпечення під вимоги даної системи.
6. Проведено тестування отриманої системи керування асинхронним двигуном на базі частотного перетворювача зі зворотнім зв'язком.
3. Наукова новизна.
4. Тези, публікації.
5. Результати роботи апробовано на конференції «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи».

Відомості про результати перевірки

Кабінет МКБ КШМ' доп. Цирюпанко П. П.  
Бориспольський с/п'сб ЕПА-23М Т. В. 01



Система керування частотним перетворювачем  
для асинхронних електродвигунів зі зворотнім  
зв'язком. Вступний слайд презентації

ФЕЄН ПІДА

08.24.МКР.006.00.000					Літ.	Маса	Маса
Зм. Арк.	№ докумен.	Підпис	Дата	Система керування частотним перетворювачем для асинхронних електродвигунів зі зворотнім зв'язком. Вступний слайд презентації.			
Розробив:	Грубий І. П.		21.11				
Перевірив:	Проценко Д. П.		27.11				
Т. контр.							
Реценз.	Шулле Ю. А.		17.12		Аркуш	Аркушів	
Норм. коп.	Паянок О. А.		28.11				
Затверд.	Мошнорізі М. М.		28.11				
					ВНТУ, гр. ЕПА-23М		

## ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ НА НАЯВНІСТЬ ТЕКСТОВИХ ЗАПОЗИЧЕНЬ

Назва роботи: Система керування частотним перетворювачем для асинхронних електродвигунів зі зворотним зв'язком

Тип роботи: магістерська кваліфікаційна робота

Підрозділ: кафедра КЕМСК, ФЕЕЕМ, гр. ЕПА-22м

Науковий керівник: к.т.н., доц. Проценко Д.П.

(прізвище, ініціали, посада)

### Показники звіту подібності Unicheck

Оригінальність	92,4%
Схожість	7,6%

Аналіз звіту подібності (відмітити потрібне)

Запозичення, виявлені у роботі, оформлені коректно і не містять ознак плагіату.

Виявлені у роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість викликає сумніви щодо цінності роботи і відсутності самостійності її автора. Роботу направити на доопрацювання.

Виявлені у роботі запозичення є недобросовісними і мають ознаки плагіату та/або в  ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень.

Особа, відповідальна за перевірку


  
(підпис)

Паянок О.А.

(прізвище, ініціали)

Ознайомлені з повним звітом подібності, який був згенерований системою Unicheck щодо роботи.

Автор роботи

  
(підпис)

Грубий І.П.

(прізвище, ініціали)

Керівник роботи

  
(підпис)

Проценко Д.П.

(прізвище, ініціали)